

DOI: 10.11779/CJGE20230610

# 穿活动断裂带隧道抗错动易损性分析方法

禹海涛<sup>1</sup>, 许桦霖<sup>2</sup>, 卫一博<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 活动断层错动作用是导致穿断层隧道结构破坏的主要因素, 因此评估穿断层隧道结构的抗错动性能对于隧道抗震设计至关重要, 然而目前研究尚缺乏针对穿断裂带隧道结构抗错动性能的评估方法。为此, 提出了一种面向穿活动断裂带隧道结构抗错动性能评估的易损性分析方法。首先, 基于概率断层位错危险分析 (PFDHA) 推导隧址区断层位错超越概率计算公式; 其次, 建立围岩-断层-隧道相互作用体系的有限元分析模型, 并选定易损性分析指标, 采用拟静力弹塑性分析方法得到隧道损伤与断层位错量之间的量化关系; 最后采用隧址区断层位错超越概率计算公式计算出任意给定地震动水准条件下穿活动断裂带隧道结构的抗错动易损性。以某穿活动走滑断层隧道为例, 依据所建立的易损性评估方法开展影响因素分析, 探究了断层倾角对隧道结构抗错动性能的影响规律, 结果表明: 断层倾角越小, 穿断层处隧道结构的易损性越小, 且上盘侧隧道衬砌易损性显著高于下盘; 隧道易损性对 5~8 级矩震级的变化更为敏感; 隧道选线沿着近破裂带端部穿越可显著降低隧道结构的受损概率。该方法可以定量描述穿断层隧道在给定地震动强度下的易损性程度, 可为穿活动断裂带隧道结构抗震设计与抗错动性能评估提供科学依据和分析手段。

**关键词:** 穿断层隧道; 活动断裂带; 易损性; 地震响应; PFDHA

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)10-2060-09

**作者简介:** 禹海涛(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事地下工程防灾减灾方面的研究工作。E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn。

## Seismic fragility analysis method for evaluation of dislocation resistance of tunnels crossing active fault zones

YU Haitao<sup>1</sup>, XU Hualin<sup>2</sup>, WEI Yibo<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of

Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** As the dislocation of active fault is the main factor leading to the failure of the tunnels crossing the fault, it is essential for the seismic design to evaluate the dislocation resistance performance of the tunnels crossing active fault zones. However, the relevant methods are still lacking. A seismic fragility analysis method is proposed for evaluating the dislocation resistance performance of the tunnels crossing active fault zones. Firstly, the formula for calculating the exceedance probability of fault displacement at the tunnel site is derived based on the probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). Secondly, a three-dimensional elastic-plastic finite element analysis model for the rock-fault-tunnel interaction system is established. The seismic fragility analysis indexes are selected, and the quantitative relationship between tunnel damage and fault displacement is obtained using the pseudo-static pushover analysis method. Finally, the seismic fragility of the tunnels crossing active fault zones under any given ground motion levels is calculated using the formula for the exceedance probability of fault displacement in the tunnel site area. Taking a tunnel through an active strike-slip fault as an example, based on the established fragility analysis method, the influence law of fault dip angle on the dislocation resistance performance of tunnel structure is explored. It is shown that a smaller fault dip angle is associated with lower fragility of the tunnel structure, and the fragility of the tunnel lining in the hanging wall is significantly higher than that in the footwall. The fragility of the tunnel is more sensitive to variations in the moment magnitude scale of 5~8. The damage probability of tunnel structure can be significantly reduced by choosing the tunnel line to pass near the end of the fracture zone. The proposed method can quantitatively describe the fragility of the tunnel at different cross sections under given ground motion intensities and provide a scientific basis and analytical method for the seismic

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42177134); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

收稿日期: 2023-07-03

design and the evaluation of the dislocation resistance performance of the tunnels crossing active fault zones.

**Key words:** tunnel crossing fault; active fault zone; fragility; seismic response; PFDHA

## 0 引言

随着中国西部大开发战略的持续推进, 西部山岭地区隧道工程建设发展迅速。然而, 隧道建设不可避免穿越活动断裂带, 将会对隧道结构安全构成严重的威胁。例如, 2008 年汶川地震中, 穿断层破碎带区域的隧道结构发生了严重的衬砌垮塌<sup>[1]</sup>; 2022 年门源地震中, 由于冷龙岭断裂带的剧烈走滑错动, 使得大梁铁路隧道在断层错动面处发生超过 2 m 的水平位错, 从而造成了极为严重的结构破坏<sup>[2]</sup>。

目前国内外学者采用数值模拟手段针对穿活动断裂带隧道衬砌的地震响应特征开展了大量研究工作。Shahidi 等<sup>[3]</sup>基于二维有限元模型和拟静力方法, 通过在断层区域一侧施加强制错动位移, 研究了隧道结构沿纵向的受力分布规律; Anastasopoulos 等<sup>[4]</sup>基于有限元模拟对比分析了正断层错动和近断层强震动作用下的隧道结构非线性响应行为, 发现断层错动作用对隧道的影响远大于近断层强地震动作用; 甘星球等<sup>[5]</sup>与 Liu 等<sup>[6]</sup>同时考虑了断层错动与地震动的共同作用, 研究表明活动断层错动作用是导致隧道结构破坏的主要因素。值得注意的是, 目前研究主要针对给定断层错动量或地震动强度作用下的隧道结构响应。然而, 实际活动断裂带错动作用具有显著的随机性分布特征, 且历史地震观测表明, 近断层地震动强度与活动断层错动量存在一定的相关性<sup>[7-9]</sup>, 可见目前研究仍无法反映活动断裂带运动的不确定性, 因而无法在断层潜在风险下的工程决策提供概率性风险评估指导。

