

【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

考虑氯离子侵蚀的深层隧道地震易损性分析

管民生^{1, 2, 3}, 张静^{1, 2, 3}, 李渊³, 陈湘生^{1, 3}

1) 深圳大学滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东深圳 518060; 2) 深圳大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 广东深圳 518060; 3) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060

摘要: 氯离子侵蚀对隧道的抗震性能产生不利影响, 研究隧道在侵蚀环境下的地震易损性对全寿命周期的抗震评估至关重要. 为了量化分析隧道长期在氯离子侵蚀作用下抗震性能的退化趋势, 基于地震易损性理论, 结合考虑氯离子侵蚀影响的混凝土和钢筋强度时变模型, 分别选取峰值地面加速度和隧道直径变形率作为地震动强度指标和结构损伤指标, 通过采用增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)方法进行时程分析, 深入探讨了深层隧道的地震易损性, 得到了不同服役时间及不同损伤状态下的地震易损性曲线. 结果表明: 在相同的服役时间和地震动强度下, 轻微损伤的发生概率最高, 其次是中等和严重损伤; 在相同的损伤状态和地震动强度下, 随着服役时间的延长, 氯离子侵蚀导致隧道抗震性能下降, 损伤概率上升; 在轻微损伤状态下, 当峰值地面加速度为0.30g且服役达100 a时, 损伤概率是服役初期的2.39倍. 研究结果可为深层隧道的抗震设计提供科学依据.

关键词: 隧道工程; 深层隧道; 地震易损性; 增量动力分析; 氯离子侵蚀; 时变模型

中图分类号: TU924

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2024.06720

Seismic vulnerability of deep tunnels influenced by chloride ion corrosion

GUAN Minsheng^{1, 2, 3}, ZHANG Jing^{1, 2, 3}, LI Yuan³, and CHEN Xiangsheng^{1, 3}

1) Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

3) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Chloride ion erosion adversely affects the seismic performance of tunnels, making it essential to study the seismic vulnerability of tunnels in corrosive environments for a comprehensive seismic assessment over their entire lifecycle. To quantify the degradation trend in seismic performance of tunnels exposed to long-term chloride ion erosion, a seismic vulnerability analysis is conducted based on seismic vulnerability theory. A time-varying model accounting for the effects of chloride ion erosion on concrete and steel strength is employed. Peak ground acceleration and tunnel diameter deformation rate are selected as indicators for seismic intensity and structural damage, respectively. Through incremental dynamic analysis (IDA), the seismic vulnerability of deep tunnels is thoroughly investigated. Seismic vulnerability curves are obtained for various service periods and damage states. The results indicate that for the same service duration and seismic intensity, the probability of minor damage is the highest, followed by moderate and severe damage. For the same damage state and seismic intensity, as the service time increases, chloride ion erosion leads to a decline in tunnel seismic performance and a rise in damage

Received: 2024-06-20; Accepted: 2024-09-24; Online (CNKI): 2024-10-25

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52090082)

Corresponding author: Associate professor GUAN Minsheng (msguan@szu.edu.cn)

Citation: GUAN Minsheng, ZHANG Jing, LI Yuan, et al. Seismic vulnerability of deep tunnels influenced by chloride ion corrosion [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(6): 720-729. (in Chinese)



probability. In the state of minor damage, when the peak ground acceleration is 0.30g and the service life reaches 100 years, the damage probability is 2.39 times higher than that in the initial service period. The research results provide a scientific basis for the seismic design of deep tunnels.

Key words: tunnel engineering; deep tunnel; seismic vulnerability; incremental dynamic analysis; chloride ion erosion; time-varying model

随着中国经济的高速增长与交通强国战略的持续推进,公路、铁路和地铁隧道数量不断上升。截至2023年底,中国已竣工并投入使用的铁路隧道共计18 573座,总长度达23 508 km,尚在施工的铁路隧道有2 668座,总长约7 110 km,还有5 460座铁路隧道处于规划阶段,总长约13 313 km^[1]。中国位于环太平洋地震带与欧亚地震带交汇处,属于全球地震灾害最严重的国家之一^[2-3],地震活动频繁、强度高,造成的灾害严重且影响广泛。强震引起的人员伤亡和建筑破坏极其严重^[4-5]。虽然地下结构相比于地上结构在地震中表现出更好的稳定性,但历史地震记录显示,在强烈地震影响下,这些结构同样面临着严重的破坏风险^[6]。例如,1995年的阪神地震、1999年的集集地震和2008年的汶川地震,隧道都遭受了包括底板开裂、洞口塌方以及衬砌坍塌在内的多种破坏^[7],严重影响了交通运行、经济活动和公共安全。

地震易损性研究综合考虑了地震动输入和结构参数的不确定性,是给结构施加不同强度的地震荷载,其本身达到或者超过某一特定界限时的概率^[8]。目前,隧道地震易损性研究取得了一定的进展。段朝杰等^[9]以云南滇中引水工程磨盘山隧道为研究对象,采用两种损伤指标,基于增量动力分析方法,对不同场地条件下的隧道结构进行了地震易损性分析。HUANG等^[10]对上海软土地基中圆形隧道进行了地震易损性分析,通过建立软土隧道的有限元模型,并应用二维非线性动力分析方法,获得了基于峰值地面加速度和峰值地面速度的易损性曲线。丁祖德等^[11]考虑混凝土强度劣化和钢筋腐蚀效应,建立了衬砌时变承载力方程,结合地震易损性分析方法,得到了山岭隧道在不同服役时间的地震易损性曲线,可以看出随着服役时间的逐渐增加衬砌的易损性呈现出两阶段的非线性增长趋势。隧道长期暴露在氯离子^[11-12]和硫酸根离子^[12-13]腐蚀环境中,其结构承载能力和抗震性能会逐渐下降。与浅层结构相比,深层地下结构因其所处环境的强侵蚀性和复杂理化特征而受到更为显著的影响。本研究专注于分析氯离子侵蚀对深层隧道的地震易损性的

