DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260470

氯离子侵蚀作用下公路隧道抗震韧性分析

蒋周宸
(诸暨市公路与运输管理中心,浙江 绍兴 311800)

摘　要: 针对氯离子侵蚀作用下公路隧道的抗震性能退化与韧性评估问题,在充分考虑材料劣化效应的基础上,开展隧道抗震韧性分析。基于Fick第二定律与钢筋锈蚀模型,提出材料性能退化的预测方法,揭示氯离子侵蚀作用下钢筋锈蚀的起始时间、锈蚀速率与强度折减规律,并据此建立隧道的地震易损性分析框架;依据损伤指数划分隧道结构的损伤等级,获取不同服役年限下隧道的地震易损性曲线;结合隧道震后功能恢复过程中的韧性指标,量化氯离子侵蚀对隧道抗震韧性的影响,形成全寿命周期抗震韧性评估方法。结果表明,随着隧道服役年限的增长,其关键部位达到损伤等级的超越概率呈非线性上升趋势,当钢筋"脱钝"后,氯离子的侵蚀速率显著加快;隧道的抗震韧性随地震动强度的增大而降低,氯离子的侵蚀效应显著;在相同地震动的作用下,隧道服役100年时的韧性,相较于初始状态,降低32.08%,抗震性能退化呈现前期缓慢、后期加速的特征。

关键词: 隧道工程;氯离子侵蚀;抗震韧性;地震易损性;材料性能退化
中图分类号: U452　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0213-07

Analysis on Seismic Resilience of Highway Tunnels under Action of Chloride Ion Erosion

JIANG Zhouchen
(Jiujiu City Road and Transportation Management Center, Shaoxing 311800, China)

Abstract: Regarding the issue of the degradation of the seismic performance and the assessment of resilience of highway tunnels under the action of chloride ion erosion, an analysis is conducted on the seismic resilience of tunnels considering material deterioration. Based on Fick second law and the steel bar corrosion model, a method for predicting the degradation of material properties is proposed to reveal the initiation time, corrosion rate and strength reduction laws of steel bars under chloride ion erosion. And based on this, the seismic vulnerability analysis framework of the tunnel is established. The damage state is divided by the damage index to obtain the vulnerability curves of tunnels with different service periods. Combined with the resilience indicators during the post-earthquake functional recovery process of tunnels, the impact of chloride ion erosion on the seismic resilience of tunnels is quantified, and a full-life seismic resilience assessment method is formed. The results show that with the increase of the service life of the tunnel, the probability of exceeding the damage grade of its key parts shows a non-linear upward trend. When the steel bars become "blunted", the erosion rate of chloride ions significantly accelerates. The seismic resilience of the tunnel decreases as the intensity of seismic motion increases, and the erosion effect of chloride ions is significant. Under the same seismic motion, the resilience of the tunnel after 100 years of service decreases by 32. 08% compared to the initial state, and the degradation of seismic performance shows the characteristics of being slow in the early stage and accelerating in the later stage.

Keywords: tunnel engineering; chloride ion erosion; seismic resilience; seismic vulnerability; material property degradation

0　引　言

公路隧道是交通网络中的关键节点,其长期运营安全,对支撑社会经济稳定运行、维护生命线工程安全可靠至关重要[1]。我国位于地震带交会区域,强震频发,隧道工程面临严峻的地震威胁。与此同时,在沿海地区、盐渍环境地区及使用除冰盐的地区,氯离子侵蚀成为衬砌混凝土性能退化的主要原因之一。氯离子渗透至钢筋表面并积累一定浓度后易诱发钢筋锈蚀,导致材料的力学性能发生劣化,削弱钢筋结构的承载能力和耐久性能[2]。地震动的影

收稿日期: 2026-04-29
作者简介: 蒋周宸(1996—),男,学士,工程师,从事隧道安全评估及养护等方面的工作。

响与氯盐环境的侵蚀，使得隧道的抗震性能随时间推移呈现复杂的退化特征。仅关注隧道初始的抗震能力，已不足以评估其全寿命周期的抗震性能与安全风险。因此，开展氯离子侵蚀作用下的隧道抗震韧性研究，具有重要的科学理论意义与工程实践价值。

