

doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202102011

基于渗流 - 应力耦合分析隧道双层衬砌力学特性

张 志¹, 姚 军²

(1. 安徽水利水电职业技术学院 市政与交通工程学院, 安徽 合肥 231603;
2. 合肥学院 城市建设与交通学院, 安徽 合肥 231601)

摘要:城市地铁盾构隧道支护结构主要为单层衬砌。为满足支护结构承载、防渗、开裂等要求, 双层衬砌结构设计日益成熟。为揭示双层衬砌力学特性, 首先通过推导渗流 - 应力耦合方程组, 揭示地下土体应力、渗流相互耦合方程; 基于渗流 - 应力耦合原理, 利用 ABAQUS 软件, 考虑围岩压力、隧道埋深等工况, 计算、比较单层衬砌、双层衬砌的承载力特性, 得到以下结论: (1) 初衬、二衬在支护作用下均承载, 但是初衬应力为二衬 3 倍左右, 为主要承载结构; (2) 在渗透系数减小的情况下, 初衬应力增加、二衬应力减小, 二衬的作用主要为防渗和安全储备。

关键词: 双层衬砌; 结构计算; 渗流 - 应力耦合; 渗透系数; 数值计算

中图分类号: U451.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671 - 5322(2021)02 - 0049 - 05

随着我国经济快速发展、城市化水平不断提高, 人口向城市流动造成城市人口骤增, 城市交通出行压力持续增加。与其他城市交通运输方式相比, 城市轨道交通在公共交通运输方式中效率最高, 是解决城市出行问题的最佳方式之一。截至 2020 年, 全国已有 50 个城市投入轨道交通建设当中, 轨道通车里程约达 6 000 km^[1]。

在如此庞大的轨道建设中, 双层衬砌结构已经逐渐取代单层衬砌而被使用。相比单层衬砌结构而言, 双层衬砌结构在防水性能、承受外荷载以及抵抗变形能力等方面均有较大提升。尤其在水工隧道以及地震频发等极端恶劣环境下, 双层衬砌能保证管片安全性和整体稳定性^[2-4]。但是, 目前关于城市盾构双层衬砌结构的研究主要集中在软弱围岩、水工隧道的隧洞双层衬砌^[5]。张厚美等^[6]通过有限元计算对穿黄隧洞双层衬砌的结构内力进行了计算, 研究水工隧洞双层衬砌结构力学特性。黄强兵等^[7]分析了衬砌裂缝对隧道结构安全的影响。李春良等^[8]通过数值计算分析了盾构隧道在纵向刚度变化条件下的力学特性。苏宗贤等^[9]采用强制位移法在不考虑纵向变形的前提下研究隧道横向力学特性。姚军

等^[10]基于理论计算分析初衬、二衬之间的刚度与滑移变形等。罗泽军等^[11]基于地震荷载作用计算分析不同工况下盾构隧道双层衬砌管片结构的变形以及受力特征, 并指出二衬结构主要是起到耐久性和安全储备的作用。但是研究主要基于整个衬砌结构开展, 关于初衬、二衬各自的力学特点尚未开展相关研究, 且未考虑隧道周围渗流 - 应力相互耦合对隧道的影响。所以本文基于渗流 - 应力耦合研究初衬、二衬的力学特性。

1 地铁隧道渗流 - 应力耦合分析

城市地铁隧道在一定埋深下, 隧道支护结构在应力场、渗流场共同作用下工作, 渗流场和应力场是相互作用相互影响的, 渗流力和地应力相互耦合后作用在衬砌结构上。本文首先推导渗流 - 应力耦合方程, 然后采用数值计算方法, 计算不同围岩渗透下的初衬、二衬孔压, 从而有效分析应力的规律^[12]。

1.1 渗流基本方程

假设土体在水力学特性上为连续介质, 地下水对围岩和衬砌结构的作用力可用分布在围岩和衬砌上的场力表示, 即渗流力。假设水体不可压

收稿日期: 2021-01-15
基金项目: 安徽省高校科学研究项目重点项目 (KJ2019A1020、KJ2019A0822); 合肥学院自然科学基金重大项目 (18ZR02ZDA)。
作者简介: 张志(1977—), 女, 安徽合肥人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为市政工程。

