

文章编号:1001-7372(2017)08-0125-09

# 腐蚀离子环境中盾构隧道衬砌结构侵蚀劣化机理

刘四进<sup>1</sup>, 何川<sup>1</sup>, 孙齐<sup>1</sup>, 封坤<sup>1</sup>, 陈小坚<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 厦门轨道交通集团有限公司, 福建 厦门 361002)

**摘要:**为揭示外水压与周围腐蚀离子环境长期耦合作用下盾构隧道衬砌结构侵蚀劣化机理,对压力渗透下管片混凝土多孔介质渗透深度与离子侵蚀运移进行理论解析,建立管片接头离子侵蚀对流-弥散运移数值模型,在一维渗流状态下验证了考虑压力渗透作用的腐蚀离子侵蚀理论的合理性,并建立可考虑压力渗透、离子对流-弥散运移以及管片接头非连续的盾构隧道衬砌结构离子侵蚀数值模型,重点分析了整环管片衬砌结构侵蚀劣化规律。结果表明:水压力的存在对海水渗透具有促进作用,外水压力越大,对海水渗透效果越显著;外水压力的增大将导致氯离子含量的增加,外水压力越大,同一位置累积到相同离子浓度所需的累积时间越短;管片接头处离子含量分布具有局部集中的特点,整环管片衬砌结构离子侵蚀大小关系为拱顶<拱腰<拱底;服役初期仅管片接头附近外排钢筋出现锈蚀,而后出现外排钢筋整体性锈蚀,体现出不均匀锈蚀的特点,且随着服役时间的延长,外排钢筋不均匀锈蚀差异减小。

**关键词:**盾构隧道;腐蚀离子;离子对流-弥散运移数值模型;压力渗透;侵蚀劣化

中图分类号:U457.5

文献标志码:A

## Erosion Degradation Mechanism of Shield Tunnel Lining Structure in Corrosive Ion Environment

LIU Si-jin<sup>1</sup>, HE Chuan<sup>1</sup>, SUN Qi<sup>1</sup>, FENG Kun<sup>1</sup>, CHEN Xiao-jian<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest

Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. Xiamen Rail Transit Group

Limited Corporation, Xiamen 361002, Fujian, China)

**Abstract:** In order to reveal the erosion degradation mechanism of shield tunnel lining structure under the long-term coupling effect of the external water pressure and the surrounding corrosive ion environment, the penetration depth of the porous concrete and the ion erosion migration of the concrete under the pressure permeation were analyzed theoretically. Whist the numerical model of the ion erosion convection-dispersion migration of the segment joint was established. Then, the rationality of the ion erosion theory considering the effect of pressure permeation was verified at the one-dimensional seepage state. Furthermore, the numerical model of ion erosion of shield tunnel lining structure in consideration of pressure permeation, ion convection-dispersion migration and the discontinuous segment joint was established. The focal point lied in the analysis

收稿日期:2017-03-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802201);中国工程院重点咨询项目(2015-XZ-28-02);国家自然科学基金项目(51578462);厦门市科技计划重大项目(3502Z20151006)

作者简介:刘四进(1988-),男,安徽安庆人,工学博士研究生,E-mail:ahlsj@126.com。

通讯作者:何川(1964-),男,重庆市人,长江学者特聘教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:chuanhe21@163.com。

on the erosion and deterioration of the whole segmental lining structure. The results show that the existence of water pressure has a positive effect on the seawater permeation. The higher the external water pressure is, the more obvious the effect of seawater penetration can be. The increase of external water pressure leads to the increase of chloride ion content. The higher the external water pressure is, the shorter accumulation time required for accumulating to the same ion concentration in the same position can be. The ion content distribution of the segment joint has the characteristic of local concentration. The ion erosion degree of the whole lining structure from small to large is vault, hance and the bottom of arch. At the beginning of the service, only steel bars in the vicinity of joints are corroded, and then the other parts of steel bars are almost unevenly corroded. With the extension of service time, the difference of the uneven corrosion decreases.

**Key words:** shield tunnel; corrosive ion; ion convection-dispersion migration numerical model; pressure permeation; erosion degradation

## 0 引言

盾构法隧道由于具有对周围环境影响小、地质条件适应性强、施工安全快速等优点,已成为越江、跨海水下隧道采用的施工方法之一<sup>[1]</sup>。复杂海域环境通常具有气温高、湿度大、海水含盐度高的特点,受海水、海风、盐雾、潮汐、干湿循环等众多因素影响,水下隧道结构的腐蚀环境严酷,耐久性突出问题。一般而言,对于普通混凝土结构的设计寿命要求为40~50年,地下工程结构及跨江越海工程要求设计寿命为100年,但在现实中,处于腐蚀环境中的混凝土结构远远达不到设计寿命要求,有的在15~20年就出现了钢筋锈蚀破坏,甚至不足5年就要开始修复。因此,针对侵蚀环境下盾构隧道结构腐蚀劣化机理和特征的研究正成为广大学者研究的重点和热点<sup>[2]</sup>。

孔祥兴等<sup>[3]</sup>针对衬砌劣化对水下盾构隧道的变形影响进行了分析,探讨了衬砌劣化引起隧道变形的特征规律;王振信<sup>[4]</sup>针对盾构隧道的耐久性问题,综述了混凝土衬砌的腐蚀机理并提出了相应防腐蚀措施;杨林德等<sup>[5]</sup>基于氯化物对混凝土的侵蚀和混凝土碳化规律的研究,对公路隧道衬砌结构的设计基准期改为100年后最小保护层厚度的确定方法提出了估算模式;孙富学<sup>[6]</sup>以厦门翔安海底隧道为工程背景,在衬砌结构服务寿命理论预测研究的基础上,通过室内试验对衬砌结构寿命进行预测;姜福香等<sup>[7]</sup>针对海底隧道衬砌混凝土的服役环境特点,开展了不同配合比的混凝土耐久性试验,提出了耐腐蚀高性能衬砌混凝土的配合比设计原则;曲立清等<sup>[8]</sup>在详细分析海底隧道结构混凝土的服役环境基