近年来隧道抗震分析和耐久性研究已成为国内外学者关注的重点。目前，该领域研究已取得一系列新进展[3-4]。在抗震分析方面，相关研究多关注完好状态下隧道结构的地震响应机理、易损性及抗震设计方法。例如，苏雷等[5]采用增量动力分析法，对沉管隧道的地震易损性进行系统分析；赵杰等[6]分析了土—结构的相互作用，以及地基不均匀沉降对沉管隧道抗震性能的影响；曹翔鹏等[7]采用隐式动力时程法，研究大直径盾构隧道双层衬砌的横向抗震性能。在耐久性方面，学者基于Fick扩散定律、电化学理论等，建立了材料性能退化模型，并研究其对结构静力承载力的影响[8]。

然而，现有研究大多将抗震分析与耐久性评估割裂开展，未能充分耦合地震动力作用与氯盐环境侵蚀的时变效应，对隧道抗震性能退化的关注多集中于其承载能力方面，缺乏从“抗震韧性”视角对隧道结构功能维持与震后恢复能力的量化评估。在抗震韧性方面，伴随“韧性城市”理念的发展，抗震韧性强调，结构不仅应具备抵御破坏的能力，还应具备快速恢复功能的能力。韧性评估的核心在于量化功能损失与全周期恢复过程，常采用基于功能时程积分的韧性指标[9]。该理念在桥梁、建筑领域已获得初步应用[10]，但在隧道抗震韧性研究领域仍处于起步阶段。

尽管现有研究在该领域已取得了重要成果，但仍存在3点不足：其一，氯离子侵蚀作用下的材料性能退化研究，主要聚焦材料的静力承载力，未将其与地震动作用耦合；其二，地震易损性分析多假设材料性能不变，忽视了氯离子长期侵蚀造成的结构抗震性能的时变退化；其三，抗震韧性评估鲜有考虑氯离子侵蚀对隧道震后恢复能力的削弱效应。尤其是三者耦合作用下的时变性能与韧性演化研究尚处于起步阶段，如何将“氯离子扩散—钢筋锈蚀—材料劣化”的时变过程与地震易损性及震后隧道结构功能的恢复，统一纳入全寿命周期韧性评估框架，目前尚缺乏系统的理论方法和定量分析手段。

基于此，本文充分考虑氯离子侵蚀对材料性能时变退化的影响，建立隧道抗震韧性全寿命周期评估方法，揭示氯离子侵蚀环境下，隧道抗震性能与可恢复性的长期演化规律。本文集成“氯离子扩散—钢筋锈蚀—材料劣化”模型，构建材料参数时变折减的地震易损性分析框架；引入震后隧道结构功能恢复过程的韧性指标，建立“材料时变退化—地震易损性演化—抗震韧性定量”的全过程量化框架；以实际公路隧道为例，定量揭示氯离子侵蚀作用对隧道抗震韧性的长期衰减规律，为隧道的耐久性设计、全寿命周期性能评估及抗震韧性提升提供依据。

1　氯离子侵蚀作用与材料性能退化分析

1.1　氯离子侵蚀机理

在长期服役荷载与氯盐侵蚀环境的耦合作用下，隧道衬砌材料发生渐进式性能劣化，而氯离子渗透诱发的钢筋锈蚀是关键因素之一[11]。氯离子侵蚀过程如图1所示[12]。

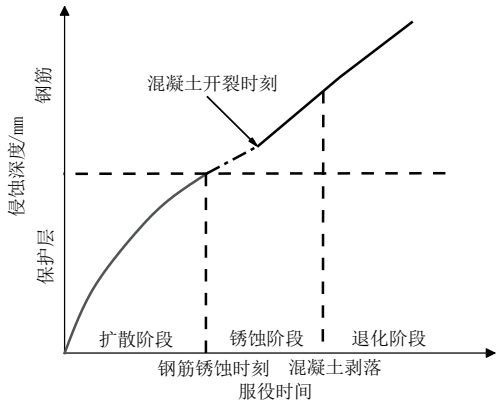


图1　氯离子侵蚀过程示意图

确定钢筋的起始锈蚀时间，是评估混凝土结构耐久性的关键。氯离子在混凝土中的扩散遵循Fick第二定律[13]，即：

$$\frac{\partial C_{Cl}(x,t)}{\partial t}=\alpha\frac{\partial^2 C_{Cl}(x,t)}{\partial x^2} \tag{1}$$