影响,探索该类环境下隧道结构抗震性能的变化规律。

本研究以东部地区某地下隧道为例,地震动强度指标和结构损伤指标分别选用峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)和隧道直径变形率。针对特定结构和场地条件,选择了7条地震波。采用等步长调幅方法对地震强度参数进行调整,每调整1次,便对模型进行1次非线性时程分析,从而生成了7条增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)曲线。基于这些曲线,对氯离子侵蚀作用下处于不同服役时间及损伤状态的隧道地震易损性进行了深入研究。

1 氯离子侵蚀机理及材料时变模型

1.1 混凝土强度损伤规律与时变模型

在隧道工程长期运营中,混凝土强度将随时间与环境变化,牛荻涛^[14]提出了一个适用于海洋环境的混凝土强度时变模型,在服役期内任意时刻混凝土强度的概率密度函数可表示为

$$p_f(\sigma, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_f(t)} \exp\left(-\frac{[\sigma - \mu_f(t)]^2}{2\sigma_f^2(t)}\right) \quad (1)$$

其中, σ 为混凝土强度; $\mu_f(t)$ 为 t 年后混凝土强度的平均值; $\sigma_f(t)$ 为 t 年后混凝土强度的标准差。

$$\mu_f(t) = \xi(t) \mu_0 \quad (2)$$

$$\sigma_f(t) = \eta(t) \sigma_0 \quad (3)$$

其中, μ_0 为28 d时混凝土强度平均值; σ_0 为28 d时混凝土强度标准差,并近似作为结构刚开始服役时的强度和标准差。 $\xi(t)$ 和 $\eta(t)$ 是随时间变化的函数,可表示为

$$\xi(t) = 1.2488e^{-0.0347(\ln t - 0.3468)^2} \quad (4)$$

$$\eta(t) = 0.0143t + 1.0624 \quad (5)$$

本研究选用的混凝土强度为C40,其抗压强度标准值为26.8 MPa。根据式(1)可以得到不同服役时间的混凝土抗压强度,如图1。在服役前3 a,混凝土的抗压强度随时间延长而逐渐增大,随后迅速

下降. 随着时间的进一步增加, 抗压强度的下降速度逐渐变慢. 超过 20 a 后, 混凝土的抗压强度将小于服役初期的抗压强度, 当服役时间达到 100 a 时, 抗压强度降低了 33.44%.

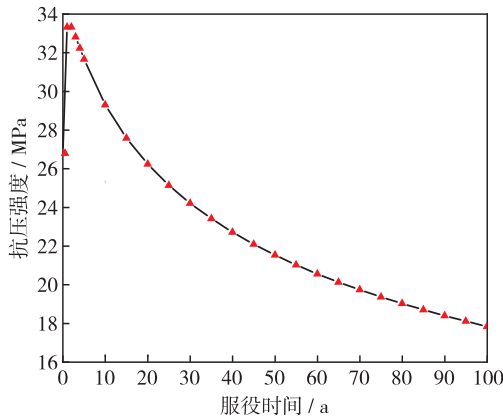


图 1 混凝土抗压强度随服役时间变化曲线

Fig. 1 Concrete compressive strength as function of time.

1.2 钢筋强度和直径损伤规律与时变模型

氯离子在混凝土中主要的传输方式为扩散作用, 遵循 Fick 第二定律, t_1 时刻 x 深度处的氯离子浓度为

$$C(x, t_1) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt_1}} \right) \right] \quad (6)$$

其中, x 为距离混凝土保护层外表面的深度 (单位: mm); t_1 为混凝土受侵蚀的时间 (单位: a); C_s 为混凝土保护层外表面的氯离子浓度 (单位: %); $\operatorname{erf}(x)$ 为高斯误差函数; D 为氯离子扩散系数 (单位: mm^2/a); C_s 和 $\operatorname{erf}(x)$ 的表达式为

$$C_s = A_{cs}(w/b) + B_{cs} \quad (7)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx \quad (8)$$

其中, A_{cs} 和 B_{cs} 为模型参数; w/b 为水胶比 (质量比).

取 $x = d_c$, d_c 为混凝土保护层厚度 (单位: mm). 钢筋开始锈蚀时间 t_0 可表示为

$$t_0 = \frac{d_c^2}{4D} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_s - C_{cr}}{C_s} \right) \right]^2 \quad (9)$$

其中, C_{cr} 为钢筋开始被锈蚀时的氯离子临界质量浓度 (单位: %).

根据 DU 等^[15-16]的研究成果, 各参数取值可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料表 S1. 根据表 S1 以及式 (9), 引用统计学中的蒙特卡洛抽样方法, 建立数量庞大的样本进行抽样计算, 可得到钢

筋的初始锈蚀时间为 24.3 a.

在氯盐环境下, 钢筋锈蚀可以用电化学腐蚀表示. 钢筋屈服强度和直径随时间的变化规律满足式 (10) 和式 (11)^[15].

$$f_y = (1.0 - \beta_y Q_{\text{corr}}) f_{y0} \quad (10)$$

$$d_s = \sqrt{1.0 - Q_{\text{corr}}} \times d_{s0} \quad (11)$$

其中, f_{y0} 为钢筋的初始屈服应力 (单位: MPa); d_{s0} 为钢筋的初始直径 (单位: mm); β_y 为钢筋屈服强度的折减系数; Q_{corr} 为钢筋的锈蚀率, 可表示为

$$Q_{\text{corr}} = \frac{4x_{\text{corr}}}{d_{s0}} \left(1 - \frac{x_{\text{corr}}}{d_{s0}} \right) \quad (12)$$

$$x_{\text{corr}} = 0.0115 i_{\text{corr}} \times t_p \quad (13)$$

$$i_{\text{corr}} = i_{\text{corr},0} \times 0.85 t_p^{-0.29} \quad (14)$$

$$i_{\text{corr},0} = \frac{37.8(1-w/c)^{-1.64}}{d_c} \quad (15)$$

其中, x_{corr} 为钢筋的锈蚀深度 (单位: mm); t_p 为钢筋锈蚀时间 (单位: a); i_{corr} 为 t_p 时的电流密度; $i_{\text{corr},0}$ 为初始电流密度.