缩,在岩体中的渗流符合 Darcy 定律。

根据 Darcy 定律,在岩体中水流流速可以表示为^[13]:

$$\frac{\partial(\varphi\rho_w)}{\partial t} + \nabla v_i = 0 \tag{1}$$

式中: φ 为固体孔隙率,%; ρ_w 为水的密度,kg/m³; t 为时间,s; v_i 为水的流速,m/s。

根据流体流动的动量方程可得 Darcy 定律表达式:

$$\begin{cases} v_x = -k_x \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\rho_w g} \\ v_y = -k_y \frac{\partial p}{\partial y} \frac{1}{\rho_w g} \\ v_z = -k_z \frac{\partial p}{\partial z} \frac{1}{\rho_w g} \end{cases} \tag{2}$$

式中: x,y,z 代表 3 个渗透主方向; k_x,k_y,k_z 分别为 3 个渗透主方向上的渗透系数,m/d; p 为孔隙水压力,Pa。

加上固体骨架的变形项,经过一系列推导可得:

$$\frac{1}{\rho_w g} \left[k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right] = -\alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{1}{Q} \frac{\partial p}{\partial t} \tag{3}$$

式中: α,Q 为 Biot 系数; t 为时间,s; ε_v 为固体的体积应变,mm。

1.2 力学平衡方程

假设土体为理想弹性体(若为弹塑性体,只需用弹塑性本构关系替代即可,平衡方程形式相同),考虑流体孔隙压力的本构关系如下:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\delta_{kl}\varepsilon_{kl} - \alpha\delta_{ij}p \tag{4}$$

式中: σ_{ij} 为应力分量,MPa; ε_{ij} 为应变分量,mm; α 为 Biot 系数; δ 为 Kronecker 数。

将式(4)和应变位移关系代入静力平衡方程式,可以得到用位移表示的包含耦合项的修正的 Navier 平衡方程:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda/2)u_{j,ji} - \alpha p_{,j} = F_i \tag{5}$$

式中: F_i 为体积力分量,kN。

进一步推导后写成方程组形式为:

$$\begin{cases} G \nabla^2 u - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon_v - \alpha \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ G \nabla^2 v - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon_v - \alpha \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \\ G \nabla^2 w - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial z} \varepsilon_v - \alpha \frac{\partial p}{\partial z} = \gamma \end{cases} \tag{6}$$

式中: u,v,w 分别为 3 个主方向上的位移分量, ε_v

为固体的体积应变,mm; λ,G 为拉梅系数; ∇^2 为拉普拉斯算子; γ 为土颗粒的容重,kN/m³[13]。

上述偏微分方程组的定解问题可转化为泛函求极值的问题。将泛函令为物体变形的总势能,则由泛函求极值与欧拉方程等价的原理可导得有限元计算的基本方程,据以求得各结点的位移值,进而求得应变和应力。

1.3 渗流应力耦合方程组

根据上述渗流基本方程和力学平衡方程组,采用 Biot 固结理论可得到渗流-应力耦合方程组。Biot 理论是以有效应力为基础,考虑力学平衡方程和渗流基本方程的耦合,对于三维问题,单元节点有 4 个自由度存在,即 3 个位移自由度和 1 个孔隙水压力自由度。以下为 4 自由度耦合控制方程:

$$\begin{cases} G \nabla^2 u - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon_v - \alpha \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ G \nabla^2 v - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon_v - \alpha \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \\ G \nabla^2 w - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial z} \varepsilon_v - \alpha \frac{\partial p}{\partial z} = \gamma \\ \frac{1}{\rho_w g} \left[k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right] = -\alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{1}{Q} \frac{\partial p}{\partial t} \end{cases} \tag{7}$$

偏微分方程组完整地定义了渗流场-应力场全耦合的数学模型。通过施加一定的边界条件和初始条件,即可求解上述耦合控制方程组,可以得到结点位移和水压^[14]。

2 双层复合衬砌数值计算

2.1 模型建立

本文采用 ABAQUS 有限元软件建模计算,选取某市地铁隧道线典型断面,根据地质资料建立二维有限元计算模型。计算模型设计隧道尺寸外径 10.8 m,隧道平均埋深 20 m,均为黏性土,隧道初衬厚度 0.5 m、二衬厚度 0.3 m。盾构隧道结构横断面如图 1 所示,在 ABAQUS 中建立围岩、衬砌结构模型并进行网格划分,衬砌模型、网格划分如图 2、图 3 所示。