式中：$C_{Cl}(x,t)$为t时刻、距离混凝土表面深度x处的氯离子浓度；x、α分别为氯离子的扩散深度与子扩散系数。

假设初始状态下混凝土内部的氯离子浓度为零，表面浓度C_s可表示为[13]

$$C_s=\varepsilon_1\left(\frac{w}{b}\right)+\varepsilon_2 \tag{2}$$

式中：w/b为水胶比；ε_1、ε_2为环境系数。

结合边界条件，计算得到t时刻钢筋表面（距离

混凝土表面深度 c 处）的氯离子浓度 C_{Cl} 为

$$C_{Cl}(c,t)=C_s\left[1-\mathrm{erf}\left(\frac{c}{2\sqrt{\alpha t}}\right)\right] \tag{3}$$

式中：erf(·)为误差函数。

若钢筋锈蚀的临界氯离子浓度为 C_{cr}，则钢筋的起始锈蚀时间 t_{ini} 为

$$t_{ini}=\frac{c^2}{4\alpha\left[\mathrm{erf}\left(\frac{C_s-C_{cr}}{C_s}\right)\right]^2} \tag{4}$$

1.2　钢筋锈蚀的机理

钢筋锈蚀的过程主要表现为钢筋有效受力截面面积逐渐减小，即钢筋发生直径方向的锈损。基于均匀锈蚀模型分析，发生锈蚀后，钢筋的剩余直径 $d(t)$ 可表示为

$$d(t)=\begin{cases}d_0, & t\leqslant T_{cor}\\ d_0-2v_{cor}(t-T_{cor}), & T_{cor}<t\leqslant \dfrac{d_0}{2v_{cor}}+T_{cor}\\ 0, & t>\dfrac{d_0}{2v_{cor}}+T_{cor}\end{cases} \tag{5}$$

式中：d_0 为钢筋的初始直径；v_{cor} 为锈蚀速率，可通过式（6）计算得到[14]。

$$v_{cor}=\begin{cases}0.011\,7i_{cor}, & t<T_{cor}\\ 0.029\,3i_{cor}, & t\geqslant T_{cor}\end{cases} \tag{6}$$

式中：i_{cor} 为锈蚀电流密度，可通过式（7）得到。

$$i_{cor}(t)=0.85\times\frac{37.8\times\left(1-\frac{w}{b}\right)}{d_0}\times(t-T_{cor})^{-0.29} \tag{7}$$

由此，t 时刻钢筋的锈蚀面积 A_{cor} 为

$$A_{cor}(t)=\frac{\pi}{4}\left[d_0^2-d(t)^2\right] \tag{8}$$

1.3　材料性能退化规律

锈蚀后钢筋的屈服强度 f_y 与极限强度 f_u 会随钢筋锈蚀率 η（锈蚀面积与初始截面面积 A_0 之比，具体计算见公式 10）的增大而逐渐减小。根据 Du 等[15]的试验结果，f_y 与 f_u 可通过如下折减模型得到：

$$\begin{cases}f_y=(1-\beta_y\eta)f_{y0}\\ f_u=(1-\beta_u\eta)f_{u0}\end{cases} \tag{9}$$

式中：β_y=0.004 9，β_u=0.006 5，均为折减系数；f_{y0}、f_{u0} 分别为未锈蚀钢筋的屈服强度与极限强度。

$$\eta=\frac{A_{cor}}{A_0} \tag{10}$$

式中：A_0 为锈蚀前的钢筋截面面积。

采用 Coronelli 等[16]提出的分析模型，锈蚀后混凝土的抗压强度 f_{ccor} 可表示为

$$f_{ccor}=\frac{f_c}{1+0.1\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}} \tag{11}$$