本研究取 d_c 为 50 mm, 水灰比为 0.4, 同时根据式 (10) 和式 (11) 可以得到隧道内的钢筋在每个时间点的屈服强度和直径, 如图 2. 从图 2 可知, 钢筋屈服强度随着隧道服役时间的增加而逐渐下降, 但是整体来看, 钢筋的屈服强度下降非常缓慢, 当服役时间达到 100 a 时, 屈服强度下降了 6.70%. 钢筋直径随着隧道服役时间的增加也逐渐下降, 但是当服役时间达到 100 a 时, 钢筋直径下降了 7.4 mm, 即下降了 33.51%. 可以得到, 隧道在整个服役期间, 钢筋的屈服强度有所下降, 但其有效截面积的减少更为显著.

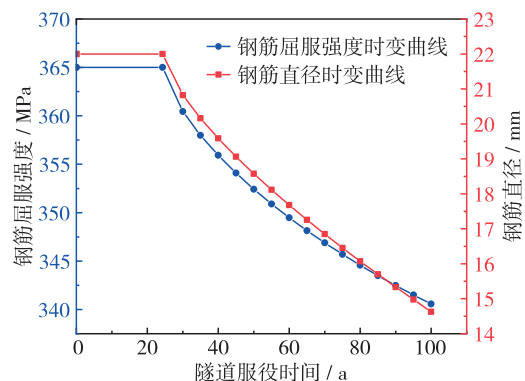


图 2 钢筋屈服强度和直径时变曲线

Fig. 2 Time-varying curve of yield strength (circle, blue line) and diameter (square, red line) of steel reinforcement.

2 隧道数值分析模型建立及地震动输入

2.1 计算模型

使用ABAQUS软件建立二维数值模型,整体尺寸宽250 m、高200 m。隧道呈圆形横截面,其外径为10 m,壁厚为0.35 m,埋深为100 m,隧道模型如图3。网格尺寸由外向内递减,对隧道内部和周围土体进行了网格加密,网格划分形式如图4。采用4节点平面应变缩减积分单元(CPE4R)模拟土体和混凝土,梁单元(B21)模拟钢筋。土体、混凝土和钢筋分别采用Mohr-Coulomb模型、塑性损伤模型^[17]和双折线模型^[16]模拟其本构关系。材料参数表如表1。土体与隧道之间的相互作用采用接触关系模拟。其中,法向接触采用“硬”接触,切向接触采用“罚”函数,指定隧道的外表面为目标面,土体表面为接触面。重点分析隧道的整体变形性能,因此将钢筋嵌入到混凝土里面。

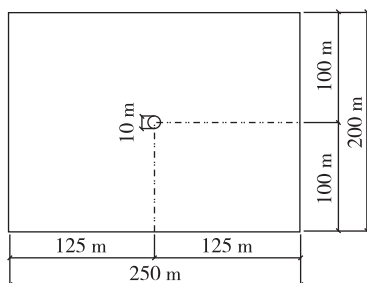


图3 隧道结构简化模型

Fig. 3 Simplified model of tunnel structure.

2.2 地震动输入

在实际工程应用中,地下隧道被视为一个半无限空间,但是在数值模拟的时候只能选取有限尺寸进行模拟,为了减小因边界反射而引起的误差并提

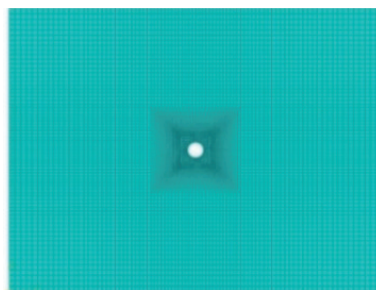


图4 网格划分

Fig. 4 Grid partitioning.

高计算结果的准确性,本研究采用黏弹性人工边界,如图5。黏弹性人工边界的实质是在模型的边界节点处添加一组切向的弹簧和阻尼器以及法向的弹簧和阻尼器。修正后的二维黏弹性人工边界弹簧刚度和阻尼系数表达式分别为

$$\begin{cases} K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, \\ C_{BN} = \rho c \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, \\ C_{BT} = \rho c \end{cases} \quad (17)$$

其中, K_{BN} 和 K_{BT} 分别为法向和切向弹簧刚度(单位: N/m); C_{BN} 和 C_{BT} 分别为法向和切向阻尼器的阻尼系数(单位: N·s/m); R 为波源至人工边界点的距离(单位: m); c_p 为介质的纵波波速(单位: m/s); c_s 为介质的剪切波速(单位: m/s); ρ 为介质的质量密度(单位: kg/m³); G 为介质的剪切模量(单位: Pa); α_N 和 α_T 分别为法向和切向黏弹性边界修正系数,分别取1.0和0.5^[18]。