地震易损性分析是评估结构抗震性能的重要手段, 其中易损性是指在一定强度地震作用下结构损伤状态等于或超过某极限状态的条件概率。目前基于性能的地震工程 (performance-based earthquake engineering, PBEE) 框架, 并结合数值计算方法获得易损性曲线已成为该领域的主流趋势。Argyroudis 等<sup>[10-11]</sup>基于增量动力分析 (incremental dynamic analysis, IDA) 方法提出了水平横向地震动作用下存在腐蚀作用的浅埋地铁隧道结构易损性分析方法; Hu 等<sup>[12]</sup>利用等效线性化方法来考虑土层的动力非线性特征, 进而提出了一种适用于软土隧道的地震易损性分析方法; Osmi 等<sup>[13]</sup>基于考虑岩石隧道非线性力学特征的数值分析模型, 提出了含锚杆加固区岩石隧道的地震易损性分析方法。可见目前隧道工程抗震易损性主要关注地震动对隧道结构的影响, 尚缺乏针对穿断裂带隧道结构抗错动性能的评估方法, 因此难以满足跨断层隧道工程的

实际建设需求。

本文旨在建立面向穿活动断裂带隧道结构抗错动性能评估的易损性分析方法。首先引入概率性断层位错灾害分析 (PFDHA) 方法, 明确矩震级与活动断层位错量的概率关系; 其次建立围岩-断层带-隧道结构耦合体系的三维弹塑性有限元模型, 并进行拟静力推覆弹塑性分析; 最后给出活动断裂带错动作用下隧道抗错动易损性曲线。基于该方法, 通过参数化分析, 进一步探究隧道选址、断层倾角等因素对穿活动断裂带隧道抗震易损性的影响规律。

## 1 隧道抗错动易损性分析流程

本文建立的穿活动断裂带隧道抗错动易损性基本分析流程如图 1 所示, 具体如下:

(1) 建立断裂带平均位错 ( $D_{ave}$ ) 与地震动强度 (intensity measure, IM) 的概率关系<sup>[8]</sup>、位错相对值 ( $D_{norm}$ ) 与破裂段相对位置 ( $l/RL$ ) 的概率关系 ( $D_{norm}$  为破裂带任意位置处位错量  $D$  与  $D_{ave}$  的比值<sup>[14-15]</sup>), 从而给出隧址区断层位错概率模型。

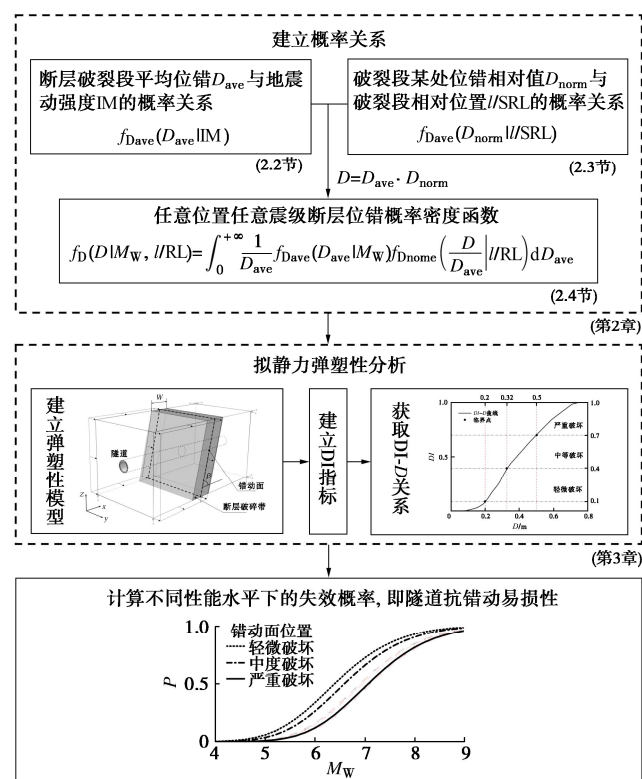


图 1 穿活动断裂带隧道抗错动易损性分析流程

Fig. 1 Analysis process of seismic fragility analysis method for evaluation of dislocation resistance of tunnels crossing active fault zones

(2)建立围岩-断层-隧道相互作用体系的弹塑性分析数值模型,通过计算分析得出损伤指标(damage index, DI)与断层位错量  $D$  的量化关系。

(3)依据步骤(1)建立的隧址区断层位错概率公式,计算结构在不同性能水平下的失效概率,即可得到穿活动断裂带隧道抗错动易损性。

## 2 断层位错超越概率计算方法与地震动强度参数的确定

### 2.1 断层位错超越概率计算流程

目前已有学者<sup>[7]</sup>提出概率断层位错危险性分析方法(probabilistic fault displacement hazard analysis, PFDHA),旨在通过研究断层运动规律与概率关系以评估穿断层结构面临的危险性。

PFDHA 方法一般简化断层几何结构模型如图 2 所示。图中  $l$  为沿断层走向距左侧破裂端部的位置;  $RL$  为该破裂长度(rapture length)。

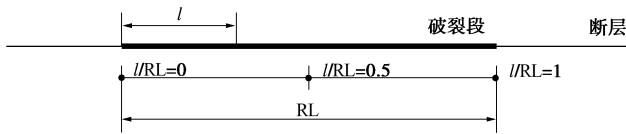


图 2 断层几何结构模型

Fig. 2 Geometrical model for surface fault

该方法认为断层位错发生在破裂段上,且破裂段平均位错量  $D_{ave}$  与地震动强度 IM 相关<sup>[8]</sup>(目前 PFDHA 方法均以矩震级  $M_w$  作为 IM)、破裂段上任意位置处的相对位错大小  $D_{norm}$ <sup>[14-15]</sup>与破裂段相对位置  $l/RL$  相关。

可见,断层位错超越概率分析需要事先确定概率密度函数  $f_{D_{ave}}(D_{ave}|IM)$  和  $f_{D_{norm}}(D_{norm}|l/RL)$ 。为此,给出隧址区断层位错的超越概率计算流程如下:

(1)建立  $D_{ave}$ -IM 概率关系以及  $D_{norm}$ - $l/RL$  概率关系。

(2)计算断层破裂段任意位置处在不同地震动强度下的断层位错超越概率。

(3)最后考虑隧道穿越断层破裂段位置的不确定性,计算隧址区断层位错量的超越概率。

### 2.2 矩震级与断层平均位错关系

地震动强度参数(IM)是地震易损性分析的关键指标之一。在传统隧道抗震易损性分析中,通常将峰值地表加速度(PGA)作为 IM 指标<sup>[16]</sup>。虽然目前研究仍无法给出活动断裂带错动作用下 PGA 与断层位错量之间的量化表征关系,但是关于断层参数与矩震级( $M_w$ )关系的研究相对较多<sup>[8, 17-19]</sup>,矩震级概念最早由 Kanamori<sup>[18]</sup>提出,定义如下式所示<sup>[20]</sup>:

$$M_0 = \mu \cdot RL \cdot RW \cdot D_{ave} \quad (1)$$

$$M_w = \frac{2}{3} \log \left[ \frac{M_0}{M_0(0)} \right] \quad (2)$$

式中:  $M_0$  为地震矩;  $RL$  为该地震矩下断层的破裂长度;  $RW$  为该地震矩下断层的破裂宽度;  $D_{ave}$  为该地震矩下断层的平均位错量;  $\mu$  为断层的剪切模量;  $M_0(0)$  为矩震级为 0 的地震矩,其值为  $10^{9.1} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

矩震级作为地震矩的一种映射变换,能够与断裂带破裂过程的物理表征直接关联,且能够合理反映地震作用下断层错动的物理特性和本征表达,故本文选用  $M_w$  作为 IM 来表征地震动强度。

由式(1),(2)可知,断层平均位错量  $D_{ave}$  与矩震级  $M_w$  服从对数关系,可假设给定  $M_w$  下的  $D_{ave}$  服从对数正态分布。若  $\lg(D_{ave})$  的均值和标准差分别为  $\lg(\mu_{AD})$  和  $\sigma_{AD}$ , 则随机变量  $D_{ave}|M_w$  的概率密度函数可表示为

$$\lg(\mu_{AD}) = a \cdot M_w - b \quad (3)$$

$$f_{D_{ave}}(D_{ave} | M_w) = \frac{1}{\ln 10 \sqrt{2\pi} D_{ave} \sigma_{AD}} \cdot \exp \left[ -\frac{(\lg D_{ave} - \lg \mu_{AD})^2}{2\sigma_{AD}^2} \right] \quad (4)$$

式中:  $a$  和  $b$  为经验系数,可根据不同的数据集拟合求得。

### 2.3 位错相对值与破裂带相对位置关系

目前普遍采用的断层位错分布模型通过基于观测的经验分析来描绘  $D_{norm}$  与  $l/RL$  的关系。记  $D_{norm}$  的均值为  $\mu_{ND}$ , 通过拟合可以得到  $\mu_{ND}$ - $l/RL$  函数关系<sup>[14]</sup>。

根据拟合函数的差异性,目前已有针对  $\mu_{ND}$ - $l/RL$  曲线形状的不同分布模型,例如对称椭圆分布<sup>[15]</sup>、对称双折线分布<sup>[7]</sup>、非对称三角分布<sup>[19]</sup>等,可以统一表示为

$$\mu_{ND} = g(l/RL) \quad (5)$$

式中:  $g(\cdot)$  为拟合函数形式(椭圆形、三角形等)。

通常假设随机变量  $D_{norm}|l/RL$  服从对数正态分布,以拟合结果残差标准差作为  $\lg(D_{norm})$  的标准差  $\sigma_{ND}$ , 则其概率密度函数可以表示为

$$f_{D_{norm}}(D_{norm} | l/RL) = \frac{1}{\ln 10 \sqrt{2\pi} D_{norm} \sigma_{ND}} \cdot \exp \left[ -\frac{(\lg D_{norm} - \lg \mu_{ND})^2}{2\sigma_{ND}^2} \right] \quad (6)$$

### 2.4 隧址区断层位错超越概率计算公式

若已知  $f_{D_{ave}}(D_{ave}|M_w)$  和  $f_{D_{norm}}(D_{norm}|l/RL)$ , 断层位错概率关系可采用联合条件概率密度函数表示为

$$f_D(D | M_w, l/RL) = f_D(D_{norm} \cdot D_{ave} | M_w, l/RL) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{D_{ave}} f_{D_{ave}}(D_{ave} | M_w) f_{D_{norm}}\left(\frac{D}{D_{ave}} | l/RL\right) dD_{ave} \quad (7)$$

则在某地震动作用下穿破裂带任意位置处隧道结构的断层位错超越概率为

$$P(D > D_0 | M_w, l / RL) = \int_{D_0}^{+\infty} f_D(D | M_w, l / RL) \cdot (8)$$

另外, 若隧道选址位置仍存在不确定性, 可假设隧道选址在破裂段服从均匀分布, 则隧址区在某地震动作用下超越一定位错的概率可表示为

$$P(D > D_0 | M_w) = \int_0^1 P(D > D_0 | M_w, l / RL) d(l / RL) \quad (9)$$

3 数值模型与损伤指标确定

3.1 数值模型建立

本文重点关注活动断层的错动作用, 忽略断层产生的地震动及惯性力效应, 采用拟静力方法分析。

本节模型以走滑断层为例, 图 3 为穿活动断裂带隧道的围岩-断层-结构三维模型示意图。模型宽度取隧道直径的 5 倍以上, 可忽略侧向边界的影响<sup>[21]</sup>。图中阴影区域为活动断裂带分布范围, 宽度为  $W$ 。假设断层错动面位于断裂带中心断面, 错动面倾角为  $\beta$ , 且错动面处的力学行为服从莫尔-库仑摩擦接触定律。基于拟静力分析方法, 活动断层带两侧地盘约束如下: 一侧地盘视为固定; 另一侧通过施加强制位移来模拟活动断层的错动作用。

