

## 地表超载作用下锈蚀盾构隧道结构易损性分析

张冬梅<sup>1,2</sup>, 朱锐<sup>1</sup>, 陈淙岑<sup>1</sup>, 黄忠凯<sup>1†</sup>, 张吾渝<sup>2</sup>, 朱美恒<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;  
2. 青海大学 土木水利学院, 青海 西宁 810016;  
3. 中交隧道工程局有限公司上海分公司, 上海 201112)

**摘要:**地表超载是威胁盾构隧道结构安全运营的重要因素,且随着隧道服役时间的增长,钢筋锈蚀导致的盾构隧道性能劣化可能进一步加剧地表超载作用下结构损伤破坏的风险。鉴于此,提出了地表超载作用下锈蚀盾构隧道结构易损性分析方法,以软土地区某典型浅埋盾构隧道为例,建立了地表超载作用下锈蚀盾构隧道管片三维精细化有限元分析模型,考虑地层抗力系数与土体重度的不确定性开展了数值分析;在此基础上,以接头张开量为损伤指标,采用双参数对数正态分布模型建立了地表超载作用下锈蚀盾构隧道结构易损性曲线,揭示了超载和钢筋锈蚀率等因素对隧道结构易损性的影响规律。研究结果表明,隧道易损性概率随地表超载水平与钢筋锈蚀率的增大而增大;当地表超载较小时,钢筋锈蚀率对隧道易损性的影响更为突出;同一工况下,隧道腰部接头相较于拱顶或拱底接头具有更高的损伤概率。

**关键词:**盾构隧道;地表超载;钢筋锈蚀;易损性分析;数值模拟

中图分类号:TU45 文献标志码:A

## Fragility Analysis on Corroded Shield Tunnel Structure under Extreme Surcharge

ZHANG Dongmei<sup>1,2</sup>, ZHU Rui<sup>1</sup>, CHEN Congcen<sup>1</sup>, HUANG Zhongkai<sup>1†</sup>,  
ZHANG Wuyu<sup>2</sup>, ZHU Meiheng<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. School of Civil Engineering and Water Resource, Qinghai University, Xining 810016, China;  
3. Shanghai Branch, CCCC Tunnel Engineering Bureau Company Limited, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** The extreme surcharge is an important factor that threatens the safety of shield tunnel structures. Besides, the deterioration of shield tunnel performance caused by reinforcement corrosion may aggravate the risk of structure damage under extreme surcharge. Therefore, an analysis method was proposed to evaluate the fragility of corroded shield tunnels under extreme surcharge. In this paper, a three-dimensional finite element model was

\* 收稿日期:2023-12-11

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFC3800905), National Key Research and Development Program (2022YFC3800905); 国家自然科学基金资助项目(52238010, 52108381, 52090082, 52408435), National Natural Science Foundation of China (52238010, 52108381, 52090082, 52408435); 上海市科学技术委员会科研计划项目(23DZ1202806, 22XD1430200), Scientific Research Program of Shanghai Science and Technology Commission (23DZ1202806, 22XD1430200)

作者简介:张冬梅(1975—),女,山东菏泽人,同济大学教授,博士

† 通信联系人,E-mail: 5huangzhongkai@tongji.edu.cn

established to simulate a corroded shield tunnel under extreme surcharge, taking some typical shallow buried shield tunnels located in soft soil as an example. A large number of numerical calculations were carried out considering the uncertainty on the coefficient of stratum resistance and gravity of soil. Then, the joint opening was taken as the index of fragility, and the fragility curve of the corroded shield tunnel under extreme surcharge was established through a two-parameter lognormal distribution model. This research studied the influence of extreme surcharge and corrosion rate on the fragility of shield tunnels. It showed that the fragility of the shield tunnel increased with the increase of extreme surcharge or corrosion rate of reinforcement; when the surcharge was light, the corrosion rate of reinforcement had a greater influence on the fragility of the tunnel; under the same work condition, compared with the joint located at the top or the bottom of the tunnel, the joint at the waist may have a higher probability of damage.

**Key words:** shield tunnel; extreme surcharge; steel reinforcement corrosion; fragility analysis; numerical simulation

近年来,随着我国城市建设的蓬勃发展,各大城市纷纷加快地铁建设以应对日益严重的交通拥堵问题。截至2022年底,我国已有53个城市开通城市轨道交通,总运营里程达到9 584 km,地铁已成为沟通城市各大功能分区的重要交通方式。然而,随着城市地下空间开发的不断深入,不可避免地需要在既有地铁隧道附近开展各项工程建设活动。其中,地表超载作为一种典型的外部扰动对既有盾构隧道的运营安全带来了严重威胁。如2008年上海某地铁区间盾构隧道上方突发大量堆土,最大堆土高度约7 m,事故进一步引发了隧道结构横向收敛变形、接缝渗漏水、衬砌管片开裂等病害,严重威胁隧道结构与运营安全<sup>[1-2]</sup>,造成了巨大的经济损失和社会影响。

目前,国内外众多学者已通过解析分析、数值模拟和试验研究等方法对地表超载下隧道受力与变形特性展开了大量研究。在解析方面,学者们基于经典理论模型对地表超载下隧道横向与纵向受力与变形展开分析。如房营光等<sup>[3]</sup>基于Laplace变换与对称性原理推导了地表超载下隧道应力与变形解析解;姜启元等<sup>[4]</sup>利用Boussinesq应力解分析了地表超载条件下隧道纵向变形规律;康成等<sup>[5]</sup>基于Winkler地基和Timoshenko梁耦合模型分析了地表超载条件下隧道衬砌变形机理;魏纲等<sup>[6]</sup>运用最小势能原理探讨了地表超载作用下隧道环间错台量与剪切力。在数值计算方面,学者们通过建立有限元模型分析了不同地表超载条件、隧道形式、土体参数下盾构隧道的力学特性。Yamamoto等<sup>[7]</sup>应用数值极限分析方法,研

究了黏性土中方形隧道在地表超载作用下的结构力学特性;叶耀东<sup>[8]</sup>基于有限元分析了地表超载与隧道下卧土层压缩模量对隧道结构力学特性的影响;张东明等<sup>[9]</sup>考虑纵缝接头的影响建立了精细化数值模型,揭示了地表超载作用下隧道结构的变形特征;王如路等<sup>[10]</sup>分析了软土条件下地表超载范围、土体抗力系数与侧压力系数等对管片张开量与螺栓受力特性的影响。在试验研究方面,学者们通过足尺或缩尺试验分析了地表超载对隧道结构的影响。柳献等<sup>[11]</sup>基于多点加载足尺试验研究了盾构隧道在不同地表超载工况下管片变形发展规律;吴庆等<sup>[12]</sup>采用室内缩尺试验分析了超载范围与隧道埋深对隧道结构变形的影响;黄大维等<sup>[13]</sup>通过开展模型试验,分析了土层压缩模型对隧道变形的影响。

上述工作丰富了对超载作用下隧道结构受力与变形规律的认识。然而,随着盾构隧道服役时间的增加,钢筋锈蚀等因素将导致隧道力学性能不可避免地产生不同程度的劣化<sup>[14-15]</sup>。同时,由于钢筋锈蚀导致的隧道性能劣化可能进一步加剧在地表超载作用下隧道结构发生损伤破坏的风险,给隧道结构的安全运营带来巨大的挑战。然而,目前国内外针对地表超载作用下锈蚀盾构隧道结构性能演化规律的研究相对较少。

另外,易损性分析是合理评价隧道结构安全状态的重要手段之一,其中,易损性的概念源于军事领域,意指系统对外部灾害作用的承受能力。目前,易损性分析方法广泛应用于地震、滑坡、恐怖袭击和泥

石流等灾害作用下建筑、桥梁、隧道等结构的安全评价<sup>[16-17]</sup>,针对地表超载作用下隧道易损性分析的研究相对不足.而且,由于超载大小、土体参数以及钢筋锈蚀等多重不确定性因素的耦合影响较为复杂,目前地表超载条件下锈蚀盾构隧道结构易损性演化规律尚不明确.