在建模过程中,传统方法是初衬、二衬作为两个独立体,在接触面上设置连接单元,但常常由于接触单元属性、参数设置不合理导致模型不收敛。为解决这一问题将初衬、二衬建为一个独立 part,然后根据半径不同进行切割进而分为初衬、二衬,既保证模型计算可以收敛也可以提高计算精

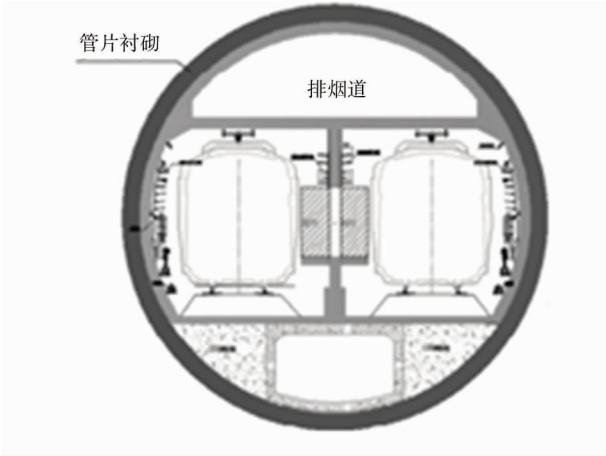


图 1 盾构隧道结构横断面图
Fig 1 Cross section of shield tunnel structure

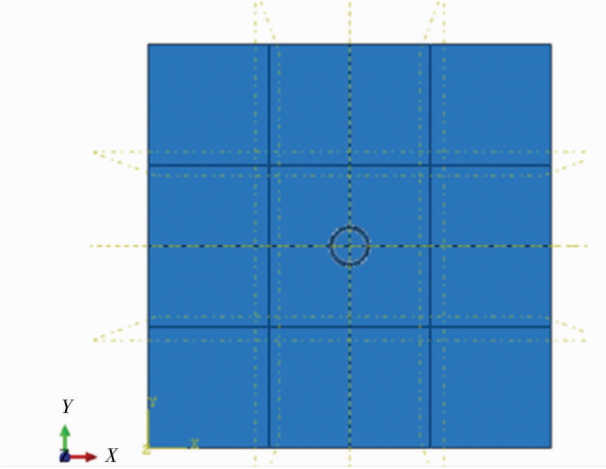


图 2 围岩、衬砌模型
Fig 2 Model of surrounding rock and lining

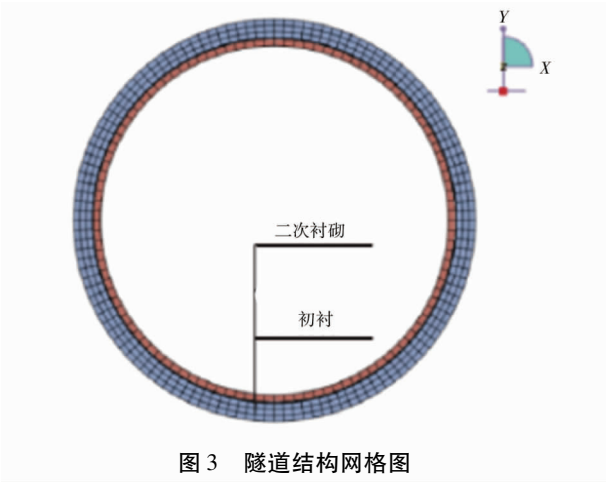


图 3 隧道结构网格图
Fig 3 Grid diagram of tunnel structure

度^[15-16]。

2.2 初衬、二衬力学特性

在实际过程中,通常由于地质参数不同或者不同季节,导致土体中含水量不同或者渗透系数不同,将会对衬砌支护结构受力产生较大影响。

表 1 所示为五种工况的模型参数,表 2 所示为五种工况下的计算结果,通过学者们对各种敏感性分析,由计算可得出围岩渗透系数对衬砌应力影响较为明显,图 4、图 5 为隧道周围土体应力云图和孔压分布情况云图,图 6、图 7 为初衬、二衬应力云图。

表 1 不同工况模型参数
Table 1 Model parameters under different working conditions

工况	围岩渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	渗流初始状态	开挖后状态
		孔压/Pa	孔压/Pa
1	1×10^{-5}	381.3	1 700
2	1×10^{-6}	395.5	299.4
3	1×10^{-7}	400.1	284.1
4	1×10^{-8}	400.7	281.2
5	1×10^{-9}	400.8	281.9