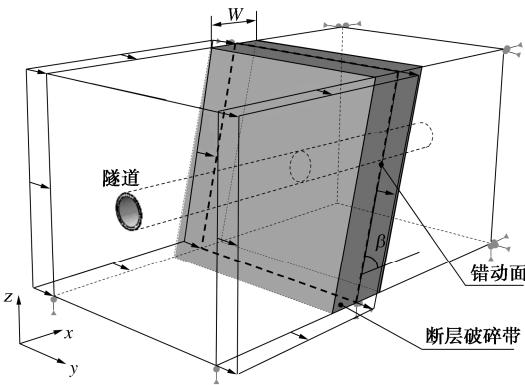


图 3 模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model

隧道结构抗错动基本分析流程如下:

- 步骤 1: 围岩初始地应力平衡;
- 步骤 2: 采用收敛约束法<sup>[22]</sup>进行隧道开挖模拟;
- 步骤 3: 采用静力形式逐级输入断层位错。

3.2 结构损伤指标

结构损伤指标 (DI) 是易损性分析所需的关键参数之一, 用于定量描述隧道结构的损伤状态。

基于有限元模型, 考虑到隧道结构在断层错动作用下的三维非线性响应特征, 选用混凝土损伤塑性

(CDP) 模型对衬砌结构损伤状态进行表征, 该模型能够较好地表征隧道衬砌的损伤状态以及复杂受力状态下混凝土材料的开裂及压碎行为<sup>[23]</sup>。CDP 中混凝土的受压和受拉损伤采用归一化指标  $d_c$  和  $d_t$  来表征。本文针对隧道横断面定义某断面的损伤指标。

首先选取结构每个单元质心位置处的损伤因子 (压碎损伤指标  $d_{ci}$  与开裂损伤指标  $d_{ti}$  最大值) 来表征该单元的损伤大小。那么隧道不同横断面位置处的结构损伤可由该断面所有单元损伤对单元体积加权平均得到, 即损伤体积比, 如式 (10)。该指标可定量表征该断面结构的整体损伤程度。

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^n d_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, d_i = \text{Max} \{d_{ci}, d_{ti}\} \quad (10)$$

式中:  $d_i$  为第  $i$  个单元质心位置处的损伤因子大小,  $V_i$  为第  $i$  个单元的体积。

以隧道结构的弹塑性损伤发展状况为安全状态划分依据, 将各衬砌截面按照损伤指标 DI 大小划分为安全、轻微损伤、中等损伤以及严重损伤 4 个损伤状态 (damage status, ds), 如表 1 所示<sup>[24]</sup>。

表 1 损伤状态  
Table 1 Damage states

ds <sub>i</sub>	损伤状态	DI	描述
ds <sub>1</sub>	安全	0≤DI<0.1	主要发生弹性变形
ds <sub>2</sub>	轻微损伤	0.1≤DI<0.4	结构出现较大的塑性变形, 但强度和功能性无实质性减弱
ds <sub>3</sub>	中等损坏	0.4≤DI<0.7	局部或整体塑性变形超出功能性限值, 结构仍保持完整性
ds <sub>4</sub>	严重损伤	DI≥0.7	严重损伤, 位移和塑性变形发散, 结构发生失稳、压溃、断裂、失去完整性

4 分析与讨论

4.1 分析模型及参数

本节旨在通过算例分析说明本文方法的具体实施流程及可行性。假设某隧道工程穿越走滑活动断层, 埋深 95 m, 其轴线与断层走向正交。该断层倾角 76°, 断层破碎带宽度 36 m, 断层错动面位于破碎带中心。隧道截面形式为圆形, 内径和外径分别为 8.6, 10 m。隧道和围岩的力学参数如表 2 所示。

依据本文建立的易损性计算方法对该穿断层隧道结构的抗错动性能进行分析, 建立有限元模型如图 4 所示, 模型整体尺寸为 400 m×200 m×200 m。隧道与围岩均采用六面体实体单元模拟, 两者间设置绑定接触。以摩擦接触模拟断层错动面, 摩擦系数取 0.7。模拟断层错动时, 位错施加在上盘围岩两侧。岩体塑性本构选用 Drucker-Prager 屈服准则, 混凝土选用 CDP 塑性损伤本构模型, 本文 C30 混凝土对应的 CDP

本构曲线标定如图 5 所示。

表 2 围岩力学参数

Table 2 Mechanical parameters of surrounding rock					
名称	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	杨氏模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	屈服应力 $\sigma_y/\text{MPa}$
破碎带	2.0	300	0.35	30	5
岩体	2.5	2500	0.30	45	30
C30 混凝土	2.4	24500	0.20	—	—