因此,本文首先提出了地表超载作用下锈蚀盾构隧道结构易损性分析流程;以软土地区典型盾构隧道为例,建立了超载作用下锈蚀盾构隧道三维有限元分析模型;通过考虑地层抗力系数与土体重度的不确定性,采用蒙特卡洛方法开展大量数值计算;基于数值计算结果,进一步以隧道接头张开量为损伤指标,建立了地表超载作用下锈蚀盾构隧道结构易损性曲线,揭示了超载作用和钢筋锈蚀等因素对盾构隧道结构易损性的影响规律.

## 1 盾构隧道结构易损性分析方法

### 1.1 盾构隧道结构损伤指标及其等级

开展地表超载作用下盾构隧道结构易损性分析的重要工作之一是确定评价结构损伤的指标及其分级标准.根据柳献、吴庆、刘四进等学者<sup>[11-12,14]</sup>对超载工况下盾构隧道结构承载能力的试验研究,隧道管片纵缝接头是管片环中最薄弱的部位且管片接缝的张开量与隧道混凝土损伤状态具有较大的相关性.因此本文选用隧道接头张开量作为地表超载作用下盾构隧道结构损伤的评价指标.

在盾构隧道结构易损性研究中通常将损伤指标(DI)分为5个等级,分别对应无破坏 $D_0$ ,轻微破坏 $D_1$ ,中等破坏 $D_2$ ,严重破坏 $D_3$ 和完全破坏 $D_4$ .本文结合沈贤达<sup>[18]</sup>对上海运营期盾构隧道3 000余环衬砌结构接头变形的调查将盾构隧道接头张开量的损伤状态分为 $D_0$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 几个等级,如表1所示.当接头张开量小于2 mm时,混凝土与螺栓均处于弹性阶段,认为此时结构损伤处于 $D_0$ 等级;当接头张开量大于2 mm时,螺栓进入屈服阶段,此时结构损伤处于 $D_1$ 等级;当接头张开量大于4 mm时,混凝土出现塑性区,螺栓部分进入强化阶段,此时结构损伤处于 $D_2$ 等级;当接头张开量大于6 mm时,接缝处出现较大的渗漏水风险,结构损伤处于 $D_3$ 等级;当接头张开量大于8 mm时,接头已发生局部破坏,结构损伤处于 $D_4$ 等级.接头张开量的损伤状态分级如表1所示.

### 1.2 盾构隧道结构易损性曲线的定义

本文采用双参数对数正态分布模型<sup>[19]</sup>建立地表

表1 盾构隧道接头张开量损伤状态分级<sup>[18]</sup>

Tab.1 Damage state of joint opening of shield tunnel

损伤等级	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
接头张开量/mm	0~2	>2~4	>4~6	>6~8	>8

超载作用下锈蚀盾构隧道易损性曲线.该模型中不同荷载条件下结构对某一损伤状态的超越概率计算如式(1)所示.

$$P(\text{Damage} \geq D_i | P_0) = \Phi\left(\frac{\ln(x/m_{xi})}{\beta_{xi}}\right) \quad (1)$$

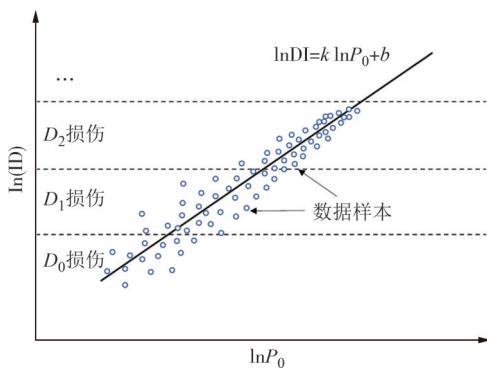
式中: $P(\text{Damage} \geq D_i | P_0)$ 表示地表超载大小为 $P_0$ 时隧道结构损伤等级达到 $D_i$ 的概率;结构损伤等级通过结构损伤指标来表征,在本文的研究中,选取隧道接头张开量作为结构损伤指标,详见1.1节; $\Phi$ 为标准正态分布的累计分布函数; $x$ 为意外荷载的强度水平,即易损性曲线的横坐标,在本文的研究中对应地表超载 $P_0$ ; $m_{xi}$ 为当结构损伤等级为 $i$ 时,对应的地表超载水平 $P_0$ 的对数均值; $\beta_{xi}$ 为第 $i$ 级损伤状态对应的总对数标准差,描述易损性曲线的总体变异性.本研究中考虑易损性曲线的总体变异性主要来源于三个方面,即隧道损伤状态确定及分级范围的不确定性 $\beta_{di}$ 、隧道结构响应计算结果不确定性 $\beta_c$ 以及地表超载的不确定性 $\beta_l$ ,假设三者相互独立,则 $\beta_{xi}$ 可表示为式(2):

$$\beta_{xi} = \sqrt{\beta_{di}^2 + \beta_c^2 + \beta_l^2} \quad (2)$$

根据美国联邦紧急事务管理局与国家建筑科学研究所的相关研究<sup>[20]</sup>,采用 $\beta_{di}$ 为0.4、 $\beta_c$ 为0.3的建议取值.不确定性参数 $\beta_l$ 用于描述数值计算结果与曲线拟合值之间的离散性,需根据具体不同地表超载水平下计算得到的损伤指标,并拟合得到的回归曲线来确定.如前文所述,构建超载作用下隧道易损性曲线需要获取参数 $m_{xi}$ 与 $\beta_l$ , $m_{xi}$ 与 $\beta_l$ 的确定需要针对具体工况开展大量有限元分析,其确定方法如图1所示.首先,基于大量的数值计算结果,获得地表超载水平与所选结构损伤指标的数据样本,取两个变量的自然对数,即 $\ln P_0$ 与 $\ln(\text{DI})$ ,并将数据样本绘制在坐标系中(图中用圆圈表示);其次,对二者进行线性拟合回归分析,得到概率需求模型,用式(3)表示.

$$\ln \text{DI} = k \ln P_0 + b \quad (3)$$

式中: $k$ 为回归曲线的斜率, $b$ 为回归曲线的截距.基于式(3)与表1中给出的损伤状态划分标准,即可获得每个结构损伤等级对应的地表超载水平 $m_{xi}$ ,根据数值计算得到的损伤指标与回归曲线对应损伤指标偏差即可确定 $\beta_l$ .

