

# 侵蚀环境中浅埋隧道管片衬砌的承载性状

王敏涛, 岳 健

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年1月9日; 录用日期: 2026年2月1日; 发布日期: 2026年2月13日

## 摘 要

本文针对侵蚀环境中盾构隧道管片衬砌的承载性状展开研究, 基于数值模拟, 系统探讨了管片被侵蚀之前、管片表层的承载能力丧失后、管片表层出现洞穴后、江水能够顺畅地侵入至管片表层四个不同阶段下对衬砌环整体及局部受力性状的影响规律。研究结果表明: 位于衬砌环顶部的管片侵蚀会引发结构非对称变形, 导致拱顶与拱底沉降持续增大, 且水平位移在环向特定区间内发生定向偏移; 在江水侵入管片表层后, 水平最大错动位移发生位置改变, 且位移量增大约50%; 侵蚀洞穴导致洞穴位置靠近围岩一侧出现明显的拉应力集中, 而围岩压力集中位置则表现为压应力翻倍; 靠近围岩一侧以弯曲拉应力主导, 导致该处在洞穴中心的最小主压应力低于围岩压力集中处; 靠近净空一侧则因弯曲压应力较强, 呈现相反规律。基于上述结果, 本文提出建议: 在运营维护中应实施差异化监测, 重点关注被侵蚀管片、接缝及应力集中区域; 对异常部位采取局部加固, 并加强管片间连接螺栓的防腐检测与防护。本研究结果可为类似侵蚀环境下盾构隧道的状态评估、运营维护提供理论参考。

## 关键词

侵蚀环境, 浅埋盾构隧道, 围岩压力集中, 荷载结构法

# Bearing Behavior of Segmental Lining of Shallow-Buried Tunnel in Erosive Environment

Mintao Wang, Jian Yue

College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: January 9, 2026; accepted: February 1, 2026; published: February 13, 2026

## Abstract

This study investigates the bearing behavior of shield tunnel segment lining in erosive environments.

文章引用: 王敏涛, 岳健. 侵蚀环境中浅埋隧道管片衬砌的承载性状[J]. 土木工程, 2026, 15(2): 103-114.  
DOI: 10.12677/hjce.2026.152030

Based on numerical simulations, a systematic investigation was conducted on the influence patterns of four distinct stages—namely, before segment erosion, after the loss of bearing capacity at the segment surface, after cavity formation on the segment surface, and after river water freely penetrates to the segment surface—on both the overall and local mechanical behavior of the lining ring. The results indicate that erosion at the crown of the lining ring induces asymmetric structural deformation, leading to continuous increases in crown and invert settlement, along with directional shifts of horizontal displacement within specific circumferential intervals. After river water intrudes into the segment surface, the location of the maximum horizontal dislocation displacement changes, with its magnitude increasing by approximately 50%. Erosion-induced cavities cause significant tensile stress concentration on the surrounding rock side near the cavity, while the pressure concentration zone in the surrounding rock exhibits a doubling of compressive stress. On the surrounding rock side, bending-induced tensile stress dominates, resulting in a minimum principal compressive stress at the cavity center that is lower than that at the surrounding rock pressure concentration zone. Conversely, on the clearance side, stronger bending-induced compressive stress leads to the opposite trend. Based on the findings, this paper proposes that differentiated monitoring strategies should be implemented during operation and maintenance, with particular attention to eroded segments, joints, and stress concentration zones. Local reinforcement should be applied to abnormal areas, and anticorrosion inspection and protection of connecting bolts between segments should be enhanced. The results of this study can provide theoretical references for condition assessment, operation, and maintenance of shield tunnels in similar erosive environments.

## Keywords

Erosive Environment, Shallow-Buried Shield Tunnel, Surrounding Rock Pressure Concentration, Load-Structure Method

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

隧道的运营与维护工程的安全有直接联系, 水下隧道在服役期间会受到各种与水相关的影响, 衬砌管片在水侵蚀之后不仅会造成管片混凝土承载能力降低、连接螺栓性能衰减, 更会导致衬砌背后围岩与管片接触不紧密, 打破结构初始应力平衡, 导致管片位移异常增大, 主应力分布特征发生明显改变, 严重时可引发管片开裂、渗漏等病害[1][2], 为运营带来很大的安全隐患, 也大大增加了后期的维护成本。

近年来, 有关隧道衬砌在各种侵蚀环境中管片衬砌的受力研究引起了诸多学者的关注, 张恒[3]通过模型试验揭示了隧道的变形分布与开裂破坏规律, 何本国[4]提出了一种有效的为实现模型试验水压加载方法, Xiang [5]通过改进数值模型试验, 验证了在管片衬砌厚度变化的情况下的弯矩与轴力变化规律, 张成平[6]通过数值模拟与模型试验, 系统研究了围岩隧道衬砌背后双空洞对结构受力与安全性的影响, 揭示了空洞导致内力重分布的灾变机理, 李明[7]进一步通过大比例尺模型试验, 建立了衬砌背后空洞深度的量化健康判据, 揭示了承载力呈“S”形三阶段退化规律, 朱春生[8]通过数值模拟, 进一步揭示了空洞位置对病害分布的区域性影响, 彭跃[9]的数值分析结果明确了衬砌背后空洞尺寸与结构安全系数的负相关关系, 安永林[10]采用数值模拟分析表明, 超挖汇水形成的局部水压引发的偏压效应与应力集中, 在机理上与衬砌背后空洞的致害模式具有相似性, 尽管已经从多个角度对管片出现的各种受侵蚀情况提出多种解析方法, 但对管片被侵蚀后, 侵蚀阶段的演化以及各阶段下管片的位移与主应力分布的协同研究