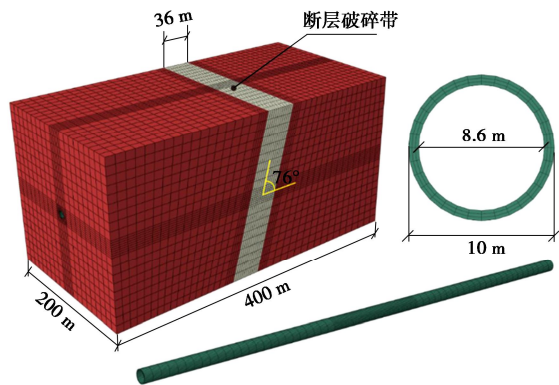


图 4 有限元分析模型

Fig. 4 Schematic diagram of FEM model

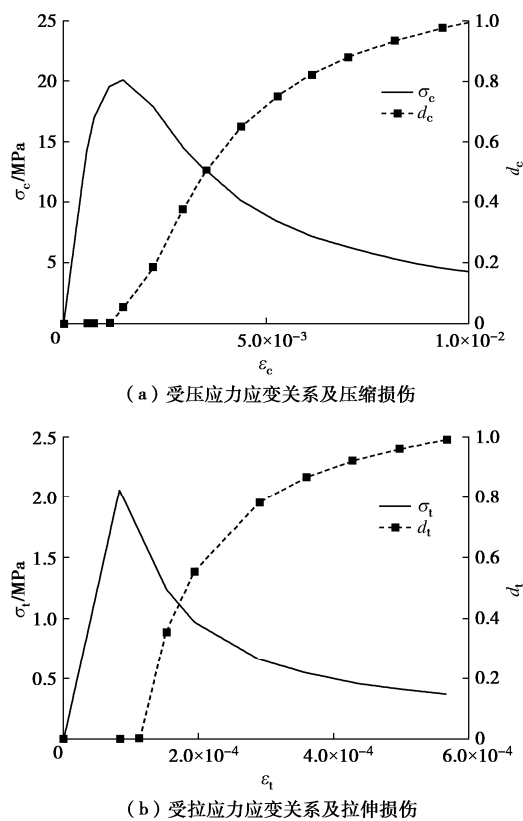


图 5 C30 混凝土应力应变及损伤关系

Fig. 5 Relationship among stress, plastic strain and damage of C30

4.2 断层位错的概率密度函数

对于  $D_{ave}$ -IM 概率关系，基于 Anderson 等<sup>[9]</sup>共 55 次地震数据进行拟合，得到走滑断层平均位错量与矩

震级关系，如图 6 所示，其中标准差  $\sigma_{AD} = 0.251$ ，平均位错量均值  $\mu_{AD}$  关于  $M_W$  的拟合函数表达为

$$\lg(\mu_{AD}) = 0.598M_W - 4.055 \quad (11)$$

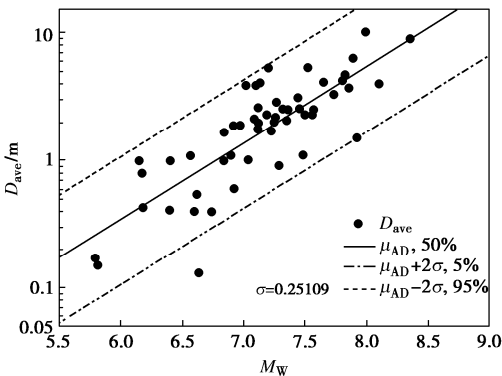


图 6 断层破裂带平均位错关于矩震级拟合关系

Fig. 6 Regression diagram of rupture average dislocation with respect to moment magnitude

关于  $D_{norm}$ - $l/RL$  概率关系，本文基于 Wesnousky<sup>[25]</sup>共 9 次地震的位错分布数据，采用椭圆分布进行拟合，得到如图 7 所示的走滑断层位错相对值与破裂带相对位置的关系，其中标准差  $\sigma_{ND} = 0.379$ ，位错相对值均值  $\mu_{ND}$  关于破裂带相对位置  $l/RL$  的拟合函数表示为

$$\lg(\mu_{ND}) = 1.699\sqrt{1 - 4(l/RL - 0.5)^2} - 1.742 \quad (12)$$

将式 (10)，(11) 代入式 (4)，(6)，即可得到  $f_{D_{ave}}$  ( $D_{ave}|IM$ )与  $f_{D_{norm}}$  ( $D_{norm}|l/RL$ )，再根据数值模拟确定各损伤状态的临界位错量，代入式 (8) 即可求得隧道区在某地震动水准下超越该临界位错的概率，即隧道结构的抗活断层错动易损性。

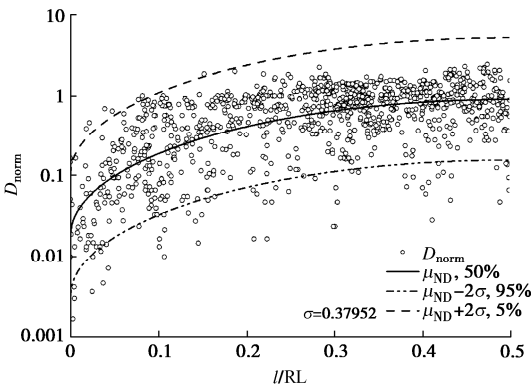


图 7 断层位错相对值与破裂带相对位置拟合关系

Fig. 7 Fitting relationship between relative value of dislocation and relative position of rupture

4.3 易损性分析

根据 3.2 节定义的损伤指标，重点针对隧道结构 3 个关键断面进行易损性分析，即错动面与隧道相交断面、上下盘-断层破碎带边界面与隧道相交断面，如图 8 所示。



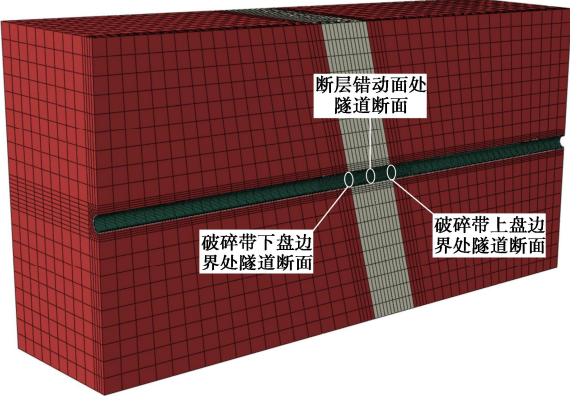


图 8 关键断面位置示意图

Fig. 8 Section diagram of three key tunnel locations

以错动面处隧道断面损伤情况为例, 图 9 为隧道衬砌损伤指标  $DI$  随断层错动量  $D$  的演化关系曲线。根据表 1 定义的隧道结构损伤状态分级, 从图中可以看出: 该断面在断层错动量达到 0.2 m 时进入轻微损伤状态; 断层错动量达到 0.32 m 时, 结构进入中等损坏状态; 断层错动量达到 0.5 m 时达到严重损伤状态。