图1  $m_{xi}$ 与 $\beta_i$ 参数确定方法示意图Fig.1 Method of determining the parameter  $m_{xi}$  and  $\beta_i$ 

### 1.3 地表超载作用下锈蚀盾构隧道易损性分析流程

本文提出的地表超载作用下锈蚀盾构隧道的易损性曲线的分析流程如图2所示,具体包括:

- 1) 选取典型的盾构隧道结构形式与材料参数,确定钢筋锈蚀率与地表超载水平的取值;
- 2) 确定不确定性参数及其概率密度分布形式,如本文选取了地层抗力系数与土体重度作为不确定参数,并对参数进行抽样;
- 3) 根据步骤1)与步骤2)中的相关参数建立地表超载作用下锈蚀盾构隧道的有限元计算模型,确定典型工况开展大量数值模拟计算;

4) 确定地表超载作用下盾构隧道损伤指标及结构损伤等级的阈值范围,本文选取盾构隧道接头张开量作为结构损伤指标,结构损伤等级的划分方法见表1;

5) 基于数值计算结果与步骤1)中的结构损伤指标及其阈值,采用图1所示的方法确定易损性曲线中两个关键参数 $m_{xi}$ 与 $\beta_i$ ;

6) 根据步骤5)中对两个关键参数的计算结果,结合式(1)建立易损性曲线.

## 2 锈蚀盾构隧道数值分析模型

### 2.1 锈蚀盾构隧道有限元分析模型

本文采用有限元软件ABAQUS建立盾构隧道计算模型来模拟地表超载作用下管片的力学性能.由于后续需进行大量参数抽样与数值计算,因此采用荷载结构法模拟管片受到的外力作用.荷载结构模型如图3所示.

该模型是国际隧道协会推荐的隧道设计方法,在隧道设计与建造中被广泛使用.模型考虑隧道的自重应力、土体应力与水压力,并采用水土分算的形

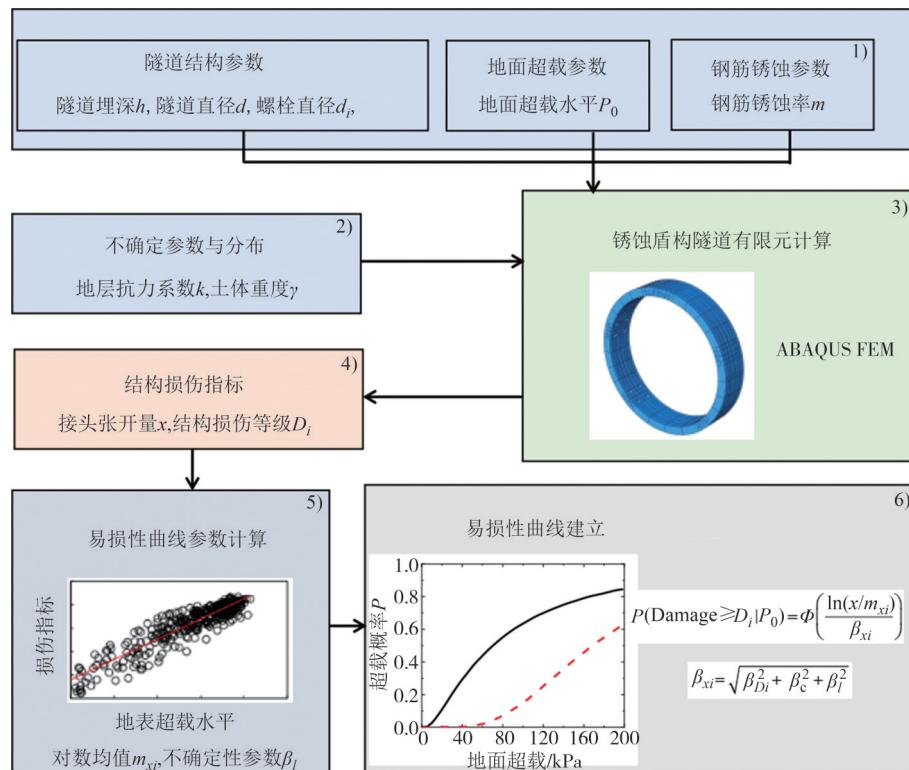


图2 锈蚀盾构隧道易损性分析流程

Fig.2 Fragility analysis of corroded shield tunnel

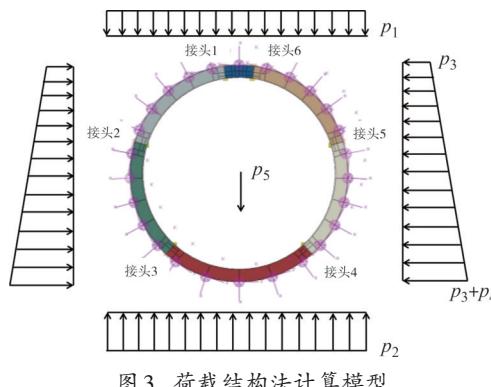


图3 荷载结构法计算模型

Fig.3 Calculation model of load structure method

式.其荷载可以用 $p_1 \sim p_5$ 表示,其计算方法见式(4)~式(8):

$$p_1 = P_0 + \gamma \cdot H + 0.215 \cdot \gamma \cdot R_c \quad (4)$$

$$p_2 = p_1 + \pi \cdot \gamma_c \cdot th \quad (5)$$

$$p_3 = \lambda \cdot (P_0 + \gamma' \cdot H + th/2) + \gamma_w \cdot (H + th/2) \quad (6)$$

$$p_4 = 2 \cdot \lambda \cdot \gamma' \cdot R_c + 2 \cdot \gamma_w \cdot R_c \quad (7)$$

$$p_5 = \gamma_c \cdot th \quad (8)$$

式中: $P_0$ 为地表超载水平(kPa); $\gamma$ 为土体饱和重度(kN/m<sup>3</sup>); $\gamma'$ 为土体有效重度(kN/m<sup>3</sup>); $\gamma_w$ 为地下水重度(kN/m<sup>3</sup>); $\gamma_c$ 为混凝土重度(kN/m<sup>3</sup>); $H$ 为隧道埋深(m);假定地下水位位于地表, $R_c$ 为隧道计算半径(m); $th$ 为隧道衬砌厚度(m); $\lambda$ 为侧压力系数.

本文基于国内较为常用的地铁盾构隧道结构建立了一环衬砌精细化数值模型来开展后续分析.隧道外径为6.2 m,内径为5.5 m.衬砌环宽1 200 mm,由一块封顶块F(16°)、两块标准块B(65°)、两块邻接块L(65°)和一块封底块D(84°)共6片管片组成.管片间建立螺栓孔与手孔模型,并通过2根6.8级的M30直螺栓连接.计算模型如图4所示,其中封顶块(F)与邻接块(L1)之间的螺栓大致位于隧道拱顶位置,定义为接头1;邻接块(L1)与标准块(B1)之间的螺栓大致位于隧道腰带位置,定义为接头2;标准块(B1)与封底块(D)之间的螺栓大致位于隧道拱底位置,定义为接头3.由于本文采用的管片物理模型是严格对称的,且荷载模式也是两侧对称分布的.由此可知,接头1与接头6、接头2与接头5、接头3与接头4的计算结果是完全一致的.因此,后文中仅展示接头1、接头2与接头3的易损性计算结果.