表 2 不同工况计算结果
Table 2 Calculation results under different working conditions

工况	围岩渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	初衬应力/Pa	二衬应力/Pa
1	1×10^{-5}	3 911	1 700
2	1×10^{-6}	4 117	1 516
3	1×10^{-7}	4 194	1 450
4	1×10^{-8}	4 209	1 411
5	1×10^{-9}	4 229	1 402

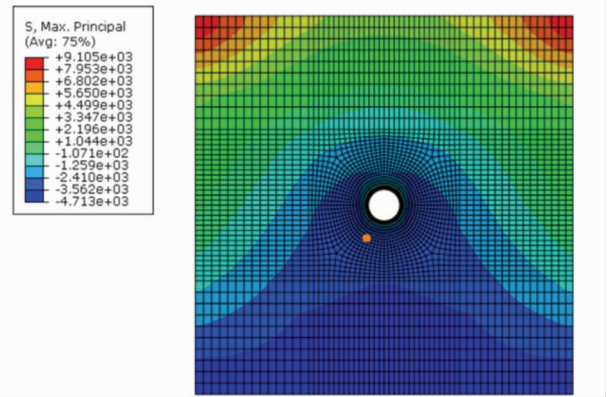


图 4 衬砌支护时应力云图
Fig 4 Stress nephogram of lining support

通过对计算结果的分析,图 8 反映了隧道在开挖过程中,隧道周围孔压的变化规律,渗透系数越小初衬应力越大,图 9 反映了在不同渗透系数下,隧道洞壁前后的孔压规律。从图 10 可得出,在不同渗透系数下,随着围岩渗透系数减小,初衬应力逐步增大,但是当 $K \geq 1 \times 10^{-8}$ 时,初衬应力增大趋势减缓;二衬随着围岩渗透系数减小,初衬应力逐步减小,当 $K \geq 1 \times 10^{-8}$ 时,初衬应力减小趋势减缓。从整个应力云图可得出,对于整个衬