较为匮乏，相关研究大多分析的是衬砌的轴力与弯矩，但这样不能反映受力沿厚度方向的变化情况，难以精准支撑运营期隧道衬砌受水侵蚀后结构的稳定性研究，基于这一点，本文分析沿衬砌厚度方向的应力变化。

本文将建立考虑管片被侵蚀之前、管片表层的承载能力丧失后、管片表层出现洞穴后、江水能够顺畅地侵入至管片表层后四种不同阶段的数值模型；然后，对比分析数值模拟结果，重点研究管片在不同侵蚀阶段下的衬砌应力、衬砌位移以及管片间错动位移的变化特性。

2. 工程项目概况

本文参考的衡阳合江套湘江隧道为一座典型的水下浅埋盾构隧道，在本文所研究的盾构区段，围岩强度为V级，主要为强风化粉砂质泥岩，多为碎块状，遇水易呈散粒状或砂土状。江底岩土覆盖层厚度约为16 m(即江底到管片拱顶的垂直距离)。采用圆形装配式钢筋混凝土管片衬砌，混凝土强度等级为C50，管片环的外径为11.3 m，内径为10.3 m，共分为九块管片，管片衬砌厚度0.5 m。

通过刘瑞康[11]推导的围岩压力的解析计算公式，可以计算出不同管片位置的围岩压力，在此，江水压力采用40 kPa，围岩与管片的参数见表1，计算该条件下的围岩压力，并利用荷载结构法，了解其应力场和位移场的分布情况，探讨在侵蚀环境中，浅埋隧道衬砌在管片被侵蚀时，不同侵蚀阶段对隧道承载性状的影响；最后提出相应的工程建议。

Table 1. Material calculation parameters  
表 1. 材料计算参数

材料	重度(kN/m³)	弹性模量(MPa)	泊松比	内摩擦角(°)	弹性抗力系数(MPa/m)	计算摩擦角(°)
围岩	20	500	0.4	20	150	40
管片	25	34500	0.2			

3. 数值模型建立

3.1. 基本参数确定

“平面应变”模型管片用二维映射网格面模拟，为更精确地统计后续所需数据，环向网格划分以1°为一个网格，半径方向网格划分以0.1 m为一个网格，建立的“平面应变模型”模型如图1所示，管片接缝的螺栓采用弹簧模拟，如图2所示。管片间的接缝弹簧的线刚度取为20,000 MN/m，转动刚度为200 MN·m/[rad]，作用于衬砌上的力不仅有主动的围岩压力，还有来自围岩的约束反力即弹性抗力，地基反力系数在半径方向取为150 MN/m³，在环向取为15 MN/m³ [12] [13]。

为了模型能够收敛，需设置衬砌环不发生沿净空方向的位移和转动边界条件，再通过围岩压力解析公式计算出隧道所承受整体的水平和竖直围岩压力，分块计算每块管片所承受的水平与竖直围岩压力，然后计算出每块管片在模型中所处的水平和竖直的坐标，在模型中创建编辑出相对应的函数并以压力的形式添加到各块管片上。