所有螺栓长度均为400 mm,螺栓孔直径为42 mm.模型管片间采用直接接触,设置接触面法向为硬接触关系,切向为摩擦接触关系,摩擦系数为

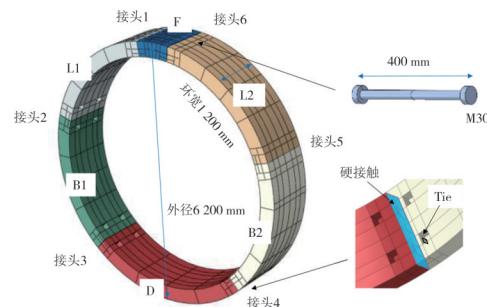


图4 盾构隧道有限元模型

Fig.4 Finite element model of shield tunnel

0.4.螺母内侧与手孔断面设置Tie接触以保证螺栓与管片保持共同变形.

基于学者们对软土地区广泛分布的典型土层的研究,模型中土体的侧压力系数 $\lambda$ 设为0.6.同时,考虑浅埋隧道较深埋隧道更易受到地表超载作用的影响,本文的研究只考虑隧道的浅埋工况,选取典型的浅埋隧道埋深(顶板覆土厚度) $H=10$  m.

为确保模型计算精度与计算效率,对模型不同的几何部分分别进行网格划分.管片总体设置为六面体结构化网格单元,局部手孔与螺栓部位划分为扫掠网格.为提高模型的计算效率,模型中的材料均采用线弹性本构,将钢筋混凝土管片简化为均质的混凝土材料,混凝土强度等级为C55,其弹性模量为 $E_c=3.55 \times 10^4$  MPa,抗压强度为 $f_c=25.3$  MPa,抗拉强度为 $f_t=1.96$  MPa,管片的等效抗弯刚度为 $EI=125 055$  kN·m.管片间螺栓的弹性模型为 $E_s=2 \times 10^5$  MPa,屈服强度为 $f_s=480$  MPa.

既有研究表明,锈蚀造成的管片内钢筋有效截面面积减小或锈胀引起的混凝土与钢筋的黏结锚固变化是钢筋锈蚀诱发盾构隧道结构性能劣化的两个主要因素.上述两个因素都会直接导致管片整体抗弯刚度低于设计值.本文假设钢筋发生均匀锈蚀,通过降低管片的等效抗弯刚度反映钢筋锈蚀对管片性能的影响.根据 Cabrera<sup>[21]</sup>和 Ballim 等<sup>[22]</sup>的试验研究结果,管片剩余等效刚度与钢筋锈蚀率服从式(9)与式(10)的计算关系:

$$\eta = \frac{\pi D_s^2 - \pi D_c^2}{\pi D_s^2} \times 100\% \quad (9)$$

$$EI_{corr} = \frac{EI}{1.002 + 0.05 \times \eta} \quad (10)$$

式中: $D_s$ 为钢筋的设计直径; $D_c$ 为锈蚀后钢筋剩余的有效直径; $\eta$ 为钢筋的面积锈蚀率; $EI$ 为管片的设计等效刚度; $EI_{corr}$ 为锈蚀后管片的剩余等效刚度.基于

上述理论,本文通过改变有限元模型中管片的弹性模量来表达不同钢筋锈蚀率下管片的劣化性能.

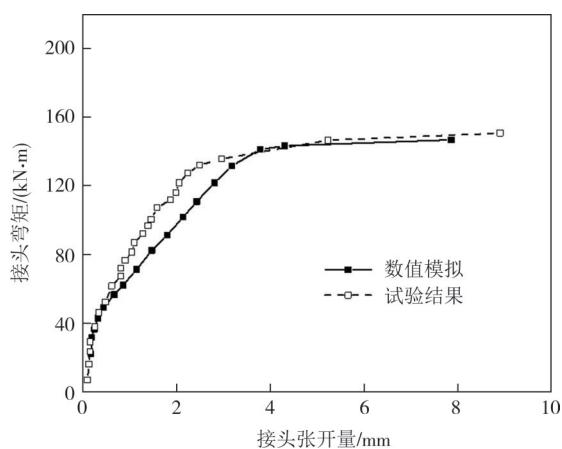
## 2.2 模型验证

由于开展整环锈蚀隧道模型试验需要耗费大量的经济与时间成本,因此在相关领域鲜有可以参考的研究成果,这也为模型的直接验证带来了困难.研究表明,管片的接头性能是决定隧道结构力学特性的关键因素.因此,本文通过开展管片的接头试验,并以接头张开量为指标对比了试验数据与数值计算结果来验证上述有限元模型的合理性,试验模型如图5(a)所示.试验中首先施加水平荷载到设定值500 kN,再施加竖向荷载使接头处的弯矩 $M$ 逐渐增大,有限元模型的荷载施加方式与试验保持一致.

图5(b)展示了接头张开量随弯矩变化的试验与有限元计算结果.从图中可以看出,有限元计算结果很好地反映了接头承载力发展的各个过程.同时,有限元模拟的接头张开量-弯矩变化曲线与试验结果吻合较好.



(a)管片接头力学性能试验



(b)接头张开量有限元与试验结果对比

图5 接头力学性能的试验验证

Fig.5 Experimental verification on mechanical performance of joint

## 2.3 不确定性参数与地表超载水平

本研究考虑地层抗力系数与土体重度的变异性.假定地层抗力系数 $k$ 服从对数正态分布,土体重度 $\gamma$ 服从正态分布,其特征参数如表2所示.

表2 不确定性参数分布与取值

Tab.2 Settings of uncertainty parameters

参数	分布形式	均值	标准差
地层抗力系数 $k/(kN\cdot m^{-4})$	对数正态分布	0.6	0.1
土体重度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	正态分布	18	1.8

盾构隧道的钢筋锈蚀程度往往随着隧道运营时间的增加逐渐加深.现有数据表明,上海地区盾构隧道钢筋的锈蚀速率可按0.02 mm/年计算.以锈蚀诱导期10年计算,我国大多数盾构隧道在达到30年的运营使用期时对应的钢筋锈蚀率为20%,作为轻度锈蚀状态;100年的设计使用寿命时对应的钢筋锈蚀率为70%,作为重度锈蚀状态;同时取运营时间为70年对应的钢筋锈蚀率50%表示中等锈蚀状态.此外,考虑地表超载最大为200 kPa,模型的计算工况如表3所示.通过在2.1节中建立的数值模型结构顶端施加不同强度的均布荷载模拟不同的地表超载大小.

表3 不同钢筋锈蚀率的计算工况

Tab.3 Variable condition of reinforcement corrosion rate

工况	钢筋锈蚀率/%	地表超载水平/kPa
1	20	0~200
2	50	0~200
3	70	0~200

## 3 超载作用下锈蚀隧道易损性评价

基于第2节提出的地表超载作用下锈蚀盾构隧道结构易损性曲线分析方法,对表3所示的典型钢筋锈蚀率下隧道结构的易损性开展分析.针对每一种钢筋锈蚀率工况,结合2.1节确定有限元计算模型的各项确定性参数,根据2.2节的地层抗力系数与土体重度的概率分布形式对不确定性参数进行抽样,在0~200 kPa中均匀抽取一个值作为地表超载大小,根据上述参数组合开展数值计算,确定不同地表超载大小下的接头张开量.重复上述过程100次,建立地表超载大小与接头张开量的对数回归曲线,根据2.2节所述方法计算易损性曲线的关键参数 $m_{xi}$ 与 $\beta_i$ ,结合式(1)与式(2)即可建立易损性曲线.下文分别给出了不同钢筋锈蚀率下盾构隧道结构易损性曲线(图6~图8),并揭示了不同钢筋锈蚀率对隧道结构易损性的影响规律(图9~图11).