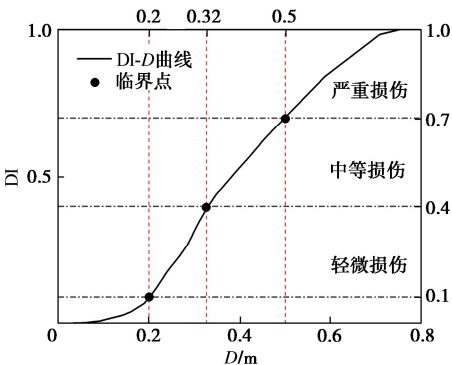


图 9 断层错动面处衬砌段损伤指标与位错量关系

Fig. 9 Relationship between damage index of lining section at dislocation plane and slip-displacement

图 10 展示了上述 4 个阶段下该隧道断面的损伤分布情况。从损伤演化特征可以看出, 该断面结构损伤首先在拱顶和仰拱处开始发展, 随着断层错动量的增加, 结构损伤逐渐扩展至整个截面, 最终导致该衬砌截面的整体失效。将断面各点损伤以体积进行加权平均可得该断面的损伤指标。

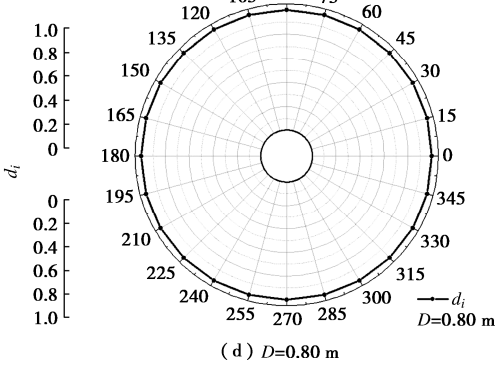
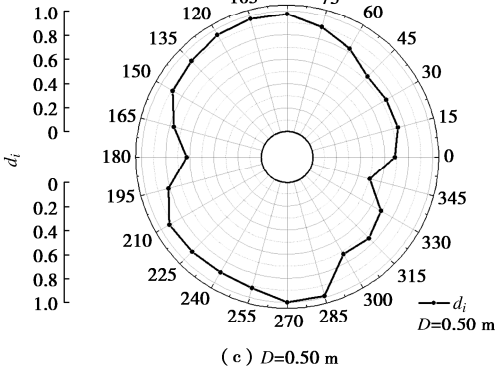
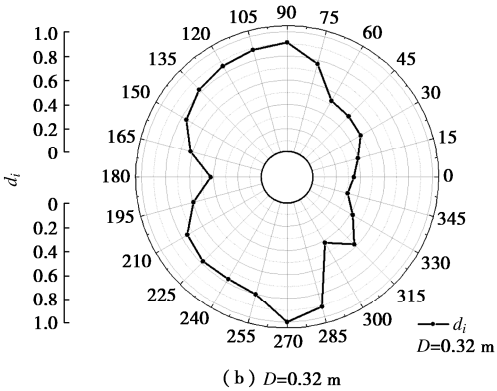
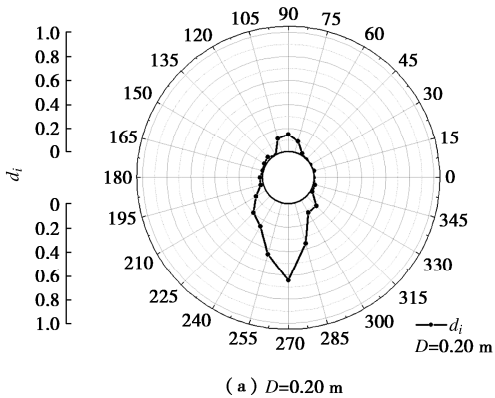


图 10 不同错动量下断层错动面处衬砌段损伤开展分布情况  
Fig. 10 Damage development and distribution of lining section at dislocation surface

选取穿越断层破碎带的上下盘边界面以及断层错动面的 3 处关键隧道断面, 各断面的易损性曲线如图 11 所示。图中曲线分别为隧道 3 个关键断面在不同矩震级下达到或超越规定损伤状态的概率。

由图 11 可知, 在同一矩震级下, 断层错动面处隧道结构的损伤概率最高, 上盘与断层交界处隧道断面次之, 下盘与断层交界处隧道断面最低。例如, 对于中度损伤状态, 在矩震级为 7 的情况下, 断层错动面处隧道的易损性概率为 0.67, 上盘与断层交界处隧道失效概率为 0.51, 下盘与断层交界处仅为 0.47。这是由于断层错动面以强制剪切作用为主, 变形最大且损伤最严重; 而上下盘与断层交界处的地层存在差异, 会发生差异变形, 但这种变形程度不及在错动面直接

发生的剪切作用,因此断层错动面处对隧道更为不利。对比上下盘与断层交界处隧道断面的易损性曲线可以看出,在同一震级下,上盘位置处隧道达到同等级损伤状态的概率高于下盘位置处隧道,即上盘效应<sup>[26]</sup>。