础上,综合考虑混凝土碳化、混凝土初始氯离子浓度影响等因素,建立了海底隧道混凝土在双重破坏因素作用下的寿命预测模型;雷明锋等<sup>[9]</sup>基于荷载作用下管片混凝土内部孔隙率的变化特征,提出荷载作用对氯离子扩散影响的理论分析模型,并根据Fick第一定律,推导得到荷载作用对氯离子扩散系数的影响方程;李忠等<sup>[10]</sup>在室内进行了盾构隧道管片构件的承载力、变形、延性及破坏特征试验测试,得出了氯离子侵蚀下隧道衬砌结构性能的退化规律。此外,中国现阶段正处于盾构隧道的高速发展阶段,在量大面广的已建、在建及规划盾构隧道工程中,处于城市富水环境、近海和海洋环境下的盾构隧道工程数量将持续增多,所占比例也有扩大趋势。对于海底隧道、越江隧道等水压较大状况下,服役隧道管片衬砌结构将处于压力渗流作用下,腐蚀离子运移过程主要发生压力渗流作用下的对流过程与浓度梯度下的扩散过程的组合,且随着水压的逐步增大,压力渗流作用下的对流现象将不断突显,离子扩散过程的总体影响将持续减弱。然而目前对于隧道腐蚀劣化的理论研究还处于初级阶段,有效的数值模拟也未见报道,因此对工程的借鉴意义仅停留在经验借鉴的层面上,难以从理论层面上揭示盾构隧道结构侵蚀劣化问题的本质。

鉴于此,本文对压力渗透下管片混凝土多孔介质渗透深度与离子侵蚀运移进行理论解析,以中国首条跨海地铁盾构隧道——厦门地铁二号线跨海段为例,建立可考虑压力渗透效应的管片接头离子侵蚀对流-弥散运移数值模型,验证一维渗流状态下考虑压力渗透作用的腐蚀离子侵蚀理论的合理性,并进一步建立可考虑压力渗透、离子对流-弥散运移以

及管片接头非连续问题的盾构隧道管片衬砌结构离子侵蚀数值模型,重点分析管片接头附近离子含量变化规律,以及管片衬砌外排钢筋离子含量分布规律。

### 1 混凝土中多孔介质溶质运移机理

腐蚀离子对管片混凝土的侵蚀,本质上为腐蚀离子在多孔介质中的渗透侵蚀。混凝土多孔介质中,孔隙水作为腐蚀离子运移扩散的载体,将周围环境的腐蚀离子带到混凝土表面及一定深度处,加速了腐蚀离子的侵蚀速度,使得隧道结构出现腐蚀劣化现象。目前理论研究中混凝土中腐蚀离子运移机理主要包括对流作用、扩散作用及机械弥散作用<sup>[11-12]</sup>,其中对流作用表征腐蚀溶质随载体溶液的流动,扩散作用表征浓度梯度导致的腐蚀离子不规则运动,机械弥散则表征多孔介质孔隙与固体骨架导致的流体微观流速分异现象。

在不考虑离子吸附、物理化学反应成分迁移、离子交换过程以及其他迟滞溶质迁移作用的影响条件下,对流、扩散及机械弥散是控制腐蚀离子运移的主要控制因素,一维渗流状态下腐蚀离子运移总通量  $J$  可表示为

$$J = nuC - nD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

式中: $n$  为孔隙率; $u$  为多孔介质混凝土内部渗流速度; $C$  为单位体积溶液中所含溶质的质量; $D$  为弥散系数,表征离子扩散与机械弥散的共同作用效果。

根据质量守恒定律,当  $n$  为常数时,混凝土中溶质运移的对流-弥散方程可表达为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (uC) \quad (2)$$

对于地面房建结构、干湿交替环境内结构(如浪溅区、海岸区)、浅水区结构(水深小于 5 m)等工程结构,进行离子侵蚀分析预测时,多假定其处于无水压(暴露环境)或低水压饱和环境中,离子对流项  $nuC$  或  $-\partial(uC)/\partial x$  常忽略不计,即常采用基于扩散机理的 Fick 第一、第二定律进行分析。

### 2 压力渗透下多孔介质离子侵蚀理论

海底盾构隧道大多处于大埋深、高水压环境中,隧道衬砌混凝土受到围岩压力、水压力等外界压力以及各种侵蚀性腐蚀离子的共同作用。式(1)、(2)多用于分析忽略压力水头影响的离子迁移过程,忽略离子侵蚀对流作用的影响,这种简化对无水头压

力或者压力水头较小的情况是合理的,但对于海域复杂环境下深海隧道等结构<sup>[13-16]</sup>,海水渗透深度随隧道外部水压和服役时间的不同,处于不断变化的演进过程中,如忽略高压对水分渗流、离子侵蚀的促进作用,将过高估计结构的使用寿命,不利于结构的安全储备。

#### 2.1 孔隙水在压力作用下的渗透

由 Darcy 线性渗流定律,若只研究  $x$  方向的流动,则非饱和混凝土中水分流速为

$$u = -\frac{K}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (3)$$

式中: $K$  为混凝土渗透率; $\mu$  为流体动力黏度; $p$  为压力。

图 1 为衬砌混凝土中水压力的变化曲线,选取图 1 中管片混凝土内部相距为  $dx$  的 2 个截面,则通过 2 个截面的流量差为

$$\Delta Q = Q_I - Q_{II} = u(x)A dt = \frac{\partial u}{\partial x} dx A dt \quad (4)$$

式中: $Q_I$  为通过截面 I 的流入量; $Q_{II}$  为通过截面 II 的流入量; $\Delta Q$  为截面 I 和截面 II 之间的剩余流量; $A$  为混凝土截面积; $t$  为时间。