当使用黏弹性人工边界时,选用将地震动转化为等效节点力的方法输入到模型中^[19]。设 t 时刻作用于人工边界任一节点A处 x 、 y 方向的等效节点力分别为 $F_{AT}(t)$ 和 $F_{AN}(t)$,如图5。根据人工边界处节点力的运动方程,其计算满足式(18)。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	摩擦角/(°)	剪胀角/(°)	轴心抗 压强度/MPa	轴心抗 拉强度/MPa	屈服 强度/MPa	极限 强度/MPa
土体	2 100	1 300	25	0.1	—	—	—	—
混凝土	2 400	35 500	—	—	26.8	2.39	—	—
钢筋	7 850	200 000	—	—	—	—	365	516

$$\begin{cases} F_{AT}(t) = A\tau_A(x_A, y_A, t) + C_{AT}\dot{u}_A(x_A, y_A, t) + K_{AT}u_A(x_A, y_A, t) \\ F_{AN}(t) = A\sigma_A(x_A, y_A, t) + C_{AN}\dot{v}_A(x_A, y_A, t) + K_{AN}v_A(x_A, y_A, t) \end{cases} \quad (18)$$

其中, A 为人工边界节点代表的单位面积(单位: m^2); $\tau_A(x_A, y_A, t)$ 和 $\sigma_A(x_A, y_A, t)$ 分别为由位移产生的 x 和 y 方向的压强(单位: Pa); $C_{AT}\dot{u}_A(x_A, y_A, t)$ 和 $C_{AN}\dot{v}_A(x_A, y_A, t)$ 分别为 x 和 y 方向的阻尼力(单位: N), C_{AT} 和 C_{AN} 为阻尼器的阻尼系数(单位: $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$), $\dot{u}_A(x_A, y_A, t)$ 和 $\dot{v}_A(x_A, y_A, t)$ 分别为位移对应的 x 和 y 方向的速度(单位: m/s); $K_{AT}u_A(x_A, y_A, t)$ 和 $K_{AN}v_A(x_A, y_A, t)$ 分别为 x 和 y 方向的弹簧力(单位: N), K_{AT} 和 K_{AN} 为弹簧刚度系数(单位: N/m), $u_A(x_A, y_A, t)$ 和 $v_A(x_A, y_A, t)$ 分别为 t 时刻自由场在 x 和 y 方向的位移(单位: m).

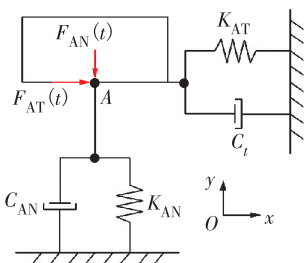


图5 黏弹性人工边界及等效节点荷载

Fig. 5 Viscoelastic artificial boundary and equivalent nodal loads.

3 结构损伤指标和地震动强度指标的选取

3.1 结构损伤指标的选取

损伤指标是评价结构损伤状态的重要依据,《地下结构抗震设计标准》^[20]GB/T 51336—2018中提出了以隧道直径变形率作为表征隧道的破坏指标.研究表明,圆形隧道的直径变形率与隧道的诸多因素都具有较好的相关性,可以有效表征隧道的损伤状态,因此本文选用隧道最大直径变形率($\varphi_{\max}$)作为结构损伤指标.隧道直径变形率(φ)为

$$\varphi = \Delta D/D \quad (19)$$

其中, ΔD 是隧道直径变化量(单位: m); D 是隧道直径(单位: m).

本研究结合已有的震害等级评定标准^[21],将隧道的损伤状态划分为5个等级,具体划分如表2.

3.2 地震动强度指标的选取

地震动强度指标是表征结构所遭受的地震动强度大小的指标.考虑到峰值地面加速度(β),具有定义明确、计算简单的特点,且隧道结构的自振周期较小,因此选用峰值地面加速度作为地震动强度

表2 隧道结构损伤状态的定义

Table 2 Definition of damage state for tunnel structure

结构损伤状态	损伤指数	损伤指数中值
无损伤(S_0)	$\varphi_{\max} < 0.3\%$	—
轻微损伤(S_1)	$0.3\% \leq \varphi_{\max} < 0.4\%$	0.35%
中度损伤(S_2)	$0.4\% \leq \varphi_{\max} < 0.5\%$	0.45%
严重损伤(S_3)	$0.5\% \leq \varphi_{\max} < 0.6\%$	0.55%
倒塌(S_4)	$0.6\% \leq \varphi_{\max}$	—

指标.

使用线性回归分析方法建立地震动强度指标(intensity measure, IM)与结构损伤指标(damage measure, DM)的回归方程^[22],回归方程为

$$\ln \varphi_{\max} = a + b \ln \beta \quad (20)$$

其中, a 和 b 为回归系数,可以通过数据拟合得到.将PGA 与其对应的 $\varphi_{\max}$ 组成两组数据,并分别取对数.按照式(20)进行线性回归拟合,得到隧道地震概率需求模型的数学表达式.

4 增量动力分析法

4.1 基本概念

增量动力分析是一种非线性地震反应分析方法,是指将同一条地震动记录的幅值进行连续且等比例的递增调整,随后以非线性动力学理论为基础对结构进行非线性动力时程分析^[23],从而获得一系列结构在递增地震强度下的弹塑性响应数据.绘制出地震动强度参数及其对应的结构损伤指标的关系曲线,即为IDA曲线.在地震作用下,结构响应表现为非线性特性.IDA方法可以深入分析结构的非线性动力特性,并考虑地震作用的不确定性.通过此方法,可以获得结构在不同地震强度下的响应和损伤状态,有效评估结构的抗震能力.

4.2 地震波的选择

选择合适的地震波对于IDA分析至关重要,地震波的不确定性和随机性会显著影响分析结果.本研究从太平洋地震工程研究中心地震波数据库中筛选了7条实测地震波,通过使用等步长调幅法对其进行调幅,即首次调幅峰值地面加速度为0.1g(g 为重力加速度),之后依次为0.2g、0.3g、0.4g、…。图6为地震动反应谱及设计反应谱,图7为设计反应谱与7条地震波平均谱,表3为地震动

记录信息. 根据反应谱的两个频率段选波, 第1频段的地震波反应谱均值与设计反应谱相差7.4%, 第2频段相差3.2%, 均满足小于10%的要求.