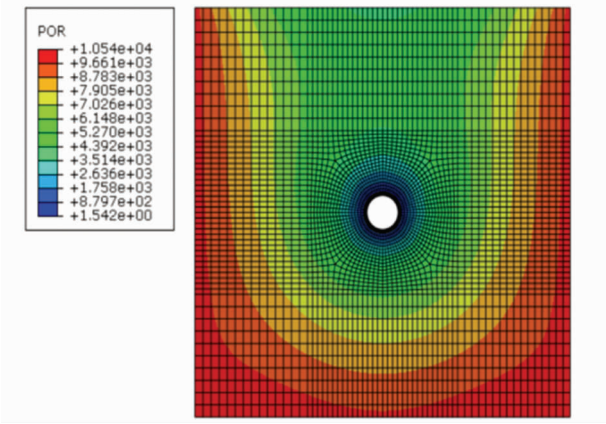


图 5 衬砌支护时孔压云图

Fig 5 Pore nephogram of lining support

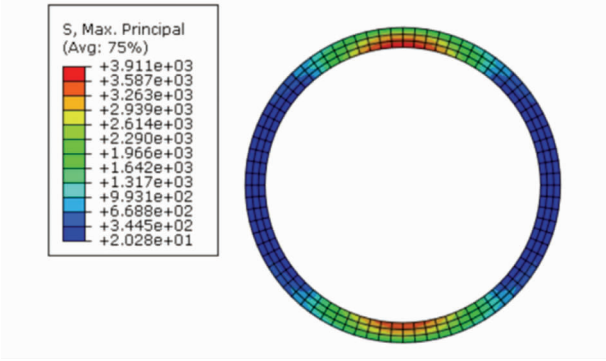


图 6 初衬应力云图

Fig 6 Initial lining stress nephogram

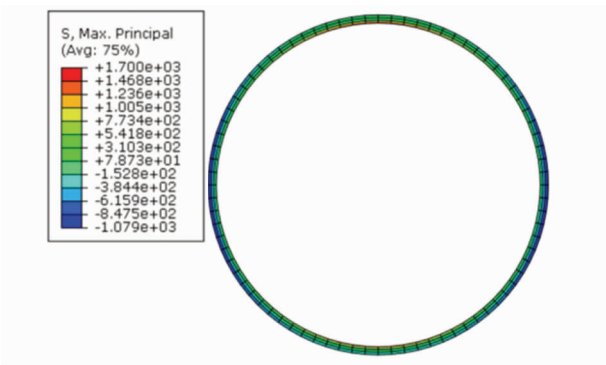


图 7 二衬应力云图

Fig 7 Secondary lining stress nephogram

砌支护结构,初衬起到主导支护作用,其应力可达到二衬的 3 倍,二衬主要起到协同初衬承载,主要作为安全储备^[17-18]。

3 结论

本位通过对盾构隧道理论分析、数值计算,得出初衬和二衬之间的承载特性和共同承载特性以及二者之间相互滑移特征,主要结论如下:

(1) 围岩渗透性对整个支护结构受力有较大

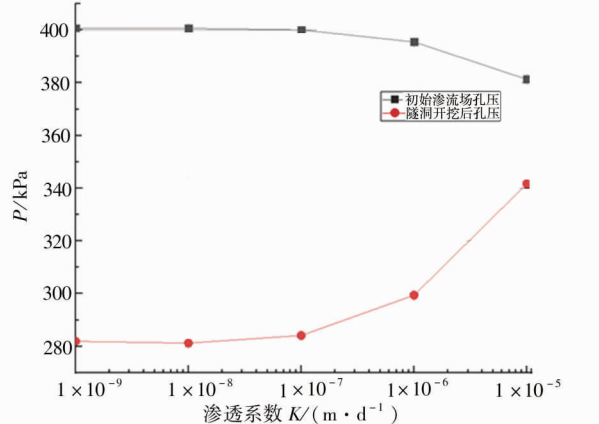


图 8 隧道开挖过程中孔压变化规律

Fig 8 Variation of pore pressure during tunnel excavation

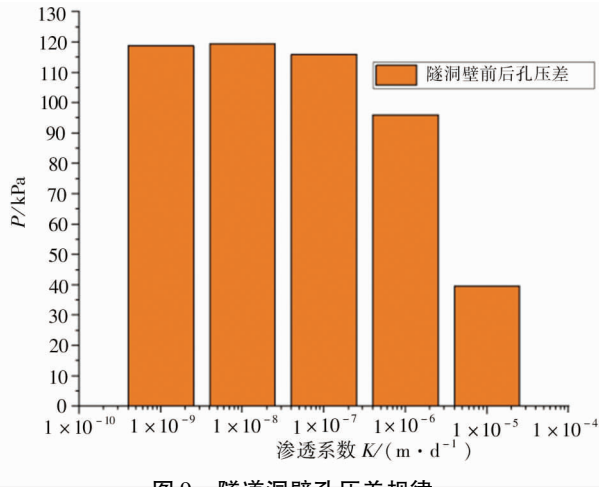


图 9 隧道洞壁孔压差规律

Fig 9 Law of pressure difference in tunnel wall

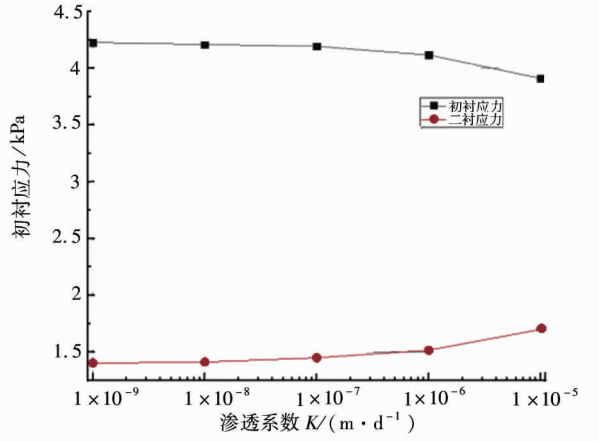


图 10 初衬、二衬在不同渗透系数下应力规律

Fig 10 Stress law of primary lining and secondary lining under different permeability coefficient

影响,在不同渗透系数下,随着围岩渗透系数减小初衬应力逐步增大,但是当 $K \geq 1 \times 10^{-8}$ 时,初衬应力增大趋势减缓;二衬随着围岩渗透系数减小初衬应力逐步减小,当 $K \geq 1 \times 10^{-8}$ 时,初衬应力

减小趋势减缓。

(2)对于整个衬砌支护结构而言,初衬起到主导支护作用,其应力可达到二衬的 3 倍,二衬主要起到协同初衬承载,主要作为安全储备。

参考文献:

[1] 崔学忠.城市轨道交通运营发展情况总结与展望[J].城市轨道交通,2020(10):24-26.