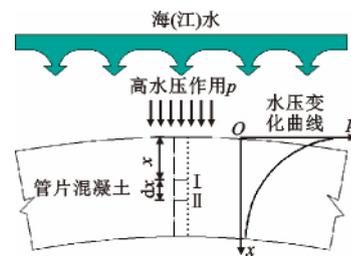


图 1 衬砌混凝土中水压力变化曲线  
Fig. 1 Variation Curves of Water Pressure in Lining Concrete

体积弹性模量  $K_v$  为

$$K_v = -\frac{dp}{dV/V} = -\frac{dp}{\Delta Q} A dx \quad (5)$$

由式(5)可推出

$$dp = -\frac{\partial u}{\partial x} K_v dt \quad (6)$$

由式(3)和式(6)可推得

$$dp = \frac{KK_v}{\mu} dt \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial p}{\partial t} dt \quad (7)$$

从而可推出

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{KK_v}{\mu} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (8)$$

再由初始条件  $p(x, 0) = 0$ , 边界条件  $p(0, t) = p_0, p(\infty, t) = 0$  可解得

$$p(x, t) = p_0 \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\frac{\mu}{KK_v t}}} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{p_0}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{ux^2}{4KK_v t}} \sqrt{\frac{\mu}{KK_v t}} \quad (10)$$

式中： $p_0$  为混凝土与水体接触面上所受到的水压力； $\text{erfc}(\cdot)$  为互补误差函数。

将式(10)代入式(3)，得到考虑压力水头  $p$  影响的非饱和混凝土中水分流速为

$$u_p(x,t) = \frac{Kp_0}{\mu\sqrt{\pi}} e^{-\frac{ux^2}{4KK_v t}} \sqrt{\frac{\mu}{KK_v t}} \quad (11)$$

渗透深度  $H$  为流速与时间的乘积，可得非饱和混凝土中水分渗透最大深度为

$$H = \int_0^t \bar{u}(t) dt = \frac{Kp_0 t}{\mu L} \text{erfc}\left(\frac{L}{2\sqrt{KK_v t}}\right) \quad (12)$$

式中： $L$  为混凝土厚度。

### 2.2 腐蚀离子在压力作用下的运移

服役期内，盾构隧道衬砌结构长期处于水土荷载环境，且绝大多数隧道处于富水环境下，周围环境中微生物、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等腐蚀性离子来源广泛，对隧道衬砌结构危害很大。

对于设计使用周期长达 100 年或 120 年的盾构隧道工程而言，载体溶液(地下水、海水等)将随着服役时间的延长，在结构混凝土材料中渗透深度将不断增大，管片混凝土内湿润-干燥边界不断迁移，在隧道结构全寿命周期内处于缓慢渗流状态，对流作用、扩散作用成为腐蚀离子在多孔介质混凝土材料中运移的主要促进作用<sup>[16-17]</sup>。

结合式(1)并考虑压力渗透的影响，此时离子压力渗透通量  $J_c$  表示为

$$J_c = nu_p(x,t)C = \frac{nKp_0}{\mu\sqrt{\pi}} e^{-\frac{ux^2}{4KK_v t}} \sqrt{\frac{\mu}{KK_v t}} C \quad (13)$$

在假设材料具有可渗透性且为各向均质，扩散物和材料之间无化学反应或物理固结，材料扩散特性、材料渗透特性不随时间和扩散物浓度而改变的基础上，结合式(11)及式(2)，可得到考虑压力渗透影响的腐蚀离子迁移的对流-弥散方程如下

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Kp_0}{\mu\sqrt{\pi}} e^{-\frac{ux^2}{4KK_v t}} \sqrt{\frac{\mu}{KK_v t}} C \right) \quad (14)$$

根据 Ogata 等<sup>[18]</sup> 的解析结果，考虑压力渗透影响条件下腐蚀离子浓度变化关系可表达为

$$\left. \begin{aligned} C(x,t) &= \frac{C_s}{2} \left[ \text{erfc}\left(\frac{x-ut}{2\sqrt{Dt}}\right) + \exp\left(\frac{ux}{D}\right) \text{erfc}\left(\frac{x+ut}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \\ u &= u_p(x,t) = \frac{Kp_0}{\mu\sqrt{\pi}} e^{-\frac{ux^2}{4KK_v t}} \sqrt{\frac{\mu}{KK_v t}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中：在不考虑机械弥散时， $D$  为腐蚀离子在混凝土中的扩散系数； $C_s$  为混凝土与海水接触面处的氯离子含量，一般以离子占水泥或混凝土质量的百分比表示。

### 3 一维渗流状态下离子侵蚀数值模型的建立及验证

以中国首条跨海地铁盾构隧道——厦门地铁二号线跨海段为例，根据上述压力渗透与离子侵蚀运移理论，结合 Geostudio 软件渗流与离子运移模块，建立可考虑压力渗透效应的管片接头离子侵蚀对流-弥散运移数值模型，并选取远离管片接头接缝面的监测点，对比分析一维渗流与运移条件下数值解与理论解析结果的一致性。具体管片接头原型尺寸参数为：内径 6 000 mm，外径 6 700 mm，管片厚度 350 mm，混凝土强度等级为 C55，混凝土抗渗等级为 P12，单道防水管片接头型式见图 2。