衬砌环整体分块如图1所示。按照管片所处位置的不同，数值模型共分为9块管片，本文模拟的为位于衬砌环顶部的B6块管片被侵蚀。阐述数值模拟的侵蚀过程如下。

3.2. 定义侵蚀过程

为充分探讨管片受侵蚀之后对隧道承载性状的影响，故将侵蚀过程分为管片被侵蚀之前、管片表层的承载能力丧失、管片表层出现洞穴以及江水能够顺畅地侵入至管片表层四个阶段：

1) 管片被侵蚀前

衬砌环未受侵蚀环境影响，隧道正常受到围岩压力，此阶段将模型中受侵蚀前的管片荷载、边界条件等施加，为作位移对照组，故不将此工况的位移清零，具体模型见图 3。

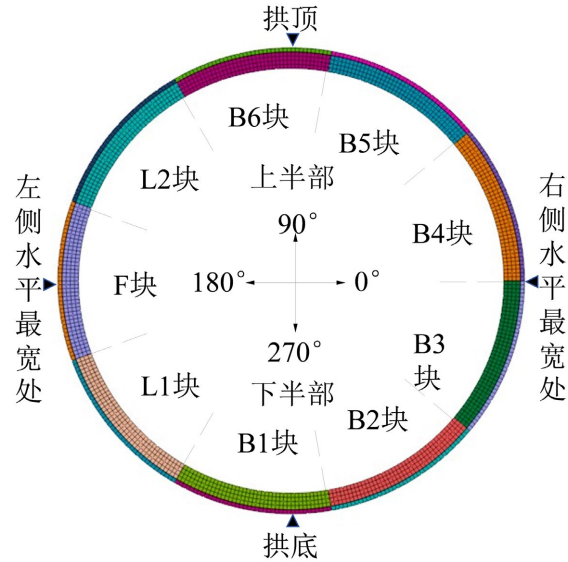


Figure 1. Assembled segmentation diagram of lining ring  
图 1. 衬砌环整体分块图

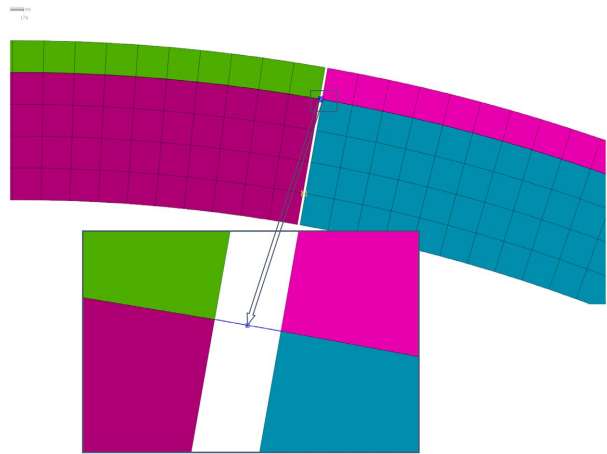


Figure 2. Schematic diagram of bolts at segment joints  
图 2. 管片接缝螺栓模拟图

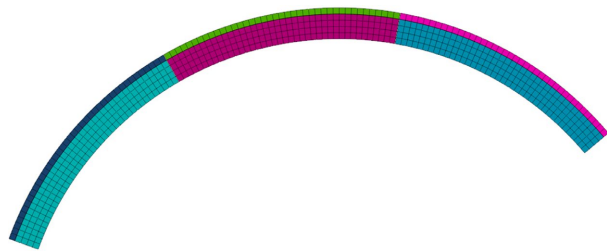


Figure 3. Diagram of segment model before erosion  
图 3. 管片被侵蚀前模型图

## 2) 管片表层的承载能力丧失

管片靠近围岩一侧的表层受到侵蚀, 受侵蚀后的表层软化, 有效承载厚度减小[1] [14], 在此阶段需在数值模型中将被侵蚀块管片的厚度减小, 并将围岩压力的施加接触面换为被侵蚀之后的管片最外层, 具体模型见图 4。

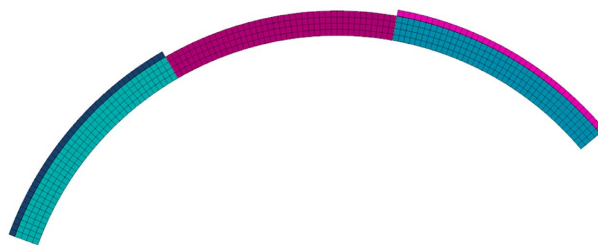


Figure 4. Model diagram of bearing capacity loss at the segment surface layer  
图 4. 管片表层的承载能力丧失模型图

## 3) 管片表层出现洞穴

管片靠近围岩一侧的表层出现洞穴, 导致洞穴位置不受围岩压力, 但洞穴的左右两侧出现围岩压力集中现象, 影响了水平和竖直围岩压力原有的线性变化的规律, 先采用围岩压力计算公式[11], 计算得到对应不同管片位置的围岩压力, 再通过围岩压力集中计算公式[15], 来确定受围岩压力集中影响的范围, 以及围岩压力集中最大值所在位置, 再将计算出来的围岩压力值施加到模型中, 钝化管片表层的承载能力丧失中施加的受侵蚀管片位置的围岩压力, 同时也将洞穴处的地基弹簧钝化, 具体模型见图 5。

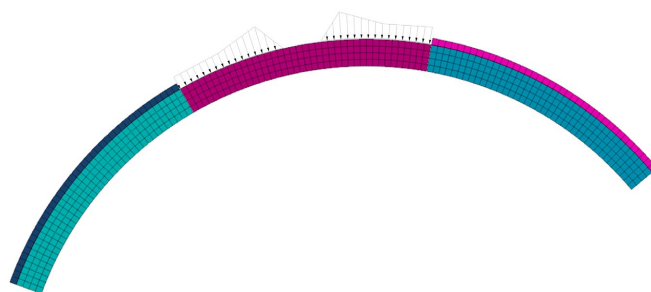


Figure 5. Model diagram of cavities formed on the segment surface  
图 5. 管片表层出现洞穴模型图

隧道围岩中存在洞穴会对隧道结构的稳定性和运营安全性产生影响, 假定存在的洞穴为类半圆形, 本文研究的隧道为多块衬砌管片拼装而成, 为了更好地探讨在洞穴影响下, 围岩压力集中对衬砌受力变形的作用, 本章选定洞穴出现位置在衬砌环与围岩相接触面的管片中间位置, 在洞穴存在的部位, 围岩与隧道衬砌之间不再紧密接触。隧道洞穴存在的部位, 围岩压力无法作用在初衬上, 使隧道的围岩压力的大小和分布出现变化; 应国刚[15]采用模型试验研究发现, 在采用荷载结构法研究洞穴对隧道衬砌的影响时, 不能只消除隧道洞穴位置的围岩荷载, 还要考虑到洞穴导致的围岩压力集中, 并分析了不同模型的计算结果, 得出隧道的空洞两侧约 3 倍空洞半径范围内的围岩压力荷载出现应力重分布, 并伴有应力集中。

## 4) 江水能够顺畅地侵入至管片表层

本文所研究的隧道围岩刚度与初衬刚度相差较大, 存在各种不紧密的接触状态, 围岩中形成掏空通道, 江水能够顺畅地侵入至管片表层, 在此阶段管片表层原有空洞的位置被水填满, 而水压力直接作用



在隧道衬砌上, 进一步导致隧道衬砌的受力性状发生改变, 因此隧道衬砌存在洞穴的部位本应受竖直、水平围岩压力变成了径向分布的水压力, 需在模型中将洞穴处加上径向的水压力, 具体模型见图 6。