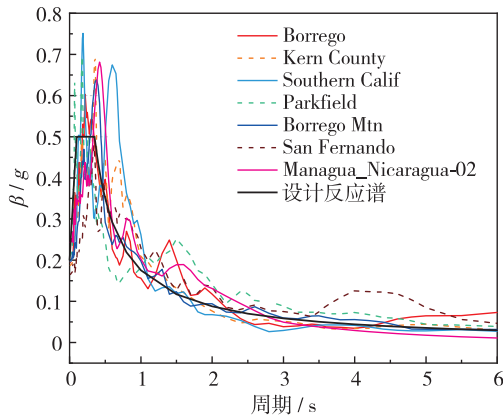


图6 地震动反应谱及设计反应谱

Fig. 6 Seismic response spectrums for designed (black solid line), Borrego (red solid line), Kern County (orange dashed line), Southern Calif (blue solid line), Parkfield (green dashed line), Borrego Mtn (dark blue solid line), San Fernando (brown dashed line), and Managua_Nicaragua-02 (pink solid line).

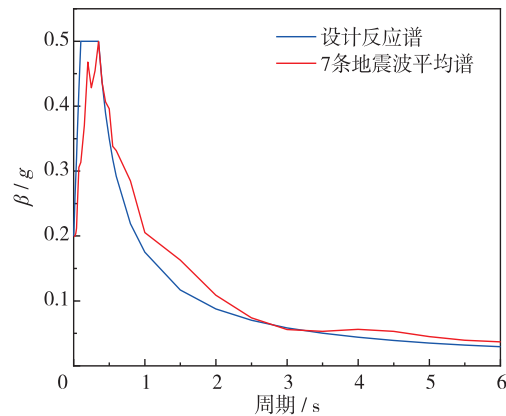


图7 设计反应谱与7条地震波平均谱

Fig. 7 Design response spectrum (blue line), and average spectra of seven earthquake waves (red line).

4.3 IDA曲线的建立

选择DM准则确定隧道的极限状态, 即以结构损伤指标作为确定隧道IDA分析的终止条件. 本研究当 $\varphi_{\max}$ 达到0.6%时, 认为隧道的变形达到极限状态, 此时结束隧道IDA分析. 图8为不同地震波作用下的IDA曲线簇.

表3 地震动记录信息

Table 3 Seismic motion record information

序号	震级	年份	地震动名称	记录站台
1	6.50	1942	Borrego	EI Centro Array #9
2	7.36	1952	Kern County	Taft Lincoln School
3	6.00	1952	Southern Calif	San Luis Obispo
4	6.19	1966	Parkfield	Cholame-Shandon Array #12
5	6.63	1968	Borrego Mtn	San Onofre -So Cal Edison
6	6.61	1971	San Fernando	Borrego Springs Fire Sta
7	5.20	1972	Managua_Nicaragua-02	Managua_ESSO

从图8可以看出, 随着峰值地面加速度增加, 隧道的响应逐渐增强. 7条IDA曲线趋势相似, 在峰值地面加速度较小时, $\varphi_{\max}$ 的增加较缓慢, 当峰值地面加速度增长到一定值时, 虽然增长幅度不大, 但是 $\varphi_{\max}$ 显著增加. 隧道的地震响应会因为地震波基本特性的不同而存在较大差异性. 其中, 第5条地震波对隧道造成的破坏最轻, 直到峰值地面加速度达到1.32g时, $\varphi_{\max}$ 才达到0.60%. 相比之下, 第3条地震波对隧道造成的破坏最严重, $\varphi_{\max}$ 在峰值地面加速度为0.80g时已达到0.60%. 在峰值地面加速度较小时, 不同地震波对应的 $\varphi_{\max}$ 差异较小, 但是随着峰值地面加速度增大, 这种差异也逐渐扩大. 比如当峰值地面加速度为0.20g时, 第3、5条地震波对应的 $\varphi_{\max}$ 分别为0.27%和0.26%,

相差不大; 当 β 为0.80g时, 第3和第5条地震波对应的 $\varphi_{\max}$ 分别为0.60%和0.32%.

5 全寿命周期内地震易损性分析

5.1 易损性曲线

地震易损性是指给结构施加不同强度的地震荷载, 结构的损伤状态超越某一特定界限时的概率. 可以用双参数正态分布函数来描述地震易损性曲线, 其基本表达式为

$$P_i(s \geq s_j | IM) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{tot}} \ln \left(\frac{IM}{IM_j} \right) \right] \quad (21)$$

其中, P_i 为结构超越某破坏状态 s_j 的概率; s 为结构的损伤状态; Φ 为标准正态分布累计概率函数; IM

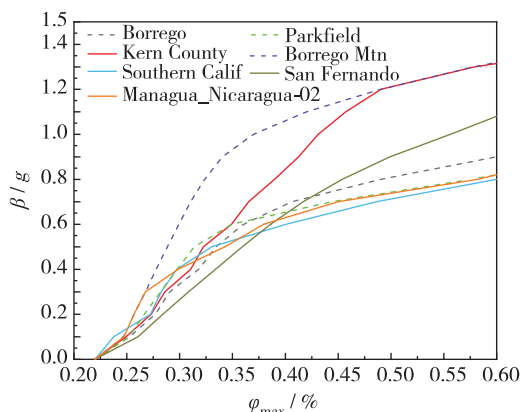


图8 不同地震波作用下的IDA曲线簇

Fig. 8 Clusters of incremental dynamic analysis curves under different earthquake waves: Borrego (gray dashed line), Kern County (red solid line), Southern Calif (blue solid line), Parkfield (green dashed line), Borrego Mtn (purple dashed line), San Fernando (dark yellow solid line), and Managua_Nicaragua-02 (orange solid line).