### 3.1 钢筋锈蚀率为 20% 时隧道结构易损性曲线

图 6(a)~(c) 分别展示了当钢筋锈蚀率为 20% 时锈蚀盾构隧道以接头 1 张开量、接头 2 张开量、接头 3 张开量为指标的结构易损性曲线。位于腰部的隧道接头 2 的最高损伤状态超越  $D_2$  损伤等级的上限, 达到  $D_3$  损伤状态。而位于拱顶与拱底的隧道接头 1 与接头 3, 其最高的损伤状态超越  $D_1$  损伤等级的上限达到  $D_2$  损伤状态。接头 2 张开量的损伤状态超越  $D_0$  损伤等级上限的概率随着地表超载水平的增加迅速增加, 当地表超载水平为 60 kPa 时, 接头 2 张开量超越  $D_0$  损伤等级上限的概率几乎达到 100%。接头 2 的损伤状态超越  $D_1$  与  $D_2$  损伤等级上限的概率曲线表现出了相似的变化趋势。当地表超载水平达到 200 kPa 时, 接头 2 张开量的损伤状态超越  $D_1$  损伤等级上限的概率约 94%, 超越  $D_2$  损伤等级上限的概率约 67%。接头 1 与接头 3 张开量的易损性曲线呈现出类似趋势, 对于接头 1, 当地表超载水平达到 200 kPa 时, 接头 1 张开量超越  $D_0$  损伤等级上限的概率约 85%, 超越  $D_1$  损伤等级上限的概率约 63%; 对于接头 3, 当地表超载水平达到 200 kPa 时, 接头 3 张开量超越  $D_0$  损伤等级上限的概率已接近 100%, 超越  $D_1$  损伤等级上限的概率约 78%。比较不同接头的易损性曲线可以发现: 同一地表超载水平与损伤等级下接头 2 的超越概率最高, 其次为接头 3, 最低为接头 1。对应损伤等级为  $D_1$  时, 当地表超载水平达到 200 kPa 时, 接头 2 超越损伤等级上限的概率比接头 3 高约 16%, 比接头 1 高约 31%。

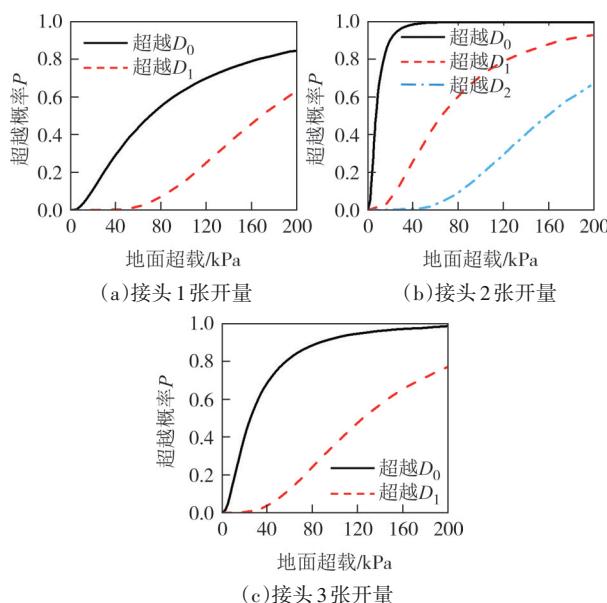


图 6 钢筋锈蚀率为 20% 时盾构隧道结构易损性曲线

Fig.6 Fragility curve of shield tunnel when the corrosion rate of steel bar is 20%

### 3.2 钢筋锈蚀率为 50% 时隧道结构易损性曲线

图 7(a)~(c) 分别展示了当钢筋锈蚀率为 50% 时, 锈蚀盾构隧道结构以接头 1 张开量、接头 2 张开量、接头 3 张开量为指标的结构易损性曲线。从图中可以看出, 位于腰部的接头 2 与拱底的接头 3, 其最高损伤状态超越  $D_2$  损伤等级达到  $D_3$  损伤状态, 位于顶部的接头 1 最高损伤状态超越  $D_1$  损伤等级达到  $D_2$  损伤状态。由于钢筋锈蚀程度的增加, 接头 2 即使未遭受地表超载作用时其张开量的损伤状态已超越了  $D_0$  损伤等级上限。随着地表超载水平的增加, 接头 2 张开量超越  $D_1$  损伤等级上限的概率迅速增加, 当地表超载水平达到 200 kPa 时已达到约 98%, 此时其超越  $D_2$  损伤等级上限的概率约为 78%。接头 3 的易损性曲线与接头 2 表现出相似的趋势, 总体超越概率小于接头 2。当地表超载水平达到 200 kPa 时, 超越  $D_1$  损伤等级上限的概率约为 83%, 超越  $D_2$  损伤等级上限的概率约为 61%。接头 1 未出现损伤状态超越  $D_2$  损伤等级上限的情况。当地表超载水平达到 200 kPa 时, 接头 1 损伤状态超越  $D_0$  损伤等级上限的概率约为 95%, 超越  $D_1$  损伤等级上限的概率约为 74%。比较三个不同位置的接头, 对应损伤状态为  $D_1$  时, 当地表超载水平达到 200 kPa 时, 接头 2 的损伤概率比接头 3 高约 15%, 比接头 1 高约 24%。

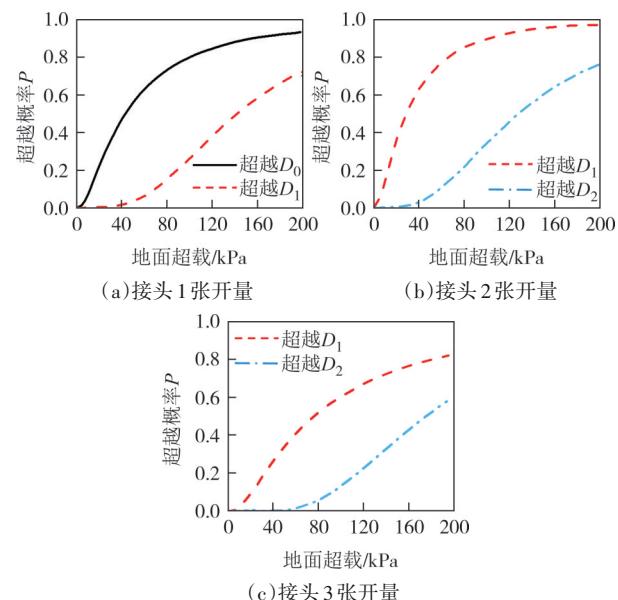


图 7 钢筋锈蚀率为 50% 时盾构隧道结构易损性曲线

Fig.7 Fragility curve of shield tunnel when the corrosion rate of steel bar is 50%