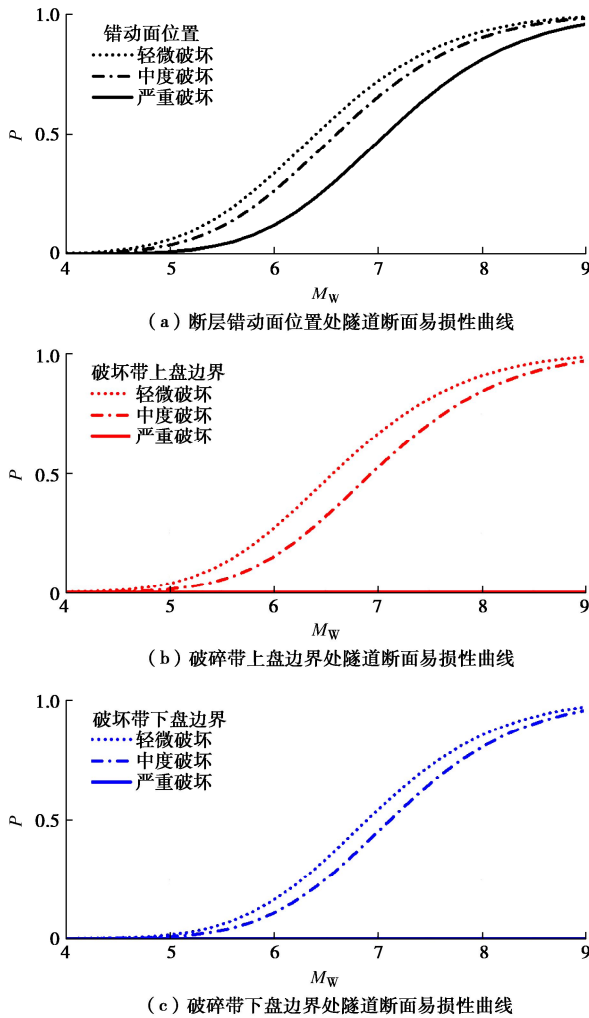


图 11 关键断面位置处隧道易损性曲线

Fig. 11 Fragility curves of lining section at key section

此外,还可以发现在震级为 4~5 级和 8~9 级的范围内,易损性曲线变化较为平缓,特别是在 4~5 级震级范围内,隧道的损伤概率相对较低且变化较小,可以不需要采取额外的抗震措施。然而,在 5~8 级震级范围内,易损性曲线变化非常显著,表明对震级变化的敏感性较强,即使是小幅度的震级变化,也会导致隧道损伤状态出现显著的波动。因此,在工程设计阶段,需要精确评估地震动水平并提供足够的抗震性能,以应对这种较大的随机性和波动性。

#### 4.4 参数化分析

##### (1) 断层倾角对隧道抗错动易损性的影响

在 4.1 节分析模型及参数的基础上,为进一步研究断层倾角对隧道抗错动易损性的影响,考虑到实际断层倾角的分布情况,模型中断层倾角分别取为 63°,

76°, 90°, 计算模型及参数同上节。

以中度损伤状态为例,图 12 给出了不同断层倾角下 3 个关键断面处隧道结构的抗错动易损性曲线。由图可知,断层倾角越大,隧道易损性相对越高。如矩震级为 7 时,断层错动面处隧道的易损性概率分别为 0.62 (断层倾角为 63°)、0.67 (断层倾角为 76°) 和 0.71 (断层倾角为 90°)。这是由于随着断层倾角的增加,断层与隧道衬砌相交范围减小,隧道衬砌段遭受的断层位错更为集中,损伤也更加严重。因此,应对穿越倾角较大走滑断层的隧道加以重视,应在选线时尽量避开或者采用合理的抗错断措施。

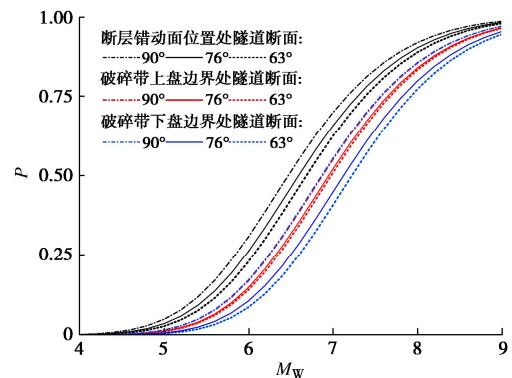


图 12 穿不同倾角断层隧道结构中中等损伤状态的易损性曲线

Fig. 12 Moderate damage fragility curves of tunnel crossing different dip angles fault at key section

此外,通常认为上下盘在断层处存在的地应力突变是导致上盘效应的关键因素<sup>[26]</sup>,而且断层倾角越小,地应力突变也就越大,上盘效应也越为显著。如图 12 所示,当倾角为 90° 时,上下盘与断层交界处隧道抗错动易损性曲线基本重合,但对于倾角为 76° 及 63° 的工况而言,下盘与断层交界处隧道的抗错动易损性低于上盘,且断层倾角越小此现象越为明显。

##### (2) 穿断层隧道选址对结构抗错动易损性的影响

在 4.1 节分析模型及参数的基础上,为进一步研究穿断层隧道选址对结构抗错动易损性的影响机制,假设隧道穿破裂带位置  $l/RL$  分别取为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 即涵盖了破裂带端部至中部不同位置,计算模型及参数同上节。

以断层错动面处隧道结构的中度损伤状态为例,图 13 给出了不同选址处的抗错动易损性曲线。由图 13 可知,选址越靠近破裂带端部,隧道结构的易损性相对越低。如矩震级为 7 时,隧道选址  $l/RL$  为 0, 0.1, 0.2 相对  $l/RL=0.5$  时的易损性可分别降低 99.3%, 54.6%, 22.4%。然而当选址位置进一步靠近破裂带中心,如  $l/RL=0.4$ , 易损性变化幅度明显减小,仅降低 1.6%。若要求该断面在矩震级 7 级时达到中等破坏的

概率低于 0.4, 则隧道选址需位于距破裂带端部 1/10 的总破裂带长度的区间内。分析表明即使无法完全避免隧道穿越破裂带, 如选择尽量靠近破裂带端部位置穿越则可显著降低隧道结构的受损概率。因此, 建议隧道选址应充分考虑断层破裂带与隧道线路的位置关系, 最大程度提高隧道结构的抗错动安全性。