为地震动强度； IM_j 为第 j 个损伤状态下地震动强度指标 IM 的中间临界值； β_{tot} 为考虑了3个参数的不确定性后总的对数正态分布标准差^[24]，通常假定这3个参数相互独立且都符合对数正态分布， β_{tot} 表达式为

$$\beta_{tot} = \sqrt{\beta_{DS}^2 + \beta_c^2 + \beta_D^2} \quad (22)$$

其中， β_{DS} 表示损伤状态的不确定性，根据相关调查研究^[25]， β_{DS} 的推荐值取0.4； β_c 表示地震响应与抗力的不确定性，本研究的结构形式固定， β_c 的影响可以忽略； β_D 表示地震需求的不确定性，由回归方程的标准偏差决定取值大小，其表达式为

$$\beta_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln \varphi_{i,max} - \ln \varphi_{max})^2}{n-2}} \quad (23)$$

其中， $\varphi_{i,max}$ 为第 i 条地震波作用下隧道地震响应的最大直径变形率； n 为进行调幅后得到的地震波总数。

5.2 不同服役时间下的隧道地震易损性分析

分别建立服役0、50、75和100 a的隧道模型，并对其进行易损性分析，不同服役时间的地震概率需求模型表达式如表4。计算易损性曲线的两个重要的参数是 β_{tot} 和 IM_j ，其中，在服役0、50、75和100 a时， β_{tot} 分别取值0.429、0.428、0.453和0.431。 IM_j 根据该服役时间对应的地震概率需求模型以及不同损伤等级的损伤指数中值计算得到。图9为不同服役时间下的隧道地震时变易损性曲线。

表4 隧道不同服役时间节点的地震概率需求模型表达式

Table 4 Expressions of seismic probability demand model for tunnels at different service time nodes

服役时间/a	地震概率需求模型表达式
0	$\ln \varphi_{max} = -5.33469 + 0.34242 \ln \beta$
50	$\ln \varphi_{max} = -5.28735 + 0.32354 \ln \beta$
75	$\ln \varphi_{max} = -5.25647 + 0.31938 \ln \beta$
100	$\ln \varphi_{max} = -5.22837 + 0.31547 \ln \beta$

从图9可以看出，各个服役时间下的隧道结构的损伤概率随着峰值地面加速度的增加不断增大。易损性曲线的斜率随着峰值地面加速度的增加，先逐渐增大，然后逐渐减小，曲线整体呈现出“两头平缓、中间陡升”的趋势。随着损伤状态等级的提高，易损性曲线逐渐变得平缓，在同一服役时间和地震动强度下，发生轻微损伤的概率最大，中等损伤和严重损伤的概率次之。服役初期，当峰值地面加速度为0.40g时，隧道发生轻微、中等和严重损伤的概率分别为51.78%、4.78%和0.12%；当峰值地面加速度为0.90g时，分别为97.35%、58.86%和12.67%。服役100 a时，当峰值地面加速度为0.40g，隧道发生轻微、中等和严重损伤的概率分别为84.44%、20.12%和1.03%；当峰值地面加速度为0.90g时，隧道发生轻微、中等和严重损伤的概率分别为99.81%、85.22%和33.31%。尽管地震作用对隧道结构具有潜在的破坏能力，但隧道结构发生严重损伤的可能性相对较低。

5.3 不同损伤状态下的隧道地震易损性分析

将图9整理成各个不同损伤状态下的隧道地震时变易损性曲线，结果可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S1。从图S1可以看出，在轻微损伤状态下，峰值地面加速度的增大，使隧道结构的损伤概率急剧上升，曲线呈现出相对较陡的趋势。在中等损伤和严重损伤状态时，隧道结构易损性曲线走势逐渐变得平缓。从图S1还可以得出：①轻微损伤时，当峰值地面加速度为0.30g，隧道在服役初期、50、75和100 a的损伤概率分别为26.57%、43.72%、54.06%和63.48%；②中等损伤时，当峰值地面加速度为0.50g，隧道在服役初期、50、75和100 a的损伤概率分别为12.59%、21.80%、29.44%和37.48%；③严重损伤时，当峰值地面加速度为1.00g，隧道在服役初期、50、75和100 a的损伤概率分别为18.50%、27.14%、