### 3.3 钢筋锈蚀率为 70% 时隧道结构易损性曲线

图 8(a)~(c) 分别展示了当钢筋锈蚀率为 70% 时, 锈蚀盾构隧道以接头 1 张开量、接头 2 张开量、接

头3张开量为指标时的结构易损性曲线.位于腰部的接头2与位于底部的接头3的最高损伤状态超越 $D_2$ 损伤等级上限达到 $D_3$ 损伤等级.位于拱顶的接头1最高损伤状态超越 $D_1$ 损伤等级上限达到 $D_2$ 损伤等级.接头2张开量超越 $D_0$ 损伤等级上限的概率始终为100%,超越 $D_1$ 损伤等级上限的概率快速上升并在地表超载水平达到200 kPa时接近100%,超越 $D_2$ 损伤等级上限的概率在地表超载水平达到200 kPa时约为79%.接头3表现出相似的趋势,即接头3张开量始终超过 $D_0$ 损伤等级.当地表超载水平达到200 kPa后,接头3张开量超越 $D_1$ 损伤等级上限的概率约90%,超越 $D_2$ 损伤等级上限的概率约70%.对于接头1,当地表超载水平达到200 kPa时,接头1张开量超越 $D_0$ 损伤等级上限的概率约95%,超越 $D_1$ 损伤等级的概率约74%.相同损伤等级下接头2的超越概率最高,对应隧道损伤状态为 $D_1$ 时,当地表超载水平达到200 kPa时,接头2的损伤概率比接头3高约10%,比接头1高约25%.

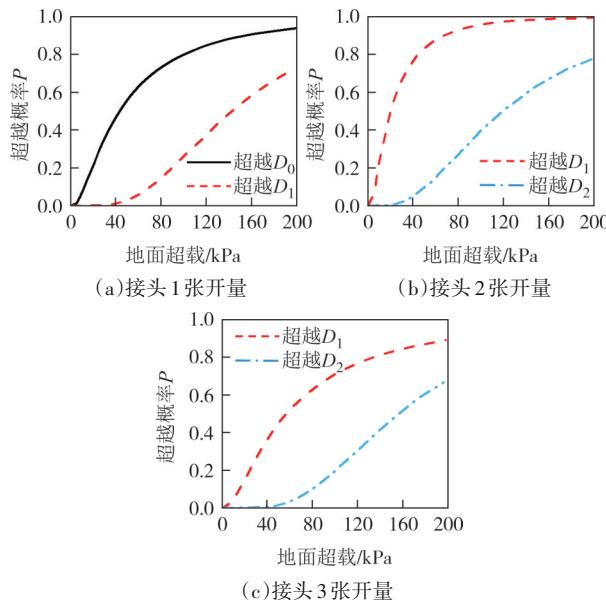


图8 钢筋锈蚀率为70%时盾构隧道结构易损性曲线

Fig.8 Fragility curve of shield tunnel when the corrosion rate of steel bar is 70%

上述研究表明,在同一钢筋锈蚀率下,隧道内拱顶接头、腰部接头与拱底接头超越某一特定损伤等级的概率均随着地表超载水平的增加而增加.同时,对比同一工况下不同位置接头的损伤概率,腰部接头比拱顶或拱底接头具有更高的损伤概率.

### 3.4 不同钢筋锈蚀率下隧道结构易损性对比

本节分别选取了50 kPa、100 kPa、150 kPa与

200 kPa的地表超载水平,对不同钢筋锈蚀率下结构损伤状态超越 $D_0$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 损伤等级上限的概率进行了对比分析,揭示了不同钢筋锈蚀率对盾构隧道易损性的影响规律,对比结果如图9~图11所示.

图9(a)~(c)分别给出了接头1、接头2与接头3对应的不同钢筋锈蚀率下隧道结构损伤状态超越 $D_0$ 损伤等级上限的概率.从图中可以看出,随着钢筋锈蚀率的增加,锈蚀盾构隧道的损伤概率逐渐增加.

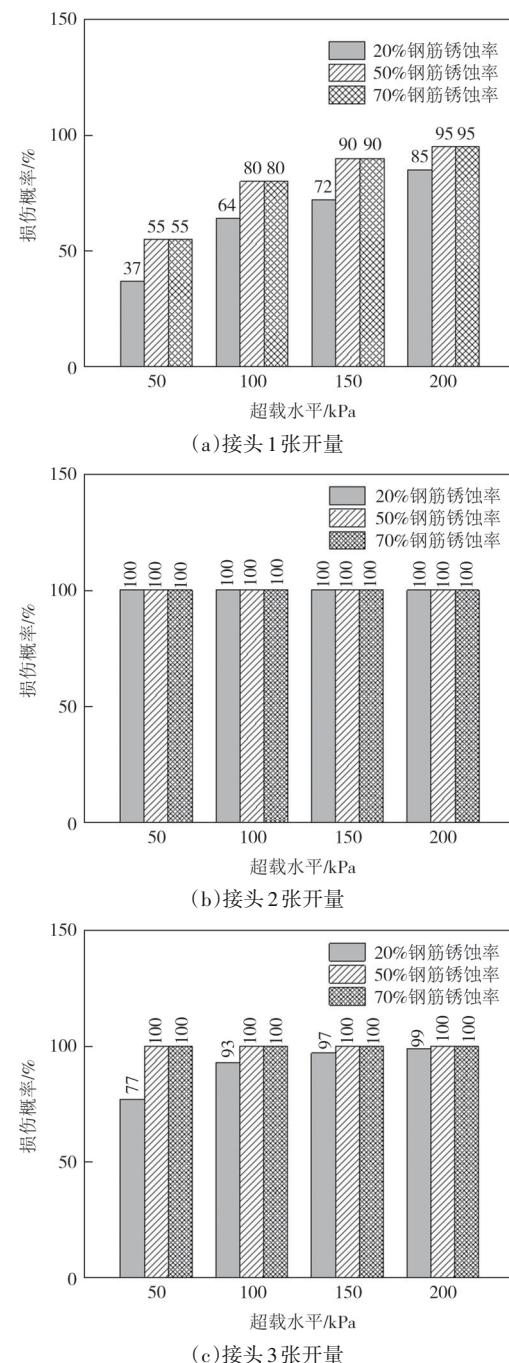


图9 不同钢筋锈蚀率隧道结构损伤指标超越 $D_0$ 的概率

Fig.9 Probability of structure damage index reaching  $D_0$  level under different reinforcement corrosion rate

当以接头 1 张开量为损伤指标, 地表超载水平达到 50 kPa 时, 钢筋锈蚀率为 20% 时结构损伤概率为 37%, 较钢筋锈蚀率为 50% 与 70% 时低 18%, 地表超载水平达到 200 kPa, 钢筋锈蚀率为 20% 时结构损伤概率为 85%, 较钢筋锈蚀率为 50% 与 70% 时低 10%; 当以接头 2 张开量为损伤指标时, 在所有情况下, 结构损伤指标超越  $D_1$  损伤等级的概率均为 100%; 当以接头 3 张开量为损伤指标时, 钢筋锈蚀率为 20% 时, 结构损伤概率在地表超载水平为 50 kPa 时达到 77%, 地表超载水平为 200 kPa 时达到 99%, 钢筋锈蚀率超过 50% 时, 隧道结构损伤状态超越  $D_1$  损伤等级的概率始终为 100%.