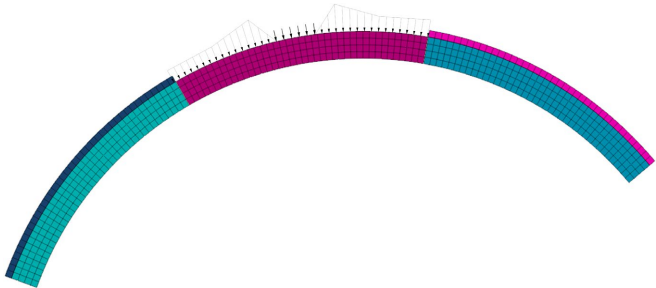


Figure 6. Diagram of river water intrusion into the segment surface model  
图 6. 江水能够顺畅地侵入至管片表层模型图

4. 模型计算结果分析

需要说明的是: 将管片承受围岩压力之前的位移视为 0; 所有位移都为管片内表面的位移; 错动位移指接缝处两侧管片边缘的位移差; 拉应力为正, 压应力为负。

4.1. 位移分析

1) 竖直位移

图 7 为管片被侵蚀情况下的衬砌环的竖直位移, 在管片被侵蚀之前, 衬砌环拱顶与拱底的竖向位移分别为-2.15 mm 与 3.94 mm; 当江水能够顺畅地侵入至管片表层后, 拱顶与拱底的竖向位移分别为-3.61 mm 与 3.6 mm。分析可知, 从衬砌环全环来看, 与管片被侵蚀之前相比, 随着侵蚀进展, 衬砌环拱顶与拱底逐渐下沉, 且被侵蚀的 B6 块管片所处位置的竖向位移变化量最大。

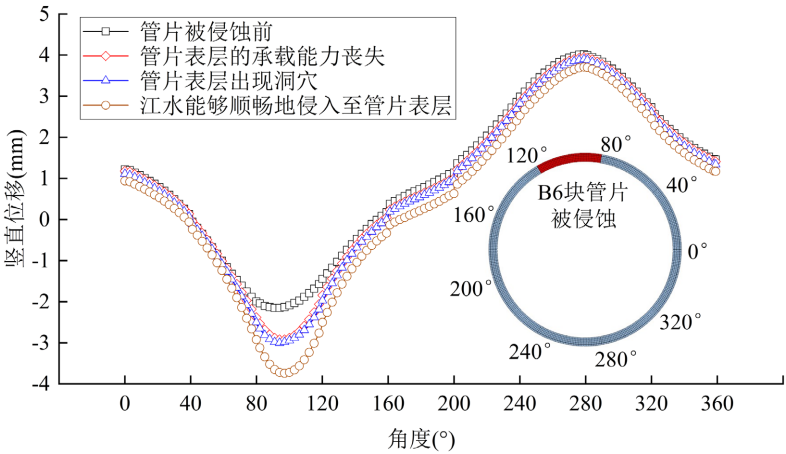


Figure 7. Vertical displacement of the lining ring under segment erosion conditions  
图 7. 管片被侵蚀情况下的衬砌环的竖直位移

2) 水平位移

图 8 为管片被侵蚀情况下的衬砌环的水平位移, 分析可知, 从衬砌环全环来看, 随着侵蚀进展, 衬砌环的 40°~120°部分, 水平位移向右偏移; 衬砌环的 120°~200°部分则向左偏移; 对于衬砌环左侧水平最宽处, 在管片被侵蚀之前的水平位移为-1.52 mm, 当管片表层的承载能力丧失后的水平位移为-1.55 mm,

当管片表层出现洞穴后的水平位移为-1.57 mm，当江水能够顺畅地侵入至管片表层后的水平位移为-1.63 mm；由此可知，与管片被侵蚀之前相比，随着侵蚀进展，衬砌环左侧水平最宽处逐渐向左侧偏移。

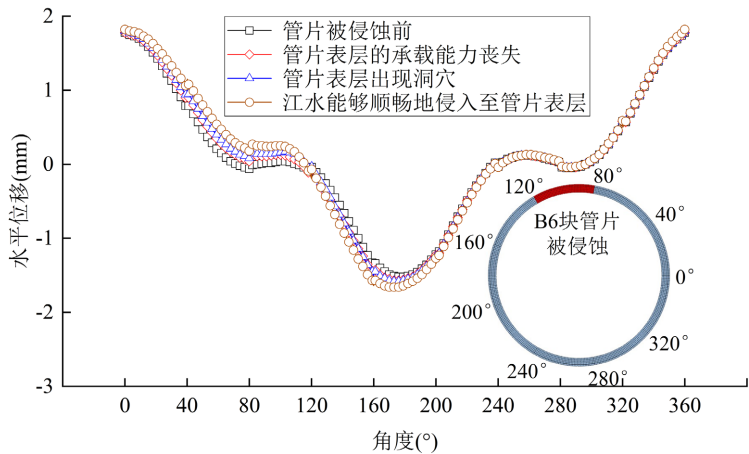


Figure 8. Horizontal displacement of the lining ring under segment erosion conditions  
图 8. 管片被侵蚀情况下的衬砌环的水平位移

3) 合位移

图 9 为管片被侵蚀情况下的衬砌环的合位移，分析可知，从最大合位移出现位置来看，江水能够顺畅地侵入至管片表层后的衬砌环的最大合位移出现在被侵蚀的管片位置，在此之前的衬砌环的最大合位移都位于拱底。在管片被侵蚀之前的衬砌环的最大合位移为 4.02 mm，当江水能够顺畅地侵入至管片表层后的最大合位移为 3.75 mm；综合分析可知，衬砌环的下半部的合位移随着侵蚀进展逐渐减小，衬砌环的上半部的合位移随着侵蚀进展逐渐增大，且上半部的合位移变化量比下半部更大。