式中：f_c 为未锈蚀混凝土的抗压强度；ε_0、ε_1 分别为混凝土的峰值应变与平均拉应变，ε_1 可依据锈胀裂缝宽度估算[16]。

2　公路隧道抗震韧性的理论分析

抗震韧性不仅强调抗震安全性，而且关注震后结构功能的可恢复性。在隧道工程中，抗震韧性通常可采用韧性指标 R 进行定量评估。该指标基于结构在灾害扰动下的功能时程曲线，通过积分计算得到。具体表达如式（12）所示：

$$R=\frac{1}{t_{re}}\int_{t_0}^{t_0+t_{re}}Q(t)\mathrm{d}t \tag{12}$$

式中：t_0、t_{re} 分别为地震发生时刻与系统功能恢复至预定水平的时刻；$Q(t)$ 为隧道性能可恢复性曲线，可通过式（13）计算得到。

$$Q(t)=\sum_{i=1}^{4}Q_d(ds_i|t)P_f(ds\geqslant ds_i|I_M) \tag{13}$$

式中：I_M 为地震动的强度指标；ds_i 为第 i 级损伤状态；$Q_d(ds_i|t)$ 为从 t 时刻启动修复时，隧道处于损伤状态 ds_i 下的性能百分比，该值通过隧道功能的恢复函数确定（无损状态下该值为 1）；P_f 为隧道在地震动强度指标 I_M 下达到或超越某一损伤状态的概率，该值可通过地震易损性曲线得到，见式（14）。

$$P_f=\Phi\left[\frac{a\ln(I_M)-\ln(\mu_c)+b}{\sqrt{\beta_C^2+\beta_D^2}}\right] \tag{14}$$

式中：$\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数；β_C 可取为 0.5；β_D 可按式（15）计算。

$$\beta_D=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\ln E_{DP_i}-\ln(b\cdot I_M^{\,2})\right]^2}{n-2}} \tag{15}$$

式中：E_{DP_i} 为第 i 个结构的地震响应峰值。

隧道功能恢复函数是用于评估隧道抗震韧性的关键数学模型，旨在量化震后隧道运营功能的恢复过程。本文采用 Cimellaro 等[17]提出的指数经验型震后功能恢复函数，计算如式（16）所示：

$$f_{rec}=\alpha\cdot e^{\left[-b\cdot(t-t_0)/t_{re}\right]} \tag{16}$$

式中：a、b 均为拟合参数。

3　工程案例分析

3.1　工程背景

本文选取国内某高速公路隧道工程为研究对

象，隧道全长486 m，最大埋深为96 m。隧道初期支护与二次衬砌的材料力学参数，以及围岩的物理力学参数分别如表1、表2所示。隧道工程的场地抗震设防烈度为8度。

表1　隧道初期支护与二次衬砌的材料力学参数

衬砌	钢筋			混凝土		
	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	等效模量/GPa	衬砌厚度/m	弹性模量/GPa	泊松比
初期支护	—	—	9.2	0.3	23	0.2
二次衬砌	360	200	—	0.5	30	0.2

表2　隧道围岩的物理力学参数

材料类型	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	侧压力系数
Ⅳ级围岩	6	0.30	0.5	0.40

本文借助ABAQUS软件，完成隧道平面应变有限元模型的构建（见图2）。模型的几何尺寸取隧道外径的3～5倍（宽80 m，高60 m），以消除边界效应。模型将围岩与初期支护视为遵循Mohr-Coulomb准则的弹塑性体，并采用4节点平面应变单元（CPE4）进行离散。二次衬砌采用2节点弹性梁单元（B21）进行等效模拟。围岩单元数量为3 840个，初期支护单元数量为240个，二次衬砌梁单元数量为120个。模型底部及两侧设置无限元边界（CINPE4），以减小边界反射效应，避免静—动力分析转换过程中产生的误差。此外，为体现氯离子的侵蚀效应，分析中初期支护的弹性模量进行了相应折减。

根据场地的抗震设防烈度（8度），本文选取了10条实测地震波，峰值加速度PGA按0.1g、0.2g、0.35g、0.4g、0.5g、0.6g、0.8g调幅。地震动持时统一取20 s，时间步长设置为0.02 s。采用瑞利阻尼，阻尼比取5%，通过前两阶自振频率对应的半功率带宽计算模态阻尼系数。