图 10(a)~(c) 分别给出了接头 1、接头 2 与接头 3 对应的不同钢筋锈蚀率下隧道结构损伤超越  $D_1$  等级上限的超越概率. 当以接头 1 张开量为损伤指标时, 地表超载水平达到 50 kPa 时, 在三种钢筋锈蚀率下, 隧道结构达到该损伤等级的概率均较低, 地表超载水平达到 200 kPa, 钢筋锈蚀率为 20% 时, 结构损伤概率为 62%, 较钢筋锈蚀率为 50% 与 70% 时低 12%; 当以接头 2 张开量为损伤指标时, 地表超载水平达到 50 kPa, 钢筋锈蚀率为 20% 时, 结构损伤概率为 37%, 较钢筋锈蚀率为 50% 与 70% 时分别低 34% 与 47%, 地表超载水平达到 200 kPa, 钢筋锈蚀率为 20% 时, 结构损伤概率为 94%, 而钢筋锈蚀率为 50% 或 70% 时, 结构损伤概率几乎接近 100%; 当以接头 3 张开量为损伤指标时, 地表超载水平达到 50 kPa, 钢筋锈蚀率为 20% 时, 结构损伤概率为 7%, 较钢筋锈蚀率为 50% 与 70% 时分别低 28% 与 38%, 地表超载水平达到 200 kPa 时, 钢筋锈蚀率为 20% 时, 结构损伤概率为 78%, 较钢筋锈蚀率为 50% 与 70% 时分别低 5% 与 12%.

图 11(a)~(c) 分别给出了接头 1、接头 2 与接头 3 对应的不同钢筋锈蚀率下隧道结构损伤超越  $D_2$  等级上限的超越概率. 当以接头 1 张开量为损伤指标时, 在所有工况下盾构隧道均未超越  $D_2$  等级的损伤状态; 当以接头 2 张开量为损伤指标时, 地表超载水平为 50 kPa, 钢筋锈蚀率为 20% 时盾构隧道结构损伤概率为 1%, 较钢筋锈蚀率为 50% 或 70% 时分别低 5% 与 9%, 地表超载水平为 200 kPa, 钢筋锈蚀率为 20% 时盾构隧道结构损伤概率为 67%, 较钢筋锈蚀率为 50% 与 70% 时分别低 21% 与 22%; 当以接头 3

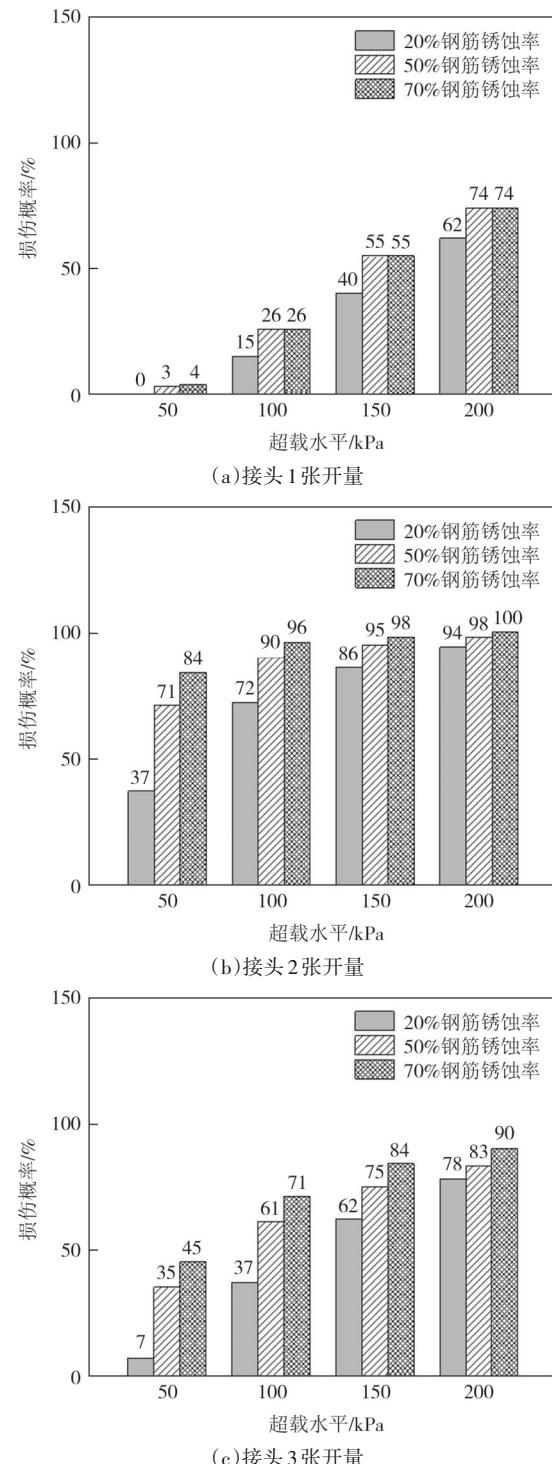


图 10 不同钢筋锈蚀率隧道结构损伤指标超越  $D_1$  的概率  
Fig.10 Probability of structure damage index reaching  $D_1$  level under different reinforcement corrosion rate

张开量为损伤指标时, 钢筋锈蚀率为 20% 时, 盾构隧道结构在地表超载水平低于 200 kPa 时均未达到  $D_2$  损伤状态, 钢筋锈蚀率为 70% 时, 地表超载在 50 kPa 的水平下, 结构损伤概率为 2%, 超载水平为 200 kPa 时, 结构损伤概率为 70%.

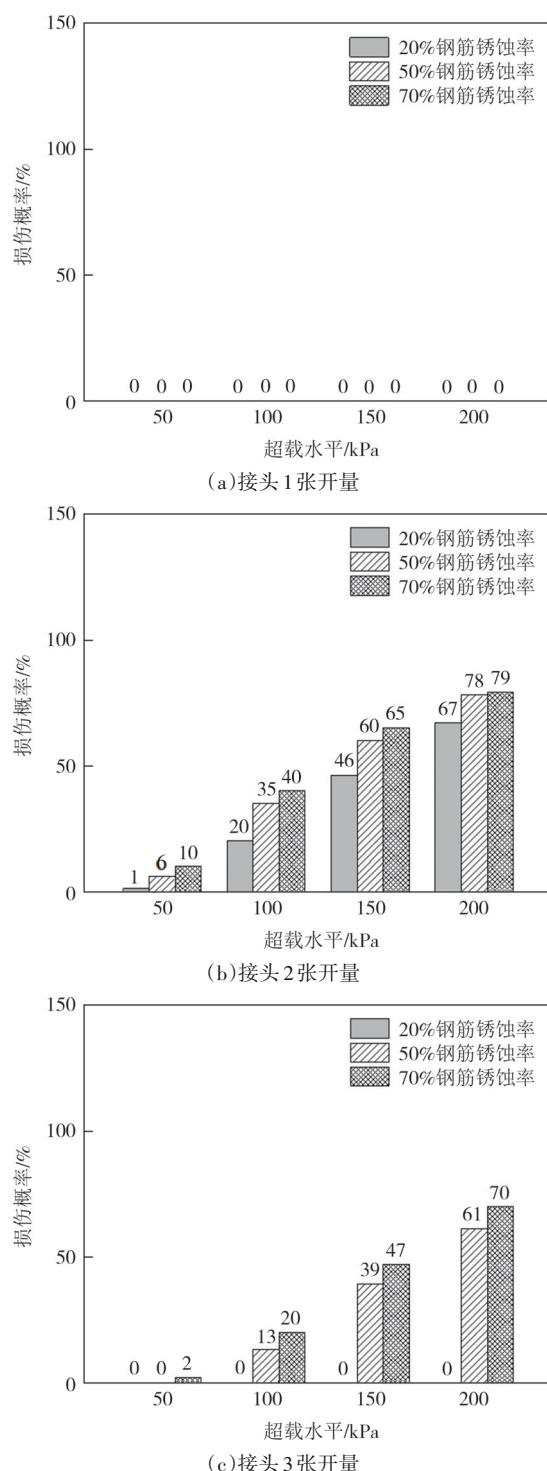


图11 不同钢筋锈蚀率隧道结构损伤指标超越 $D_2$ 的概率  
Fig.11 Probability of structure damage index reaching  $D_2$  level under different reinforcement corrosion rate