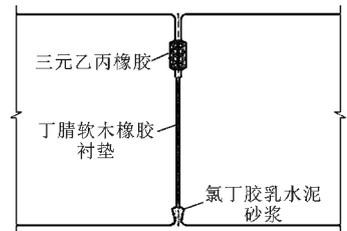


图 2 单道防水管片接头示意  
Fig. 2 Schematic of Single channel Waterproof Segment Joint

隧道衬砌混凝土中的渗流是个随时间变化的动水边界问题，由于水体是腐蚀离子运移的载体，腐蚀离子介质的侵蚀演化也呈现出相应的时间-空间演变规律。本文采用 Geostudio SEEP/W 建立了管片接头瞬态渗流模型，得出隧道 100 年服役期内的渗流场，得出设计周期 100 年内不同时刻、不同位置的孔隙水压力、渗流速度以及渗流场的渐进演变规律。然后以此为基础，采用耦合分析方法，进行对流-弥散模块与离子运移模块的溶质侵蚀运移计算，分析设计寿命 100 年内腐蚀离子浓度在隧道衬砌结构中随空间、时间的分布和变化。计算模型宽 950 mm，高 350 mm，如图 3 所示，计算分析关键参数见表 1。

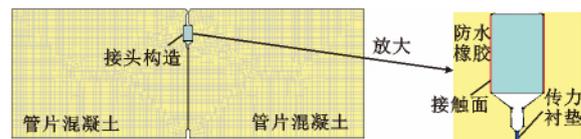


图 3 计算模型  
Fig. 3 Calculation Model

#### 3.1 渗流场变化规律

采用数值计算得到不同水压下，服役 100 年过程中海水在管片衬砌中的最大渗透深度见图 4。

由图 4 可以看出：当管片外侧水压力一定时，随

表 1 模型计算参数

Tab. 1 Calculation Parameters of Model

参数	混凝土	橡胶	接触面
$k/(m \cdot d^{-1})$	$1.114\ 56 \times 10^{-6}$	0	0
$\omega$	0.001	2.2	
$\omega_R$	0.000 1	0.001	
$m_V/kPa$	$1.0 \times 10^{-6}$	0.001	
$\alpha_L$	0.04	0.04	0.04
$\alpha_T$	0.04	0.04	0.04
$D/(m^2 \cdot s^{-1})$	$4.8 \times 10^{-12}$	0	0

注: $k$ 为混凝土渗透系数,取值参照文献[19],[20]; $\omega$ 为体积含水率; $\omega_R$ 为残余体积含水率; $m_V$ 为体积压缩系数; $\alpha_L$ 为纵向弥散度; $\alpha_T$ 为横向弥散度。

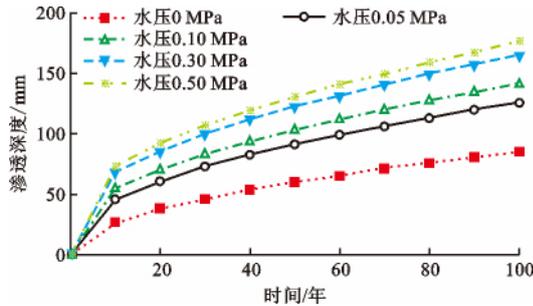


图 4 不同水压下海水渗透深度模拟值

Fig. 4 Simulation Values of Seawater Penetration Depth Under Different Water Pressure

随着隧道服役时间的延长,海水在管片内部的渗透深度不断变大,但海水的渗透速率(斜率)不断减小,即越靠近管片内表面,渗透越难,原因是外水压力在管片内部随着深度的增加而不断减小,海水渗透的促进作用减弱;当外水压力为 0 MPa 时,海水的渗透作用较弱,100 年时的渗透深度为 85 mm,其值是外水压力为 0.50 MPa 时海水渗透深度的 1/2,可见,水压的存在促进海水在管片内部的渗透,外水压越大,海水渗透速率越大,海水渗透效果越显著。

3.2 渗流场理论解与数值解对比

根据式(12)计算海水在混凝土管片内的渗透深度理论值。动力黏度  $\mu$  为  $1.139 \times 10^{-3}$  MPa · s,混凝土渗透率  $K$  为  $3.87 \times 10^{-9}$  mm<sup>2</sup>;C55 混凝土体积弹性模量  $K_V$  为 1.97 GPa。理论解析计算结果见图 5。

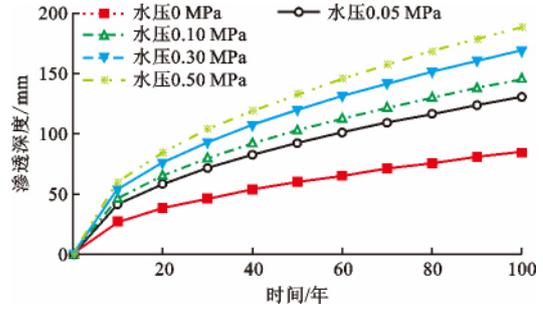


图 5 不同水压下海水渗透深度理论值

Fig. 5 Theoretical Values of Seawater Penetration Depth Under Different Water Pressure

对比图 5 与图 4 可以发现:一维渗流状态、不同水压条件下,海水在管片混凝土内部的渗透演变规律趋于一致,不同工况下量值也相当接近,如 0.50 MPa 外水压下,100 年时海水渗透深度理论解与数值解分别为 180,175 mm;理论解与数值解变化趋势一致,几乎重合,验证了考虑水压力作用的海水渗透理论的合理性,说明该理论能够很好地说明海底盾构隧道管片内部水分的渗透规律。

3.3 氯离子浓度变化规律

为避免管片接头接缝面附近双向离子侵蚀和局部渗流场突变的影响,选取远离管片接头接缝面的 6 个监测点(图 6),研究管片混凝土内氯离子含量变化、对比数值模拟结果与理论解析的差异。以管片外表面氯离子含量(质量分数,后文同)0.6%为例,得到不同压力水作用下的氯离子含量分布,见图 7。

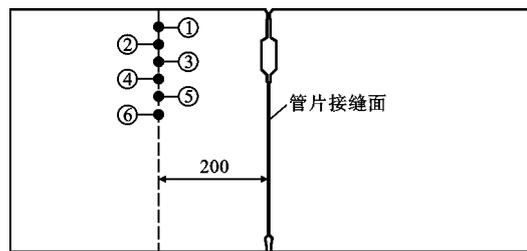


图 6 管片接头区域监测点示意图(单位:mm)