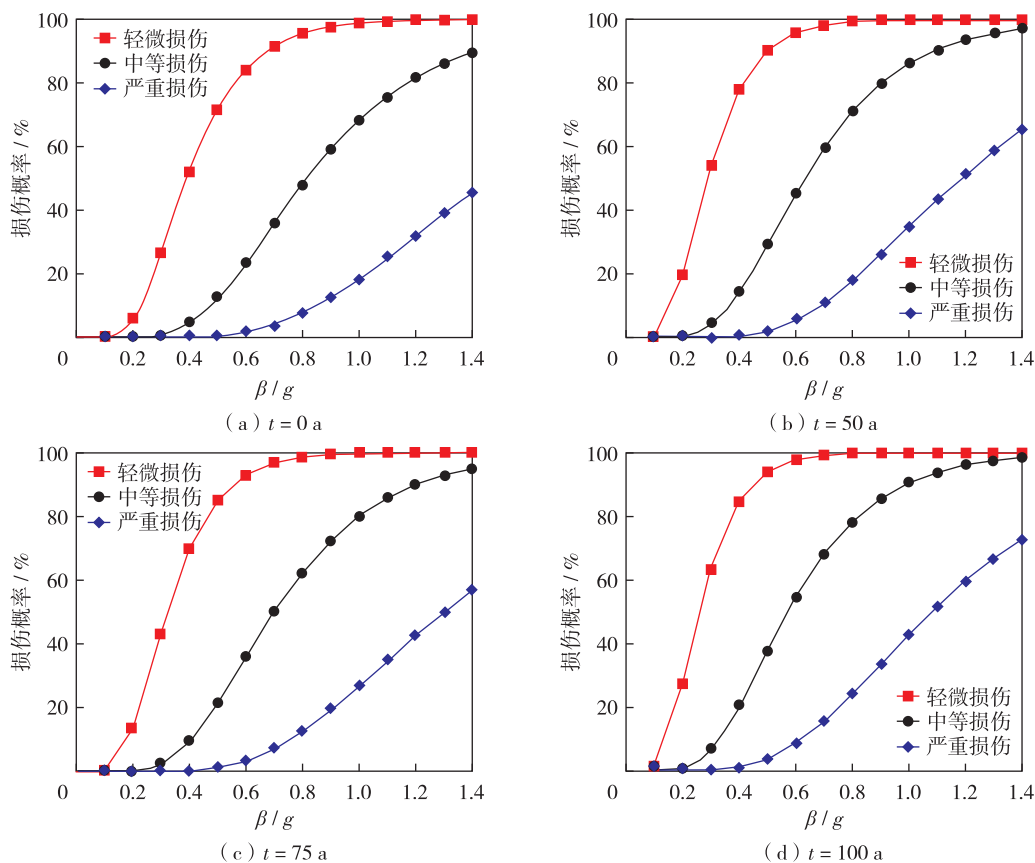


图9 不同服役时间下的隧道地震时变易损性曲线

Fig. 9 Time-variant seismic vulnerability curves for tunnels at different service times, (a) $t = 0$ a, (b) $t = 50$ a, (c) $t = 75$ a, and (d) $t = 100$ a, minor damage (red line), moderate damage (black line), severe damage (blue line).

34.84%和42.59%。结构的损伤概率随服役时间的增加而逐渐增大,即使峰值地面加速度较小,也可能导致隧道达到中等损伤或严重损伤,表明随着服役时间增加隧道的抗震性能逐渐下降。这主要是由于氯离子逐渐进入混凝土内部并开始侵蚀,从而导致钢筋的强度下降,并缩减其有效截面,同时降低混凝土抗压强度,氯离子作用时间越久,对混凝土以及钢筋的负面影响越大。

6 结 论

建立深层地下隧道有限元分析模型,结合混凝土强度时变模型以及钢筋强度、直径时变模型,基于IDA方法开展了氯离子侵蚀影响下的深层隧道地震易损性研究。可得:

1) 混凝土抗压强度以及钢筋直径受服役时间影响显著,而钢筋屈服强度受服役时间影响较小。服役100 a时,混凝土抗压强度降低33.44%,钢筋直径下降了33.51%;钢筋屈服强度则较初期下降

6.70%。

2) 隧道响应随地震动强度增强而加剧,且因地震波特性而异。当峰值地面加速度较低时,隧道变形平缓;当峰值地面加速度较高时,隧道进入非线性变形阶段,变形率显著上升。Borrego Mtn地震波对隧道破坏最小,在峰值地面加速度为 $1.32g$ 才达到0.6%变形率;Southern Calif地震波破坏最大,在峰值地面加速度为 $0.80g$ 时就已达到。

3) 隧道在不同损伤状态下的易损性差异显著,在同一服役时间和地震动强度下,发生轻微损伤的概率最大,中等损伤和严重损伤的概率次之。在服役100 a时,当峰值地面加速度为 $0.40g$,隧道发生轻微损伤的概率是84.44%,中等损伤的概率是20.12%,严重损伤的概率是1.03%。

4) 氯离子侵蚀对隧道易损性的影响较大。随服役时间的增加,氯离子堆积使隧道在同一损伤状态以及同一地震动强度下发生破坏的损伤概率增大。轻微损伤时,当峰值地面加速度为 $0.30g$,服役100 a的损伤概率是初期的2.39倍。中等损伤

时, 当峰值地面加速度为 $0.50g$, 服役 100 a 的损伤概率是初期的 2.98 倍.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52090082)

作者简介: 管民生(msguan@szu.edu.cn), 深圳大学副教授、博士.
研究方向: 工程抗震设计理论与方法.

引文: 管民生, 张静, 李渊, 等. 考虑氯离子侵蚀的深层隧道地震易损性分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2024, 41(6): 720-729.

参考文献 / References:

- [1] 巩江峰, 王伟, 王芳, 等. 截至 2023 年底中国铁路隧道情况统计及 2023 年新开通重点项目隧道情况介绍[J]. 隧道建设中英文, 2024, 44(2): 377-392.
GONG Jiangfeng, WANG Wei, WANG Fang, et al. Statistics of China's railway tunnels by the end of 2023 and overview of tunnels of key new projects in 2023 [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(2): 377-392. (in Chinese)
- [2] 张效亮, 吴健. 地震灾害调查与风险评估[J]. 城市与减灾, 2021(2): 10-13.
ZHANG Xiaoliang, WU Jian. Survey on earthquake disaster and its risk assessment [J]. City and Disaster Reduction, 2021 (2): 10-13. (in Chinese)
- [3] 史卓鹏, 王亚臣, 薛凯. 220kV 半户内式变电站结构罕遇地震性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 45(2): 56-64.
SHI Zhuopeng, WANG Yachen, XUE Kai. Seismic behavior analysis of a 220kV whole semi-indoor substation structure of the national stadium under severe earthquake [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2023, 45(2): 56-64. (in Chinese)
- [4] 贾哈曦, 林均岐, 刘金龙. 建筑结构地震易损性分析研究综述[J]. 震灾防御技术, 2019, 14(1): 42-51.
JIA Hanxi, LIN Junqi, LIU Jinlong. Review of seismic fragility analysis of building structure [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2019, 14(1): 42-51. (in Chinese)
- [5] 王晓青, 丁香, 丁玲, 等. 影响地震生命损失的若干因素探讨——以 2023 年积石山 6.2 级地震为例[J]. 中国应急救援, 2024(3): 10-16.
WANG Xiaoqing, DING Xiang, DING Ling, et al. Discussion on some factors affecting the loss of life in earthquake: a case study of 2023 Jishishan M6.2 earthquake in Gansu [J]. China Emergency Rescue, 2024 (3): 10-16. (in Chinese)
- [6] 路德春, 马超, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震韧性研究进展[J]. 中国科学技术科学, 2022, 52(10): 1469-1483.
LU Dechun, MA Chao, DU Xiuli, et al. Earthquake resilience of urban underground structures: state of the art [J]. Scientia Sinica Technologica, 2022, 52(10): 1469-1483. (in Chinese)
- [7] 沈昆, 张理, 贾毅. 山岭隧道抗震设计与减震措施研究[J]. 公路交通科技应用技术版, 2017, 13(9): 204-207.
SHEN Kun, ZHANG Li, JIA Yi. Research on seismic design and mitigation measures for mountain tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 13(9): 204-207. (in Chinese)
- [8] 姜京伟, 李静波, 崔春义, 等. 基于双参数模型的地铁车站地震易损性分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(5): 496-503.
JIANG Jingwei, LI Jingbo, CUI Chunyi, et al. Seismic vulnerability analysis of subway station based on two-parameter model [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(5): 496-503. (in Chinese)
- [9] 段朝杰, 何志佳, 石艳柯, 等. 场地条件对马蹄形隧道地震易损性的影响研究[J]. 隧道建设中英文, 2023, 43(S2): 252-262.
DUAN Chaojie, HE Zhijia, SHI Yanke, et al. Influence of site condition on seismic fragility of horseshoe-shaped tunnels [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S2): 252-262. (in Chinese)
- [10] HUANG Zhongkai, PITILAKIS K, TSINIDIS G, et al. Seismic vulnerability of circular tunnels in soft soil deposits: the case of Shanghai metropolitan system [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 98: 103341.
- [11] 丁祖德, 资昊, 计霞飞, 等. 考虑衬砌劣化的山岭隧道地震易损性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 581-592.
DING Zude, ZI Hao, JI Xiafei, et al. Seismic fragility analysis of mountain tunnels considering lining degradation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 581-592. (in Chinese)
- [12] 何文正, 徐林生. 复合腐蚀作用下隧道衬砌承载力演变模型研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(1): 122-132.
HE Wenzheng, XU Linsheng. Study on evolution model for bearing capacity of tunnel linings exposed to composite

- corrosive environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(1): 122-132. (in Chinese)
- [13] 何文正, 徐林生. 硫酸盐侵蚀作用下隧道衬砌时变力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1010-1018.
- HE Wenzheng, XU Linsheng. Time-dependent mechanical behavior of tunnel linings under sulfate attack [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1010-1018. (in Chinese)
- [14] 牛荻涛. 海洋环境下混凝土强度的经时变化模型[J]. 西安建筑科技大学学报, 1995, 27(1): 49-52.
- NIU Ditao. Changing models of concrete strength along with time in marine environment [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 1995, 27(1): 49-52. (in Chinese)
- [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] SAKAR G, HAWILEH R A, NASER M Z, et al. Nonlinear behavior of shear deficient RC beams strengthened with near surface mounted glass fiber reinforcement under cyclic loading [J]. Materials & Design, 2014, 61: 16-25
- [17] 张战廷, 刘宇峰. ABAQUS中的混凝土塑性损伤模型[J]. 建筑结构, 2011, 41(增刊2): 229-231.
- ZHANG Zhanting, LIU Yufeng. Concrete damaged plasticity model in ABAQUS [J]. Building Structure, 2011, 41(Suppl. 2): 229-231. (in Chinese)
- [18] 刘晶波, 李彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界[J]. 中国科学E辑工程科学材料科学, 2005, 35(9): 966-980.
- LIU Jingbo, LI Bin. 3D viscoelastic static-dynamic unified artificial boundary [J]. Science in China Series E Engineering & Materials Science, 2005, 35(9): 966-980. (in Chinese)
- [19] 吴爽, 赵志刚, 裴强. 基于粘弹性人工边界的地震动输入方法的研究[J]. 大连大学学报, 2017, 38(3): 8-11.
- WU Shuang, ZHAO Zhigang, PEI Qiang. Study on the seismic input method of viscoelastic artificial boundary condition in finite element software [J]. Journal of Dalian University, 2017, 38(3): 8-11. (in Chinese)
- [20] GB/T 51336—2018地下结构抗震设计标准[S].
- GB/T 51336—2018 Standard for seismic design of underground structures [S]. (in Chinese)
- [21] 王伯超. 基于IDA分析法的公路隧道衬砌地震易损性研究: 以宜昌某隧道为例[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- WANG Bochao. Seismic vulnerability analysis of tunnel lining based on the IDA method: take the tunnel at Yichang as a case [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [22] CORNELL C A, JALAYER F, HAMBURGER R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526-533.
- [23] 吴志浩, 崔春义, 冷淇程, 等. 全直桩高桩码头结构的地震易损性分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(4): 432-439.
- WU Zhihao, CUI Chunyi, LENG Qicheng, et al. Seismic vulnerability analysis of vertical pile-supported wharf structure [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(4): 432-439. (in Chinese)
- [24] 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.
- [25] NGUYEN D D, PARK D, SHAMSHER S, et al. Seismic vulnerability assessment of rectangular cut-and-cover subway tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 247-261.

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】



补充材料