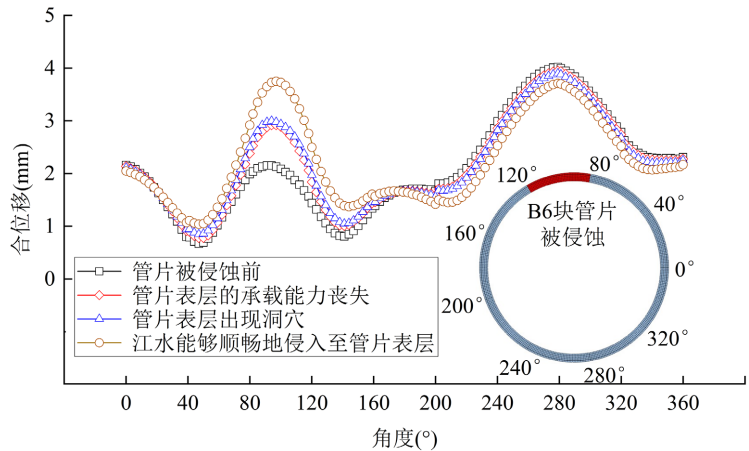


Figure 9. Resultant displacement of the lining ring under segment erosion conditions  
图 9. 管片被侵蚀情况下的衬砌环的合位移

4) 错动位移

由图 7~9 可以得出：在整个侵蚀过程中，对于衬砌环全环而言，在管片被侵蚀前，最大水平错动位移处于 B4 块管片与 B5 块管片的连接处，而在管片被侵蚀后，最大水平错动位移一直处于 L2 块管片与被侵蚀的 B6 块管片的连接处，该处的错动位移在管片被侵蚀前为 0.08 mm，在江水能够顺畅地侵入至管片表层后为 0.12 mm。

## 4.2. 应力分析

被侵蚀的管片的应力关键线路的位置如图 10 所示。

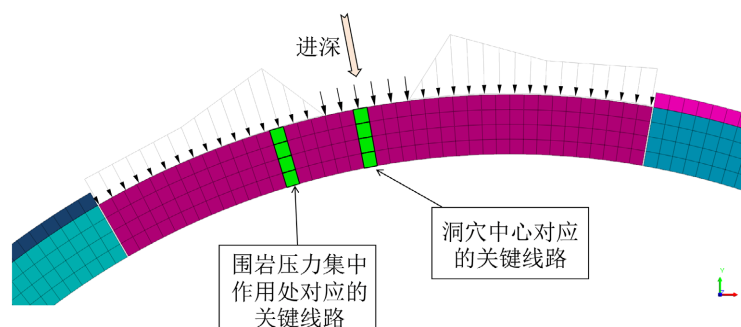


Figure 10. Location of critical stress paths in eroded segments

图 10. 被侵蚀的管片的应力关键线路的位置

### 1) 最大主应力

图 11 为被侵蚀的整个管片的最大主应力，对于被侵蚀的 B6 块管片，在整块管片的最大主应力中，在管片被侵蚀之前的最大主拉应力是 1027 kPa，当管片表层的承载能力丧失后的最大主拉应力是 2788 kPa，当管片表层出现洞穴后的最大主拉应力是 2953 kPa，当江水能够顺畅地侵入至管片表层后的最大主拉应力是 3044 kPa。由此可知，随着侵蚀进展，整块管片的最大主拉应力逐渐增大。由规范[16]可知，混凝土抗拉强度的设计限值为 1890 kPa，侵蚀前小于限值，侵蚀后大于限值，因此只靠钢筋混凝土防腐的风险较大，建议额外增加防腐措施。