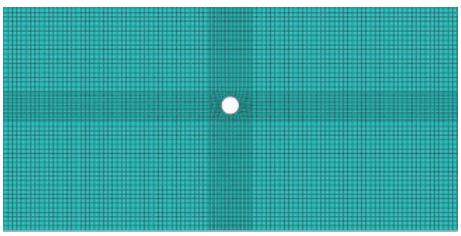


图2　隧道有限元模型

3.2　氯离子侵蚀作用下的隧道地震易损性分析

在对隧道展开地震易损性分析前，需首先明确其损伤状态的划分标准，这是确保易损性分析结果准确性的重要前提。本文引入损伤指数S_{DI}，作为隧道损伤状态的量化指标[18]。该指数通过隧道关键截面（以衬砌截面为代表）的实际弯矩M与其抗弯承载力M_R的比值进行定义。具体计算公式如下：

$$S_{DI}=\frac{M}{M_R} \tag{17}$$

该指标选取的依据如下。

3.2.1　理论依据

隧道衬砌这类以受弯为主的细长薄壁结构，在地震作用下的主要破坏模式为截面弯矩超过截面抗弯承载力，发生弯曲破坏。弯矩是衡量衬砌截面安全性的关键内力指标。弯矩比能够直观反映当前荷载下，结构截面的受力弯矩与极限抗弯承载力之间的相对关系。

3.2.2　规范对比验证

根据《公路隧道抗震设计规范》（JTG 2232—2019）及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362—2018）的规定，衬砌截面在承载能力极限状态下的安全系数K与S_{DI}存在对应关系：$S_{DI}=1/K$。当$S_{DI}=1.0$时，对应规范中的“安全系数下限值”，即承载能力的极限状态临界点；当$S_{DI}=1.5\sim2.5$时，对应安全系数为0.40～0.67，表明截面已进入塑性发展阶段；当$S_{DI}\geqslant3.5$时，对应安全系数低于0.29，表明截面接近或达到极限破坏状态。

基于S_{DI}值的范围，参考《公路隧道抗震设计规范》中关于衬砌损伤等级的描述，以及既有研究成果[18]，本文将隧道损伤状态划分为5个等级。具体划分结果如表3所示。

表3　损伤状态划分

损伤状态	无损伤	轻微损伤	中等损伤	严重损伤	完全损伤
损伤指数S_{DI}范围	$S_{DI}\leqslant1.0$	$1.0<S_{DI}\leqslant1.5$	$1.5<S_{DI}\leqslant2.5$	$2.5<S_{DI}\leqslant3.5$	$S_{DI}\geqslant3.5$

根据式（14）及表3定义的损伤阈值，本文建立了8度抗震设防烈度下，考虑氯离子侵蚀影响的隧道地震易损性曲线（见图3）。

结果表明，在氯离子的侵蚀作用下，隧道处于不同损伤状态的概率，随其服役年限的增长呈非线性上升趋势。以PGA=0.35g、隧道处于中等损伤状态为例，隧道在服役0年、25年、50年、75年和100年时的损伤超越概率分别为55.29%、56.56%、61.78%、68.42%和76.37%。在服役初期（前25年），损伤概率增长不明显。这主要是因为计算得到的钢筋初始锈