Fig. 6 Sketch of Regional Monitoring Points of Segment Joints (Unit: mm)

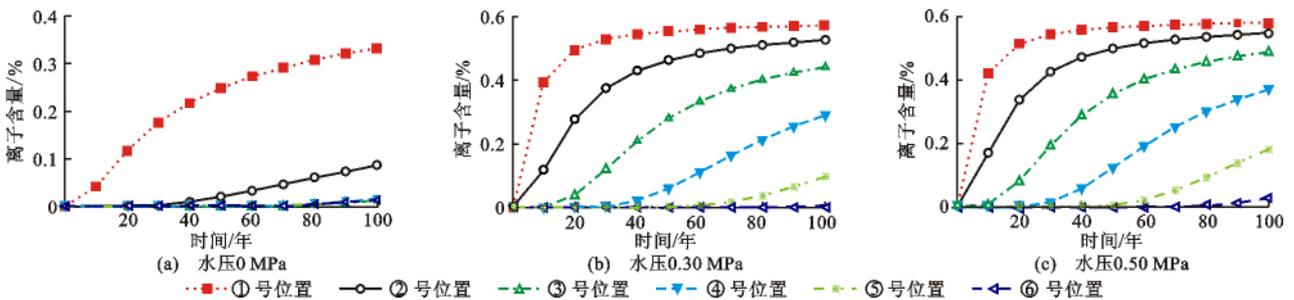


图 7 氯离子含量分布

Fig. 7 Distributions of Chloride Ion Content

由图7看出:同一位置氯离子含量随着隧道服役时间的延长而不断变大,但达到的最大氯离子含量值不同。当管片外水压力一定时,距离管片外表面越近,氯离子含量越大;当管片外水压力变化时,同一位置的氯离子含量不同,如当管片外水压力为0,0.30,0.50 MPa时,⑤号位置氯离子含量分别为 $7.252 \times 10^{-11}$ 、0.098 23%、0.182 64%,可见,外水压力的增大将导致氯离子含量的增加,且氯离子含量增加的幅度与外水压力增加幅度呈正相关;管片外水压力不同时,管片内部同一位置累积到相同氯

离子浓度所需的时间不同,如外水压力为0,0.30,0.50 MPa时,②号位置达到氯离子浓度0.3%的时间分别为大于100年、5年和15年,外水压力越大,累积时间越短,离子越容易在管片内部运移,外水压力的存在加速了氯离子在管片内部的运移,促进了氯离子对管片的侵蚀作用。

### 3.4 离子运移理论解与数值解对比

根据式(15)计算不同水压力作用下管片混凝土内氯离子含量理论值,计算结果见图8。

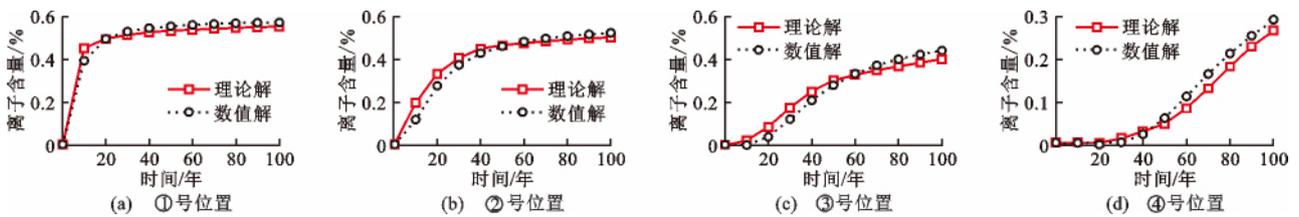


图8 0.30 MPa外水压下氯离子含量理论值与模拟值对比

Fig. 8 Comparison of Theoretical and Simulated Values of Chloride Ion Content Under 0.30 MPa Water Pressure

通过不同位置氯离子含量理论解与数值解的对比可以发现:一维渗流侵蚀的不同水压力作用下,因数值网格、横纵向离散性等,导致各个监测位置处氯离子含量的理论值与数值解存在局部微小差异,但两者整体变化趋势基本吻合。其结果验证了一维渗流状态下考虑压力渗透作用的氯离子侵蚀理论的合理性。

对于大量存在管片接头非连续面的盾构隧道而言,数值模型较理论解析可实行性高,具有可模拟管片接头局部横、纵向不均匀性,模拟管片渗漏水等突出优点。鉴于此,本节以整环管片衬砌结构为分析对象,建立可考虑压力渗透、离子对流-弥散运移以及管片接头非连续问题的盾构隧道管片衬砌结构离子侵蚀数值模型,分析100年服役期内整环管片衬砌结构侵蚀劣化规律。整环管片衬砌结构数值分析模型如图9所示。

## 4 整环管片衬砌结构侵蚀劣化规律

由于数值模型可适用于双向渗漏和离子运移,

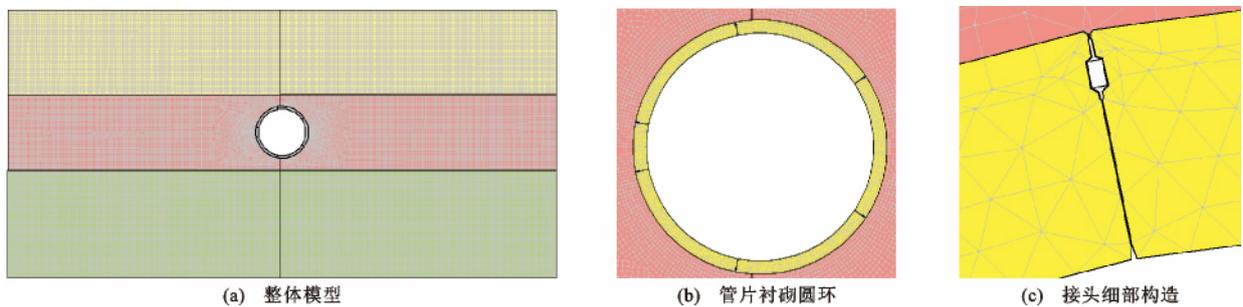


图9 整环衬砌结构侵蚀分析模型

Fig. 9 Erosion Analysis Model of Whole Segmental Lining Structure

选取3个代表性断面对整环管片衬砌结构侵蚀劣化进行分析,其压力水头高度及富土厚度分别为断面1(33.19,12.5 m)、断面2(25.38,11.45 m)及断面3(20.0,12.4 m),管片接头及测点位置如图10所示。