#### 4 结论

本文构建了超载条件下锈蚀盾构隧道易损性分析方法,并基于大量数值计算研究了超载条件下不

同锈蚀盾构隧道结构易损性发展规律。得出的主要结论如下:

- 1) 锈蚀盾构隧道的易损性随着地表超载水平的增大而增大,在同一地表超载水平下,随着钢筋锈蚀率的增加,隧道结构易损性逐渐增加。
- 2) 当地表超载较小时,钢筋锈蚀对隧道易损性的影响更为突出。例如,当地表超载水平为200 kPa时,钢筋锈蚀率为70%接头1发生超越 $D_0$ 损伤等级的概率较钢筋锈蚀率为20%时高10%,而当地表超载水平为50 kPa时,对应的差值增加为18%。

3) 在相同工况下,隧道腰部接头相对于拱顶与拱底上限接头具有更高的损伤概率。例如,当地表超载水平为200 kPa时,20%钢筋锈蚀率下腰部接头张开量超越 $D_1$ 损伤等级上限的概率为94%,而位于拱顶与拱底接头超越概率分别为63%与78%。因此,在盾构隧道日常运营维护中应加强对腰部接头的监测与保护。

#### 参考文献

- [1] HUANG H W, ZHANG D M. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51(1): 301-312.
- [2] 邵华,黄宏伟,张东明,等.突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J].岩土工程学报,2016,38(6):1036-1043.
- [3] SHAO H, HUANG H W, ZHANG D M, et al. Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (6) : 1036-1043. (in Chinese)
- [4] 房营光,孙钧.地面荷载下浅埋隧道围岩的粘弹性应力和变形分析[J].岩石力学与工程学报,1998,17(3):239-247.
- [5] FANG Y G, SUN J. Analysis of visco-elastic stress and deformation of surrounding rocks for shallow tunnel under ground load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 239-247. (in Chinese)
- [6] 姜启元,管攀峰,叶蓉.软土盾构隧道的纵向变形分析[J].地下工程与隧道,1999, 2(4): 21-46.
- [7] JIANG Q Y, GUAN P F, YE R. The analysis of longitudinal deformation of shield tunnel in soft soil [J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999, 2(4): 21-46. (in Chinese)
- [8] 康成,梅国雄,梁荣柱,等.地表临时堆载诱发下既有盾构隧道纵向变形分析[J].岩土力学,2018, 39(12): 4605-4616.
- [9] KANG C, MEI G X, LIANG R Z, et al. Analysis of the longitudinal deformation of existing shield tunnel induced by temporary surface surcharge [J]. Rock and Soil Mechanics,

- 2018, 39(12): 4605–4616. (in Chinese)
- [6] 魏纲, 张书鸣, 余剑英, 等. 地面堆载对盾构隧道围压影响的模型试验与理论分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1789–1798.
- WEI G, ZHANG S M, YU J Y, et al. Model tests and theoretical analyses of influences of surface surcharge on confining pressure of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(10): 1789–1798. (in Chinese)
- [7] YAMAMOTO K, LYAMIN A V, WILSON D W, et al. Stability of a circular tunnel in cohesive-frictional soil subjected to surcharge loading[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(4): 504–514.
- [8] 叶耀东. 软土地区运营地铁盾构隧道结构变形及健康诊断方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- YE Y D. Study on structural deformation and health diagnosis of shield tunnel in soft soil area [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [9] 张东明, 代鉤锋, 王慧, 等. 考虑地层变异的浅基础承载力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(5): 1412–1419.
- ZHANG D M, DAI H F, WANG H, et al. Analysis on shallow foundation capacity considering geological heterogeneity [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(5): 1412–1419. (in Chinese)
- [10] 王如路, 张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1092–1101.
- WANG R L, ZHANG D M. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1092–1101. (in Chinese)
- [11] 柳献, 张浩立, 鲁亮, 等. 超载工况下盾构隧道结构承载能力的试验研究[J]. 地下工程与隧道, 2013, 4(1): 10–15.
- LIU X, ZHANG H L, LU L, et al. Experimental study on bearing capacity of shield tunnel structure under overload condition [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2013, 4(1): 10–15. (in Chinese)
- [12] 吴庆, 杜守继. 地面堆载对既有盾构隧道结构影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 57–66.
- WU Q, DU S J. Model test on influence of ground heaped load on existing shield tunnel structure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 57–66. (in Chinese)
- [13] 黄大维, 周顺华, 赖国泉, 等. 地表超载作用下盾构隧道劣化机理与特性[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1173–1181.
- HUANG D W, ZHOU S H, LAI G Q, et al. Mechanisms and characteristics for deterioration of shield tunnels under surface surcharge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1173–1181. (in Chinese)
- [14] 刘四进, 何川, 封坤, 等. 受荷状态下盾构隧道管片锈蚀劣化破坏过程研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(6): 120–128.
- LIU S J, HE C, FENG K, et al. Research on corrosion deterioration and failure process of shield tunnel segments under loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(6): 120–128. (in Chinese)
- [15] HE Z S, AKIYAMA M, HE C, et al. Life-cycle reliability analysis of shield tunnels in coastal regions: emphasis on flexural performance of deteriorating segmental linings [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(7): 851–871.
- [16] NIELSON B G, DESROCHES R. Analytical seismic fragility curves for typical bridges in the central and southeastern United States [J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(3): 615–633.
- [17] 吴俊陶. 基于易损性的某连体复杂超高层结构强震损伤控制[D]. 广州: 广州大学, 2021.
- WU J T. Study on seismic damage control of connected super high-rise structure base on seismic fragility analysis [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021. (in Chinese)
- [18] 沈贤达. 软土盾构隧道结构易损性分析[D]. 上海: 同济大学, 2015.
- SHEN X D. Vulnerability analysis of shield tunnel in soft soil [D]. Shanghai: Tongji University, 2015. (in Chinese)
- [19] 禹海涛, 李心熙, 袁勇, 等. 沉管隧道纵向地震易损性分析方法 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(10): 13–22.
- YU H T, LI X X, YUAN Y, et al. Seismic vulnerability analysis method for longitudinal response of immersed tunnels [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(10): 13–22. (in Chinese)
- [20] NIBS. HAZUS–MH: Technical manuals [M]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Science, 2004.
- [21] CABRERA J G. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion [J]. Cement and Concrete Composites, 1996, 18(1): 47–59.
- [22] BALLIM Y, REID J C. Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams—an experimental critique of current test methods [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(6): 625–632.