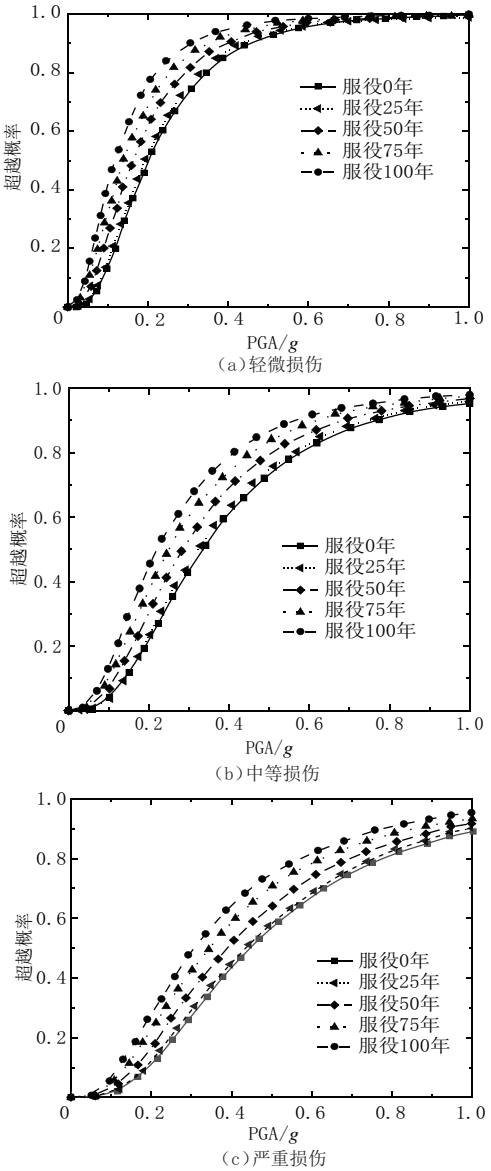


图3　考虑衬砌劣化的隧道地震易损性曲线

蚀时间为23.6年,且在这一阶段,混凝土强度因持续的水化作用略有提高。然而,在服役25年后,随着时间的推移,钢筋锈蚀程度持续加重,使得其力学性能显著下降;同时,混凝土保护层开裂与强度退化速度不断加快,导致隧道在地震作用下的损伤超越概率显著增大。

3.3　氯离子侵蚀作用下的隧道抗震韧性分析

基于前文隧道地震易损性曲线分析及损伤状态划分结果,本节进一步开展考虑氯离子侵蚀作用的隧道抗震韧性定量评估。根据式(12)定义的韧性指标R,结合震后功能恢复模型,本文计算得到不同服役年限下隧道的抗震韧性相关数据。根据图4可知,隧道的抗震韧性具有显著的地震动强度依存性与服役时间敏感性。

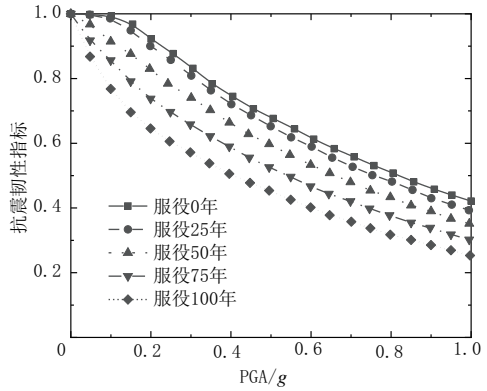


图4　氯离子侵蚀作用下隧道的抗震韧性

3.3.1　抗震韧性指标

抗震韧性指标随PGA的增大呈非线性下降趋势,其退化速率呈现先快后缓的特征。当PGA超过某一临界值后,韧性曲线逐渐趋于平稳,表明结构已进入抗震性能极限状态,功能恢复能力趋于稳定。

3.3.2　抗震性能退化

氯离子的侵蚀作用,显著加速了隧道抗震性能的退化。以PGA=0.4g为例,与服役0年相比,隧道在服役25年、50年、75年和100年时的抗震韧性指标分别下降3.22%、10.87%、20.71%与32.08%,呈现明显的时变劣化规律。

3.3.3　抗震韧性的时变退化

抗震韧性的时变退化过程具有显著的非均匀特征。在服役前25年,抗震韧性指标下降速度较为缓慢,隧道抗震性能的平均年退化率较低。在服役25年后,抗震性能的退化速率显著提升,尤其是在50~75年与75~100年2个阶段,抗震性能衰减程度进一步加剧。这主要是由于服役初期,钢筋尚未发生锈蚀,或锈蚀程度较轻,材料的性能退化尚不明显。但随着时间的推移,钢筋锈蚀程度持续累积,引发混凝土保护层开裂,叠加材料强度劣化效应,最终导致隧道的抗震韧性加速下降。