防水处于完好状态下的盾构隧道整环管片衬砌结构进行分析,重点分析管片接头附近离子含量变化规律,以及管片衬砌外排钢筋离子含量分布规律。以断面1为例,得到隧道不同服役期内整环衬砌结构的离子含量分布云图(图11)。图11中,管片外侧红色区域表示氯离子侵蚀较为严重、离子含量高。对比服役30年与90年的整环管片离子含量可知:

### 4.1 管片混凝土离子含量分布规律

选取隧道外侧氯离子含量为0.6%,管片接头

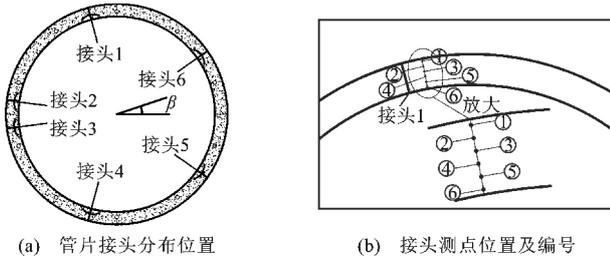


图 10 管片接头及测点位置

Fig. 10 Segment Joints and Measuring Points

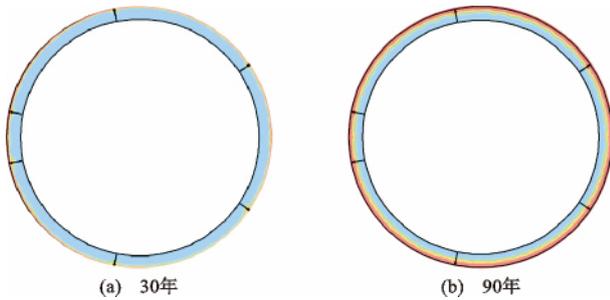


图 11 整环管片离子含量分布云图

Fig. 11 Ion Content Distribution Cloud Charts of Whole Segmental Lining

服役时间越长,离子侵蚀范围及侵蚀程度越大;随着与隧道外表面距离的增大、离子含量逐步减小,越靠

近管片混凝土外表面、离子含量越大;管片接头处离子含量分布同样具有局部集中的特点,表现出一定的不均匀分布特征。通过各监测点的测量,得到管片接头不同位置处的离子含量竖向不均匀分布曲线,如图 12 所示。

以断面 1 为例,分析发现管片接头 1、接头 3、接头 4 分别处于整体管片衬砌的拱顶、拱腰、拱底,服役期内接头位置所受水压大小关系为  $P_{w-1} < P_{w-3} < P_{w-4}$ ,导致各位置处管片接头的侵蚀离子含量  $C_{S-1} < C_{S-3} < C_{S-4}$ ,如服役 100 年后,管片接头局部 4 号位置处,管片接头 1、接头 3、接头 4 的离子含量分别为 0.31%、0.45%、0.52% ( $P_{w-1}$ ,  $C_{S-1}$  分别表示接头 1 的水压和离子含量)。可见,水压越大、离子侵蚀越严重,整环管片衬砌离子侵蚀严重程度大小关系与对应位置承受水压正相关。对于整环管片衬砌而言,相比隧道顶部,隧道下部结构承受水压较大,离子侵蚀严重程度满足从大到小依次为拱底、拱腰、拱顶的特点。同样,对比断面 2、断面 3 可以发现,整环隧道断面侵蚀严重程度与隧道断面所处水压大小紧密相关,氯离子含量满足从大到小依次为断面 1、断面 2、断面 3 的关系。

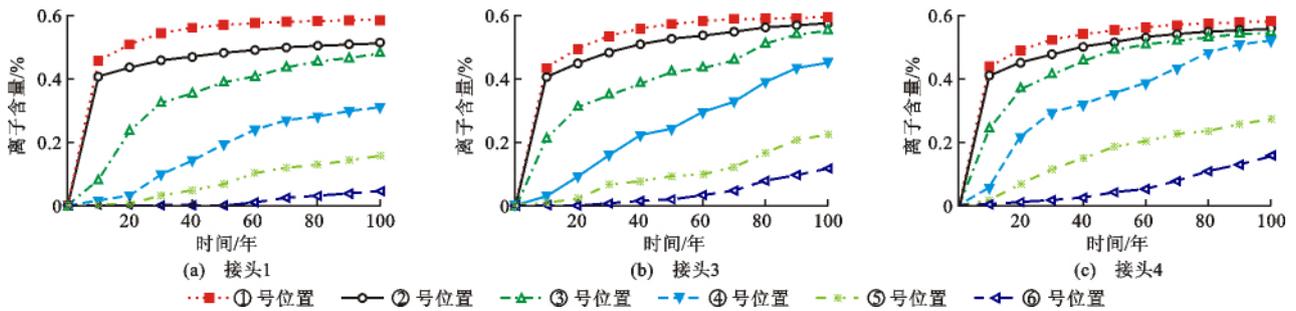


图 12 管片接头不同位置处离子含量竖向不均匀分布曲线

Fig. 12 Vertical Distribution Curves of Ion Content in Different Positions of Segment Joints