[2] 李敏,朱银邦,付云升,等.盾构输水隧洞双层复合衬砌的联合受力分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2014(1):109-112.

[3] 杨春山,魏立新,莫海鸿,等.盾构隧洞多层复合衬砌力学特性及其影响因素[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(10):1368-1374.

[4] 杨钊,潘晓明,余俊.盾构输水隧洞复合衬砌计算模型[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(5):1945-1952.

[5] 谢小玲,龚亚琦,苏海东,等.软弱围岩中的新型双层复合衬砌的受力特性研究及渗水风险分析[J].岩石力学与工程学报,2013(9):1791-1798.

[6] 张厚美,过迟,吕国梁.盾构压力隧洞双层衬砌的力学模型研究[J].水利学报,2001,32(004):28-33.

[7] 黄强兵,彭建兵,樊红卫,等.西安地裂缝对地铁隧道的危害及防治措施研究[J].岩土工程学报,2009(5):781-788.

[8] 李春良,王方彦,张立辉,等.复杂条件下的地铁盾构隧道的力学行为研究[J].铁道学报,2016,38(5):103-109.

[9] 苏宗贤,何川.盾构隧道纵向变形附加内力的壳 - 弹簧 - 接触模型数值分析[J].现代隧道技术,2015,52(6):70-76.

[10] 姚军,张志.盾构隧道双层衬砌横向结构力学性能分析[J].赤峰学院学报(自然科学版),2017,16(33):137-139.

[11] 罗泽军,张清照,何一韬,等.大直径盾构隧道双层衬砌管片结构计算[J].现代隧道技术,2018,55(5):85-93.

[12] 张洪锋.浅埋盾构隧道近接桩基础渗流应力耦合安全性分析[J].公路工程,2019,44(4):250-257.

[13] 吕从聪,李宗利,李东奇.ABAQUS 渗流应力耦合分析中渗透荷载施加问题探讨[J].长江科学院院报,2018,35(5):68-72.

[14] 贾善坡,杨建平,谭贤君,等.考虑渗流 - 应力耦合作用的层状盐岩界面裂缝扩展模型研究[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(1):254-261.

[15] 王克忠,唐雨蕾,李伟平,等.渗流 - 应力耦合下深埋引水隧洞变形稳定性分析[J].浙江工业大学学报,2016,44(2):207-211.

[16] 徐浩源,王明年,于丽.高填方双层衬砌式明洞土压力和结构内力特性研究[J].铁道学报,2019,41(2):146-153.

[17] 郭文琦,陈健,王士民,等.二衬厚度对盾构隧道双层衬砌纵向力学性能的影响[J].铁道标准设计,2020,64(2):142-148.

Analysis of Mechanical Properties of Tunnel Double-layer Lining
Based on Seepage-stress Coupling

ZHANG Zhi¹, YAO Jun²

(1. School of Municipal and Traffic Engineering, Anhui Water Conservancy Technical College, Hefei Anhui 231603, China;)
(2. School of Urban Construction and Transportation, Hefei University, Hefei Anhui 231601, China)

Abstract:The supporting structure of urban subway shield tunnel is mainly single-layer lining. In order to meet the requirements of bearing capacity, anti-seepage and cracking of supporting structure, the design of double-layer lining structure is becoming more and more mature. In order to reveal the mechanical characteristics of double-layer lining, the coupling equations of stress and seepage of underground soil are firstly derived by deriving the seepage-stress coupling equations. Secondly, based on the principle of seepage and stress coupling, Abaqus software was used to calculate and compare the bearing capacity characteristics of single-layer lining and double-layer lining under the conditions of surrounding rock pressure and tunnel depth. The following conclusions can be drawn:(1)Both primary lining and secondary lining bear loads under the support action, but the stress of primary lining is about 3 times of that of secondary lining, which is the main bearing structure. (2)When the permeability coefficient decreases, the stress of primary lining increases and the stress of secondary lining decreases. The main function of secondary lining is seepage prevention and safety reserve.

Keywords:double-layer lining; structural calculation; seepage-stress coupling; permeability coefficient; numerical calculation

(责任编辑:张英健)