3.3.4　后期抗震性能加速退化的内在机理

(1)钢筋锈蚀率的非线性增长

根据式(8)~(10),钢筋锈蚀率η与时间t近似呈二次函数关系。在服役初期,钢筋尚未“脱钝”,锈蚀率几乎为零;钢筋“脱钝”后,锈蚀率随着锈蚀电流密度的持续作用而加速增长。当锈蚀率超过5%时,钢筋屈服强度的折减速率加快,导致截面抗弯承载力加速下降。

(2)混凝土保护层开裂的阈值效应

当锈蚀深度达到某一临界值时,混凝土保护层将出现纵向裂缝。在裂缝出现前,混凝土强度的退

化速率较缓；在裂缝出现后，外界的腐蚀介质通过裂缝快速渗透至钢筋表面，形成“锈蚀加速—裂缝扩展—进一步加速锈蚀”的正反馈循环。计算表明，混凝土保护层的开裂时间一般为服役30~35年，这与抗震韧性曲线斜率在30年后出现明显增大的趋势相吻合。

（3）锈胀裂缝与材料劣化的正反馈耦合

裂缝的产生，不仅使混凝土的抗压强度快速下降，还削弱了混凝土对钢筋的约束作用，使钢筋的屈曲风险增大。此外，裂缝区域的有效截面面积减小，导致弯矩作用下的应力集中效应加剧，进一步推高同一地震动强度下隧道的损伤指数S_{DI}。多重劣化机制在服役中后期（50年后）产生叠加效应，使抗震韧性呈现明显的加速衰减特征。

3.4　关键参数敏感性分析

本文选取以下3个关键参数，分别在其合理范围内进行±20%的变动，分析其对韧性指标R（PGA=0.4g，服役100年）的敏感程度：其一，氯离子扩散系数D，影响氯离子的渗透速率，进而决定钢筋的脱钝时间；其二，临界氯离子浓度C_{cr}，决定钢筋起始锈蚀的阈值；其三，锈蚀电流密度i_{cor}，影响钢筋的锈蚀速率及截面面积的损失程度。

敏感性是指参数发生单位相对变化时，韧性所产生的相对变化率。计算结果如表4所示。

表4　关键参数敏感性系数

参数	−20%变动时的韧性变化/%	+20%变动时的韧性变化/%	平均敏感性系数
D	2.31	−2.52	0.121
C_{cr}	−1.86	1.94	0.095
i_{cor}	−1.12	1.08	0.055

由表4可知，氯离子扩散系数对结构抗震韧性的敏感性最高（系数为0.121），因其直接控制氯离子到达钢筋表面的时间，影响钢筋“脱钝”的起始点；临界氯离子浓度的敏感性次之（系数为0.095），反映了不同规范或环境条件下锈蚀阈值的变异性；锈蚀电流密度的敏感性相对较低（系数为0.055），说明锈蚀速率对隧道长期抗震韧性的影响有限，后期抗震性能衰减主要受裂缝扩展等非线性因素影响。

上述敏感性分析结论，对氯离子扩散系数和临界氯离子浓度存在一定的参数依赖性，在实际工程应用中，应通过现场检测，合理标定这2个参数，以提高评估精度。

4　结　论

本文针对氯离子侵蚀作用下公路隧道的抗震性能，开展了系统的时变分析与韧性评估。本文采用理论推导、数值模拟与案例分析相结合的方法，明确了氯离子侵蚀对隧道材料性能、地震易损性及抗震韧性的影响规律，并得出如下主要结论。

（1）揭示了氯离子侵蚀作用下隧道衬砌材料性能的时变退化机制。基于Fick第二定律与钢筋均匀锈蚀模型，本文提出考虑“扩散—锈蚀—退化”全过程的材料性能预测方法，明确了钢筋锈蚀的起始时间、锈蚀速率及材料强度折减规律，为长期服役隧道的抗震性能分析提供了理论依据。

（2）建立了考虑材料劣化效应的隧道地震易损性分析框架。本文通过定义损伤指数（S_{DI}）划分隧道的损伤状态，并结合氯离子侵蚀引起的材料参数时变折减，获取不同服役年限下隧道的地震易损性曲线。分析结果表明，随着服役时间的增长，隧道处于不同损伤状态下的超越概率呈非线性上升趋势，且在钢筋锈蚀启动后（约25年），超越概率的增速显著提升。