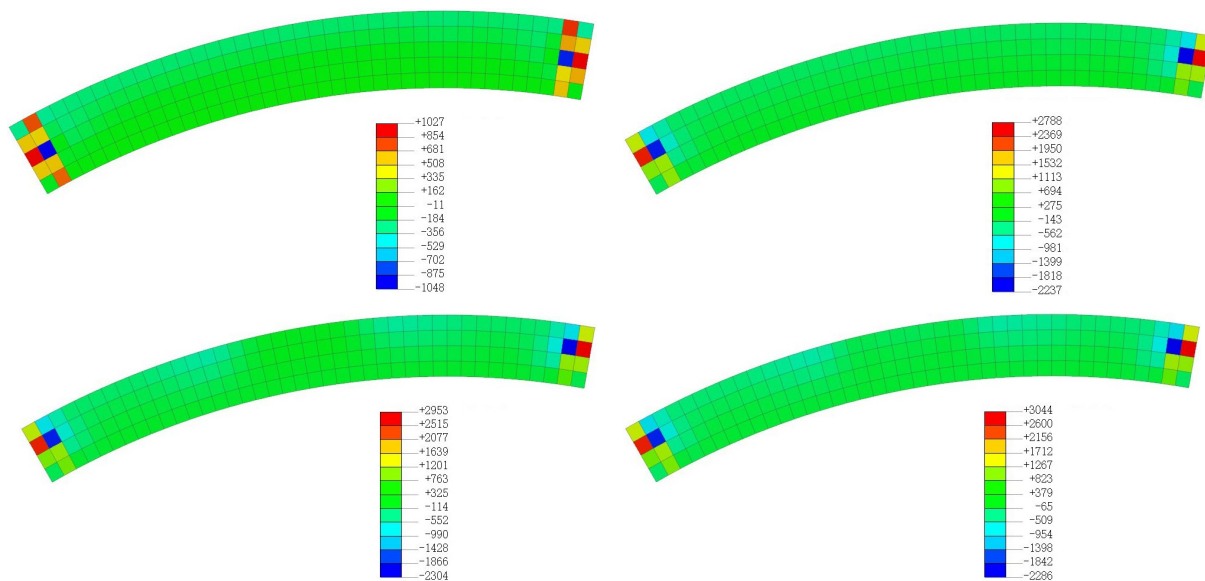


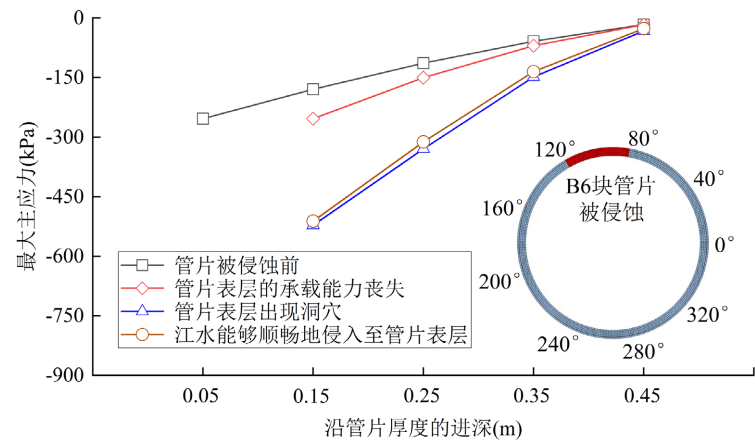
Figure 11. Maximum principal stress of the entire eroded block (kPa)

图 11. 被侵蚀的整个管片的最大主应力(kPa)

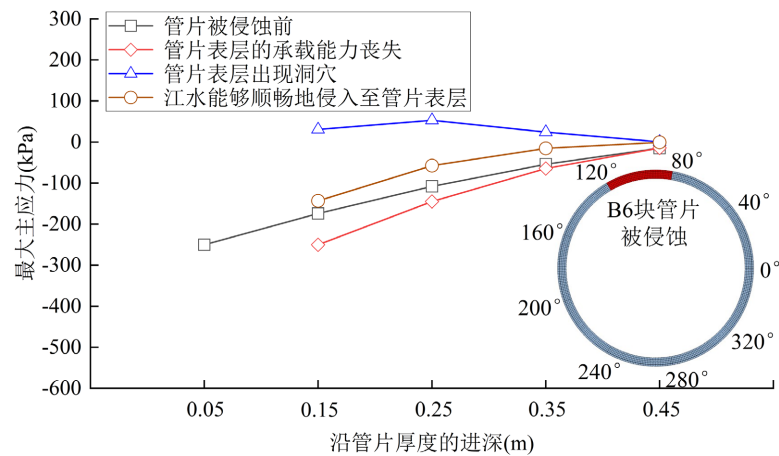
图 12 为管片被侵蚀情况下的围岩压力集中作用处对应的管片单元的最大主应力，图 13 为管片被侵蚀情况下的洞穴中心对应的管片单元的最大主应力。对于图中所示的两条关键线路，在大部分情况下，管片单元的最大主应力为压应力；但在管片表层出现洞穴后，在洞穴中心对应的 4 个管片单元都为拉应



力，且离净空较近的两个单元的最大主拉应力较小，离洞穴较近的两个单元的最大主拉应力较大。这是由于洞穴对应的管片位置不再承受围岩压力，而洞穴附近的管片位置则承受围岩压力的集中作用，这就导致管片发生弯曲，进而导致靠近洞穴一侧的管片位置受弯曲拉应力，靠近净空一侧的管片位置受弯曲压应力；此时洞穴可能为空洞，也可能填充少量水，但水压较小可以忽略不计。当江水能够顺畅地侵入至管片表层时，202 kPa 的水压力作用在洞穴对应的管片位置，改变了管片的受力性状，导致上述 4 个单元的最大主应力全部变为压应力。



**Figure 12.** Maximum principal stress of the segment element at the location of concentrated surrounding rock pressure under segment erosion conditions  
**图 12.** 管片被侵蚀情况下的围岩压力集中作用处对应的管片单元的最大主应力



**Figure 13.** Maximum principal stress of the segment element at the cavity center under segment erosion conditions  
**图 13.** 管片被侵蚀情况下的洞穴中心对应的管片单元的最大主应力

2) 最小主应力

图 14 为被侵蚀的整个管片的最小主应力，在整块管片的最小主应力中，在管片被侵蚀之前的最小主压应力是 7199 kPa，当管片表层的承载能力丧失后的最小主压应力是 10,306 kPa，当管片表层出现洞穴后的最小主压应力是 10,779 kPa，当江水能够顺畅地侵入至管片表层后的最小主压应力是 10,747 kPa；由此可知，随着侵蚀进展，整块管片的最小主压应力逐渐增大，到最后一步略微减小。由规范[16]可知，混凝土抗压强度的设计限值为 23,100 kPa，整个侵蚀过程中，管片的最小压应力都处于限值，但相比起管片被侵蚀前，在管片被侵蚀后，管片受到的最小主压应力增大近一半。