#### 4.2 管片衬砌外排钢筋离子含量分布规律

为研究离子侵蚀对管片内部钢筋锈蚀的影响,选取管片外排钢筋轴向不同监测点离子含量结果,得出不同时间点的整环衬砌外排钢筋离子含量分布如图 13 所示。判定钢筋锈蚀状态以钢筋表面处离子浓度达到 0.4% 为依据,图 13 中以此为界,标出管片钢筋锈蚀临界分界线。

由图 13 可知,整环管片整体体现出不均匀锈蚀的特点,服役初期仅靠近管片接头位置处的外排钢筋出现锈蚀,如图 13(a) 所示管片接头局部点均发生锈蚀;但随着隧道服役时间的延长,外排钢筋呈现出整体性锈蚀的特点,且靠近接头位置的外排钢筋

腐蚀较为严重。服役初期外排钢筋表面氯离子含量增长显著,如断面 1 服役 30 年相比服役 10 年时,离子含量增幅约为 0.15%,而服役 50 年相比服役 30 年时的增幅仅为 0.05%;但随着服役时间的延长,整环管片外排钢筋表面离子含量增幅逐渐减小,外排钢筋不均匀锈蚀差异减小,锈蚀程度趋于一致。

对比不同断面外排钢筋离子含量分布也可以发现,服役初期外排钢筋处离子含量差异明显,同样表现出断面 1 离子含量、断面 2 离子含量、断面 3 离子含量依次减小的关系,但随着服役时间的延长,不同断面的外排钢筋表面离子含量分布、钢筋锈蚀差异性逐渐减小。

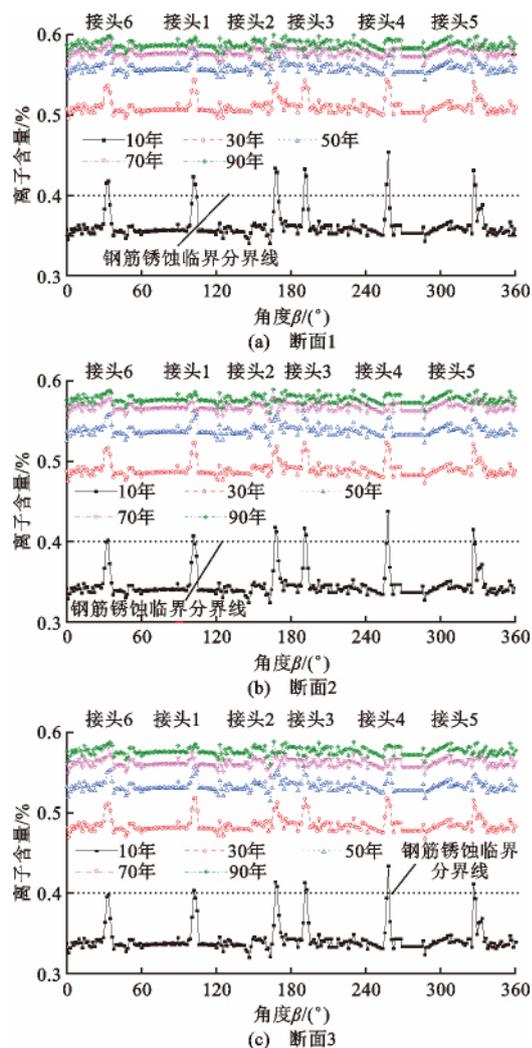


图 13 不同断面外排钢筋所在位置处离子含量随时间变化曲线

Fig. 13 Curves of Ion Content at the Location of Steel Bars in Different Sections with Time

## 5 结 语

(1)对压力渗透下管片混凝土多孔介质渗透深度与离子侵蚀运移进行理论解析,建立了可考虑压力渗透效应的离子侵蚀对流-弥散运移数值模型,揭示了压力渗透与腐蚀离子环境共同作用下的盾构隧道衬砌结构侵蚀劣化机理。

(2)验证了一维渗流状态下考虑水压作用的海水渗透及离子侵蚀理论的合理性。随着隧道服役时间的延长,管片内部海水渗透深度不断变大、渗透速率不断减小;外水压增大将导致氯离子含量增加,且离子含量增加的幅度与外水压的增加幅度呈正相关;管片外侧水压越大,同一位置累积到相同离子浓度所需累积时间越短。外水压的存在加速了氯离子运移,促进了氯离子对管片的侵蚀作用。

(3)建立了盾构隧道管片衬砌结构离子侵蚀数值模型,结果表明整环管片衬砌离子侵蚀严重程度大小关系与对应位置承受水压正相关,水压越大、离子侵蚀越严重,离子侵蚀严重程度大小关系满足拱顶<拱腰<拱底、断面1>断面2>断面3;整环管片整体体现出不均匀锈蚀的特点,但随着服役时间的延长,整环管片外排钢筋表面离子含量增幅逐渐减小,不均匀锈蚀差异减小、锈蚀程度趋于一致。对比不同断面外排钢筋离子含量分布可以发现,服役初期表现出断面1>断面2>断面3的关系,但随着服役时间的延长,不同断面的外排钢筋表面离子含量分布、钢筋锈蚀差异性逐渐减小。

(4)文中鉴于海底隧道长期处于高水压压力渗透作用的特点,基于海水渗透侵蚀的渐进演变过程,从理论解析和数值分析方面开展部分研究工作。然而在管片结构主体材料关键参数指标的选取、腐蚀离子压力渗透侵蚀室内试验系统研发等方面还需深入研究,在通过大量的理论完善、试验论证后,研究成果可用于江底隧道、海底隧道等重大工程的寿命预测、性能评价及可预测性维护等方面。