（3）量化了氯离子侵蚀对隧道抗震韧性的影响。本文基于韧性指标R与震后功能恢复模型，计算了不同地震动强度与服役年限下的隧道抗震韧性相关数据。结果表明，抗震韧性随PGA的增大而呈非线性下降趋势，且受氯离子侵蚀的影响显著。在相同的PGA工况下，随着服役年限的增长，隧道的抗震韧性指标持续衰减。相较于初始状态，服役100年的隧道抗震韧性指标下降可达32.08%，抗震性能退化过程呈现前期缓慢、后期加速的非均匀特征。

（4）本文研究结果可为氯离子侵蚀作用下隧道的全寿命周期抗震性能评估、决策制定与韧性提升提供理论支撑。建议对处于侵蚀环境中的隧道，在其服役中后期加强监测，并适时采取防护或加固措施，以延缓材料性能的退化，保障其长期抗震安全性与可恢复性。

参考文献：

[1] 张俊儒，马荐驰，陈鹏涛，等.滇西土质地层大跨公路隧道开挖面稳定性及开挖工法研究[J].中国公路学报，2025，38（9）：242-254.

[2] 尹康帅，冯克岩，李建中.氯离子侵蚀作用下的典型钢筋混凝土梁桥时变抗震性能分析[J].振动工程学报，2025，38（9）：2192-2204.

[3] Mohsenian V, Gharaei-Moghaddam N, Hajirasouliha I. Seismic performance assessment of tunnel form concrete structures under earthquake sequences using endurance time analysis[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40: 102327.

[4] 石淑慧，范书立.基于向量地震动强度指标的海底沉管隧道地震

易损性分析[J]. 应用基础与工程科学学报，2024，32(4)：1154-1169.

[5] 苏雷，黄俊超，孟庆旭，等. 基于IDA法的沉管隧道地震易损性分析[J]. 公路，2025，70(9)：314-321.

[6] 赵杰，王翠翠，甘长江. 不均匀地基下核电沉管隧道接头抗震性能分析[J]. 广西大学学报(自然科学版)，2023，48(4)：821-834.

[7] 曹翔鹏，封坤，薛皓匀，等. 大直径盾构隧道双层衬砌横向抗震性能研究[J]. 现代隧道技术，2023，60(1)：130-139.

[8] 许骋昱，左晓宝，殷光吉. 氯盐—硫酸盐环境下钢筋混凝土柱抗震性能退化过程的数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报，2021，41(2)：376-384；402.

[9] 毕熙荣，冀昆，宗成才，等. 工程抗震韧性定量评估方法研究进展综述[J]. 地震研究，2020，43(3)：417-430；601.

[10] 张望欣，韩强，温佳年，等. 基于地震灾害管理的桥梁网络韧性决策框架[J]. 土木工程学报，2023，56(4)：72-82.

[11] 彭双喜，刘文劼. 衬砌劣化影响下的山区高速公路隧道抗震可靠度分析[J]. 公路工程，2025，50(3)：165-172.

[12] Yuan Y, Ji Y. Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2468-2466.

[13] Cusson D, Lounis Z, Daigle L. Benefits of internal curing on service life and life-cycle cost of high-performance concrete bridge decks:A case study[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(5): 339-350.

[14] Stewart M G, Al-Harthy A. Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: Experimental data and probabilistic analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(3): 373-382.

[15] Du Y G, Clark L A, Chan A H C. Residual capacity of corroded reinforcing bars[J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(3): 135-147.

[16] Coronelli D, Gambarova P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(8): 1214-1224.

[17] Cimellaro G P, Reinhom A M, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3639-3649.

[18] Argyroudis S A, Pitilakis K D. Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 35: 1-12.

(上接第 212 页)

[13] 马少坤，陈彩洁，段智博，等. 基于镜像法的有限含水层内隧道渗流场解析解及其验证[J]. 工程力学，2023，40(5)：172-181.

[14] Verruijt A, Booker J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 753-756.

[15] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846-856.

[16] 王超，乔世范，刘红中. TBM破岩过程的滚刀受力计算模型研究[J]. 工程力学，2021，38(10)：54-63.