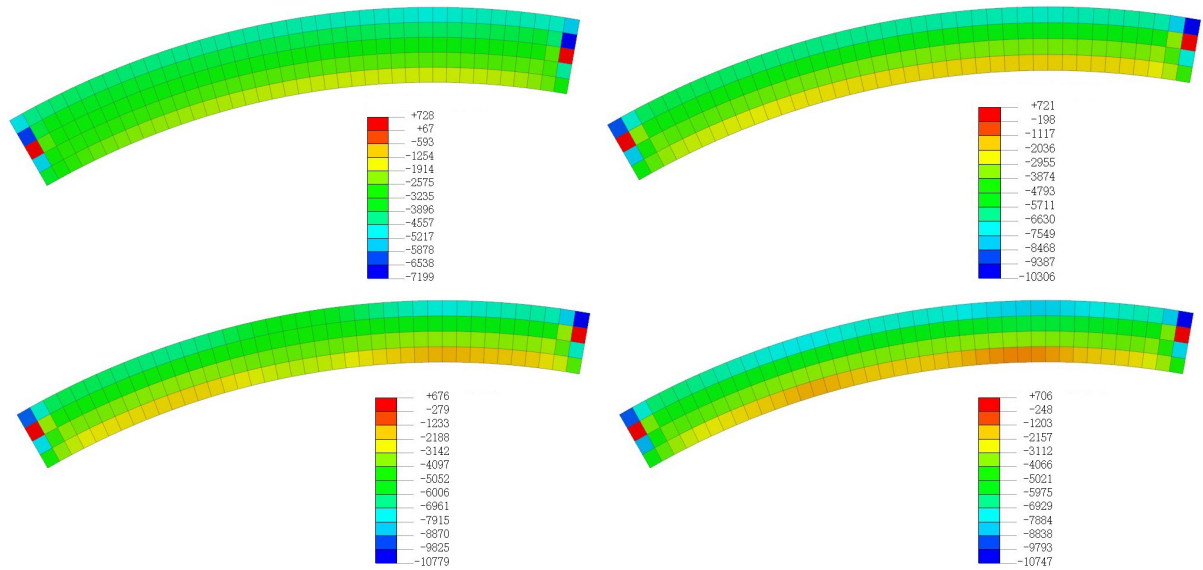


Figure 14. Minimum principal stress of the entire eroded block (kPa)

图 14. 被侵蚀的整个管片的最小主应力(kPa)

图 15 为管片被侵蚀情况下的围岩压力集中作用处对应的管片单元的最大主应力，图 16 为管片被侵蚀情况下的洞穴中心对应的管片单元的最大主应力。对于图中所示的两条关键线路，管片的最小主压应力随进深的增大而减小。在管片表层出现洞穴后，对于离净空较近的两个单元的最小主应力，洞穴中心对应位置比围岩压力集中作用处对应位置要大，对于离洞穴较近的两个单元的最小主应力，洞穴中心对应位置比围岩压力集中作用处对应位置要小。

这是由于洞穴对应的管片位置中靠近洞穴一侧的弯曲变形最显著，弯曲拉应力较强，且拉应力与轴向压应力呈“抵消效应”，而围岩压力集中作用处叠加的弯曲拉应力较弱，这导致了此处洞穴中心对应位置比围岩压力集中作用处对应位置的最小主应力要小；而洞穴对应的管片位置中靠近净空一侧的弯曲压应力较强，且弯曲压应力与轴向压应力呈“叠加效应”，而围岩压力集中作用处叠加的弯曲压应力较弱，这导致了此处洞穴中心对应位置比围岩压力集中作用处对应位置的最小主应力要大。

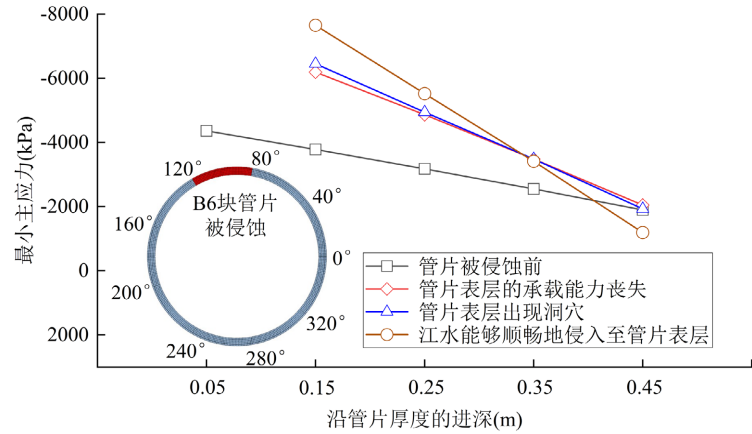


Figure 15. Minimum principal stress of the segment element at the location of concentrated surrounding rock pressure under segment erosion conditions