## 参考文献:

### References:

- [1] 何川,封坤.大型水下盾构隧道结构研究现状与展望[J].西南交通大学学报,2011,46(1):1-11.  
HE Chuan, FENG Kun. Review and Prospect of Structure Research of Underwater Shield Tunnel with Large Cross-section[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 1-11.
- [2] HIRONAGA M, NAGURA K, ENDO T, et al. The Establishment of a Method for Evaluating the Long-term Water-tightness Durability of Underground Concrete Structures Taking into Account of Some Deterioration[C]//JSCE. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers 1994. Tokyo:JSCE, 1994:63-72.
- [3] 孔祥兴,夏才初,仇玉良,等.衬砌劣化对水下盾构隧道变形的影响分析[J].公路工程,2012,37(1):26-31.  
KONG Xiang-xing, XIA Cai-chu, QIU Yu-liang, et al. Effect of Lining Degradation on Deformation Behavior of Underwater Shield Tunnel[J]. Highway Engineering, 2012, 37(1): 26-31.
- [4] 王振信.盾构法隧道的耐久性[J].地下工程与隧道,2002(2):2-5.  
WANG Zhen-xin. Durability of Shield Tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnel, 2002(2): 2-5.
- [5] 杨林德,伍振志,时蓓玲,等.开裂及接缝渗漏条件下

- 越江盾构隧道管片混凝土氯离子运移规律研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1826-1831.
- YANG Lin-de, WU Zhen-zhi, SHI Bei-ling, et al. Chloride Migration in Segment Concrete of River-crossing Shield Tunnels with Cracks and Joint Leakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1826-1831.
- [6] 孙富学. 海底隧道衬砌结构寿命预测理论与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- SUN Fu-xue. Theoretical and Experimental Studies on Predicting the Service Life of Subsea Tunnel Lining Structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [7] 姜福香, 赵铁军, 苏 卿, 等. 海底隧道衬砌混凝土耐久性研究[J]. 混凝土, 2007(12): 19-22.
- JIANG Fu-xiang, ZHAO Tie-jun, SU Qing, et al. Study on the Durability of Lining Concrete of Subsea Tunnel[J]. Concrete, 2007(12): 19-22.
- [8] 曲立清, 金祖权, 赵铁军, 等. 海底隧道钢筋混凝土基于氯盐腐蚀的耐久性参数设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2333-2340.
- QU Li-qing, JIN Zu-quan, ZHAO Tie-jun, et al. Study on the Durability Parameter Design of Subsea Tunnel Reinforced Concrete Based on Chloride Corrosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2333-2340.
- [9] 雷明锋, 彭立敏, 施成华. 氯盐侵蚀环境和荷载耦合作用下盾构管片耐久性评价与寿命预计[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(8): 3092-3099.
- LEI Ming-feng, PENG Li-min, SHI Cheng-hua. Durability Evaluation and Life Prediction of Shield Segment Under Coupling Effect of Chloride Salt Environment and Load[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(8): 3092-3099.
- [10] 李 忠, 陈海明, 孙富学, 等. 氯离子侵蚀盾构隧道衬砌结构性能退化试验[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1092-1109.
- LI Zhong, CHEN Hai-ming, SUN Fu-xue, et al. Tests on Structure Behavior's of Shield Tunnel Lining in Chloride Erosion[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6): 1092-1109.
- [11] 饶宝文. 重金属在尾矿库岩土渗流场中的迁移模拟及污染防治研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- RAO Bao-wen. The Research of Heavy Metals Migration Simulation Under the Tailing Geotechnical Seepage and Pollution Control [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [12] 徐田欣. 滨海盐雾区非饱和混凝土中氯离子渗透机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- XU Tian-xin. The Mechanism of Chloride Penetration in Unsaturated Concrete at Coastal Atmosphere Zone [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [13] 方永浩, 李志清, 张亦涛. 持续压荷载作用下混凝土的渗透性[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(10): 1281-1286.
- FANG Yong-hao, LI Zhi-qing, ZHANG Yi-tao. Permeability of Concrete Under Sustained Compressive Load[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(10): 1281-1286.
- [14] 赵 川. 混凝土中临界氯离子浓度压力渗透法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- ZHAO Chuan. Experimental Research on Chloride Threshold Level Using Seepage Pressure Method [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [15] 张 鹏, 赵彦迪, 赵铁军, 等. 静水压下混凝土水分与氯离子渗透及其相关性研究[J]. 水利学报, 2014, 45(9): 1127-1133.
- ZHANG Peng, ZHAO Yan-di, ZHAO Tie-jun, et al. Research on Water and Chloride Penetration into Concrete Under Static Water Pressure and Their Correlation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(9): 1127-1133.
- [16] 李晓珍, 张苑竹, 周振琼. 海底隧道非饱和混凝土中水分渗透研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(增): 944-948.
- LI Xiao-zhen, ZHANG Yuan-zhu, ZHOU Zhen-qiong. Study on the Water Permeability in Non-saturated Concrete of Subsea Tunnel[J]. Industrial Buildings, 2014, 44(S): 944-948.
- [17] 张丽珺. 高水压隧道衬砌混凝土损伤特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- ZHANG Li-jun. Study on the Features of Concrete Structure of Tunnel Lining Under High Hydraulic Pressure[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [18] OGATA A, BANKS R B. A Solution of the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media[M]. Washington DC: US Government Printing Office, 1961.
- [19] 李晓珍, 张苑竹. 海底隧道非饱和混凝土中氯离子渗透研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(8): 1929-1934.
- LI Xiao-zhen, ZHANG Yuan-zhu. Study on the Chloride Permeability in Non-saturated Concrete of Subsea Tunnel[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(8): 1929-1934.
- [20] 戴镇潮. 混凝土的抗渗性和抗渗要求[J]. 商品混凝土, 2010(1): 18-22.
- DAI Zhen-chao. Concrete Impermeability and Impermeability Requirements [J]. Ready-mixed Concrete, 2010(1): 18-22.