图 15. 管片被侵蚀情况下的围岩压力集中作用处对应的管片单元的最小主应力

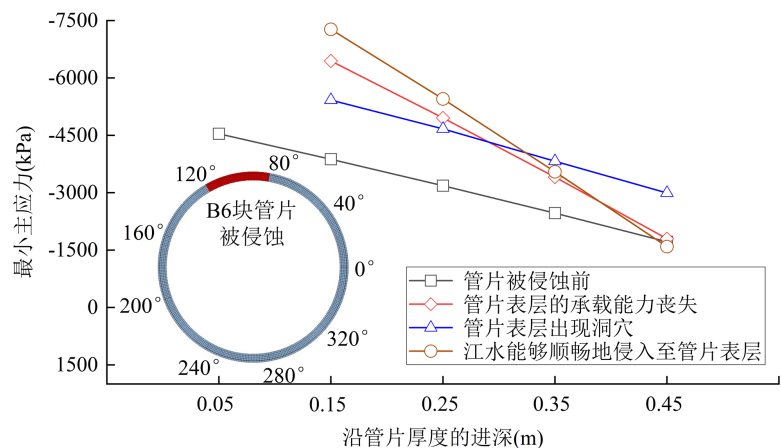


Figure 16. Minimum principal stress of the segment element at the cavity center under segment erosion conditions  
图 16. 管片被侵蚀情况下的洞穴中心对应的管片单元的最小主应力

5. 结论

- (1) 研究表明, 位于衬砌环顶部的管片被侵蚀后, 衬砌结构变形呈现显著的非对称发展特征: 随着侵蚀进展, 拱顶与拱底的竖向位移持续增大, 整体沉降趋势明显; 水平位移在衬砌环 40°~120°范围内向右偏移, 在 120°~200°范围内向左偏移, 且距离侵蚀部位较近的左侧水平最宽处位移变化显著, 而右侧相应位置几乎不受影响。因此, 在隧道运营中应重点监测拱顶与拱底变形, 并依据位移发展及时采取局部加固措施, 以保障结构长期安全。
- (2) 在管片表层出现洞穴后, 管片承受的围岩压力呈“中部无荷载、两侧压力集中”的形式分布, 原本应被洞穴出现位置的管片部分所承担的围岩压力, 向着洞穴两侧围岩与管片相接触的部分转移和集中, 导致在洞穴两侧区域形成围岩压力集中, 最终其应力分布呈现显著的空间差异特征: 洞穴中心邻近区域的管片最大主拉应力较高, 而靠近隧道净空侧则相对较低; 对比洞穴中心与围岩压力集中作用处的最小主压应力发现, 靠近净空侧前者大于后者, 靠近洞穴侧则反之。
- (3) 在江水侵入管片表层后, 水压代替管片上原本不受荷载的洞穴区域, 消解了管片上洞穴所在部分的弯曲拉应力, 管片的受力由两侧受压弯曲转变为整体受压, 这使被侵蚀管片的位移变化量增加, 衬砌环最大合位移由拱底转移至被侵蚀管片处; 水平错动位移在侵蚀过程中变化最为显著, 其位移最大值从被侵蚀前 B4-B5 块管片接缝处, 迁移并持续位于被侵蚀后 L2-B6 块管片接缝处, 且该处位移在江水能够顺畅地侵入至管片表层后较管片被侵蚀前增大约 50%。据此建议, 在隧道运营维护中应重点关注管片间连接螺栓的防腐性能, 可采用无损检测技术定期评估螺栓的锈蚀状态, 并实施针对性防护。

参考文献

[1] 刘海京, 郑佳艳, 邹宗良, 等. 某运营高速公路隧道衬砌坍塌病害检测及快速处治[J]. 公路交通技术, 2010(5): 103-106.

[2] 吴铭芳. 缓倾岩层隧道衬砌掉块病害分析及处治研究[J]. 交通科技, 2022(4): 109-113.

[3] 张恒, 陈寿根, 程芳卉. 双洞八车道小净距隧道施工力学模型试验[J]. 公路交通科技, 2013, 30(2): 83-89.

[4] 何本国, 张志强, 马腾飞. 大断面隧道模型试验水压模拟加载方法[J]. 工程力学, 2015, 32(1): 128-136.

[5] Yan, Q., Yao, C., Yang, W., He, C. and Geng, P. (2015) An Improved Numerical Model of Shield Tunnel with Double Lining and Its Applications. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2015**, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2015/430879>

[6] 张成平, 冯岗, 张旭, 等. 衬砌背后双空洞影响下隧道结构的安全状态分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 487-

- 493.
- [7] 李明, 陈洪凯, 熊峰伟. 隧道衬砌背后空洞健康判据试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 398-402.
  - [8] 朱春生, 杨晓华, 来弘鹏, 等. 公路隧道衬砌后空洞对结构安全的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(5): 63-68.
  - [9] 彭跃, 王桂林, 张永兴, 等. 衬砌背后空洞对在役隧道结构安全性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(6): 1101-1104+1137.
  - [10] 安永林, 郭晋东, 周进, 等. 局部超挖汇水下隧道支护结构受力特性[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 91-98.
  - [11] 刘瑞康. 城市复杂环境中浅埋小净距交通隧道衬砌的服役性能研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2022.
  - [12] 张育锦, 周晓军, 喻炳鑫, 等. 基于“接触摩擦-梁-接头”模型的矿山法隧道预制拼装二次衬砌分块方法研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(3): 35-44.
  - [13] 叶宇航, 王建, 徐文田, 等. 软土地基大直径地铁盾构隧道衬砌结构受力特性数值分析研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(S2): 151-160.
  - [14] Chen, Z., Li, Z., He, C., Ma, C., Li, X., Chen, K., *et al.* (2023) Investigation on Seepage Field Distribution and Structural Safety Performance of Small Interval Tunnel in Water-Rich Region. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **138**, Article 105172. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105172>
  - [15] 应国刚, 张顶立, 陈立平, 等. 荷载结构模型在拱顶空洞存在情况下的修正[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 181-185.
  - [16] 中华人民共和国交通运输部. JTG 3370.1-2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.