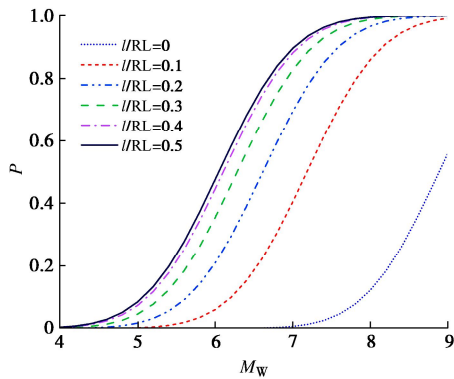


图 13 穿不同位置破裂带隧道中等损伤状态易损性曲线  
Fig. 13 Fragility curves of moderate damage state in tunnels crossing different rupture positions

## 5 结 论

本文提出了面向穿活动断裂带隧道结构的抗错动易损性分析方法, 首先建立了 PFDHA 概率分析模型, 并基于该模型选用矩震级作为地震动强度指标, 依据混凝土损伤塑性模型建立了隧道结构损伤指标, 进而通过矩震级大小与活动断层位错量的概率统计回归关系, 结合基于三维弹塑性有限元模型的拟静力推覆分析方法, 建立了穿断层隧道抗错动易损性程度的表征方法, 从而为穿活动断裂带隧道抗震风险评估及结构抗震设计提供了有效的分析手段。基于该方法对某穿走滑断裂带隧道进行应用分析, 并研究了断层倾角对隧道抗错动易损性的影响规律, 主要得到以下 3 点结论。

(1) 断层错动面处的衬砌段易损性最高, 断层破碎带与上下盘交界面处的衬砌段易损性次之。相比而言, 穿走滑断裂带隧道上盘易损性高于下盘, 即表现出明显的上盘效应, 而且断层倾角越小, 错动面处隧道易损性越小, 上盘效应也更为显著。

(2) 在矩震级为 4~5 级和 8~9 级范围内, 隧道易损性曲线变化较为平缓, 而在 5~8 级矩震级范围内, 隧道的易损性变化显著, 对震级变化较为敏感。因此在工程设计阶段, 需要准确评估地震动水平以应对较大概率的波动变化。

(3) 隧道选址对结构抗错动易损性影响显著, 如尽量靠近破裂带端部位置穿越可显著降低隧道结构的受损概率。建议隧道工程线路规划时应充分考虑穿越

破裂带的不同位置关系, 以最大程度提高隧道结构的抗错动安全性。

需要说明的是, 本文建立的隧道易损性分析方法适用于任何活动断层类型, 文中采用的概率密度函数和有限元模型边界条件仅适用于走滑断层, 但对于其他类型断层, 仅需调整有限元模型并依据统计关系修改概率密度函数。针对具体工程, 可依据工程场地的历史震害数据建立概率分析模型, 进而应用本方法为穿活动断裂带隧道结构抗震设计与抗错动性能评估提供科学依据。

## 参考文献:

- [1] 崔光耀, 王明年, 于 丽, 等. 汶川地震断层破碎带段隧道结构震害分析及震害机理研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 122-127. (CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, et al. Study on the characteristics and mechanism of seismic damage for tunnel structures on fault rupture zone in Wenchuan seismic disastrous area[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11): 122-127. (in Chinese))
- [2] 张 威, 李 明, 姬云平, 等. 青海门源 M6.9 地震典型隧道破坏特征分析与启示[J]. 地震工程学报, 2022, 44(3): 661-669. (ZHANG Wei, LI Ming, JI Yunping, et al. Analysis and enlightenment of typical failure characteristics of tunnels caused by the Menyuan M6.9 earthquake in Qinghai Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 661-669. (in Chinese))
- [3] SHAHIDI A R, VAFAEIAN M. Analysis of longitudinal profile of the tunnels in the active faulted zone and designing the flexible lining (for Koohrang-III tunnel)[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(3): 213-221.
- [4] ANASTASOPOULOS I, GEROLYMOS N, DROSOS V, et al. Behaviour of deep immersed tunnel under combined normal fault rupture deformation and subsequent seismic shaking[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(2): 213-239.
- [5] 甘星球, 徐 锋, 王晓伟, 等. 断层错动隧道地震响应规律及减震模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(3): 100-106. (GAN Xingqiu, XU Feng, WANG Xiaowei, et al. Simulation study on seismic response laws and seismic mitigation measures of tunnels under fault dislocation[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(3): 100-106. (in Chinese))
- [6] LIU G, ZHANG Y, REN J, et al. Seismic response analysis of tunnel through fault considering dynamic interaction between rock mass and fault[J]. Energies, 2021, 14(20): 6700.
- [7] PETERSEN M D, DAWSON T E, CHEN R, et al. Fault displacement hazard for strike-slip faults[J]. Bulletin of the



- Seismological Society of America, 2011, **101**(2): 805-825.
- [8] WELLS B D L, COPPERSMITH K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, **84**(4):974-1002.
- [9] ANDERSON J G, BIASI G P, ANGSTER S, et al. Improved scaling relationships for seismic moment and average slip of strike-slip earthquakes incorporating fault-slip rate, fault width, and stress drop[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2021, **111**(5): 2379-2392.
- [10] 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.
- [11] ARGYROUDIS S, TSINIDIS G, GATTI F, et al. Effects of SSI and lining corrosion on the seismic vulnerability of shallow circular tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, **98**: 244-256.
- [12] HU X, ZHOU Z, CHEN H, et al. Seismic fragility analysis of tunnels with different buried depths in a soft soil[J]. Sustainability, 2020, **12**(3): 892.
- [13] OSMI S K C, AHMAD S M, ADNAN A. Seismic fragility analysis of underground tunnel buried in rock[C]// Proceedings International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Springer, Germany, 2015.
- [14] LAVRENTIADIS G, ABRAHAMSON N. Generation of surface-slip profiles in the wavenumber domain[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2019, **109**(3): 888-907.
- [15] HEMPHILL-HALEY M A, WELDON R J. Estimating prehistoric earthquake magnitude from point measurements of surface rupture[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, **89**(5): 1264-1279.
- [16] TSINIDIS G, KARATZETZOU A, STEFANIDOU S, et al. Developments in seismic vulnerability assessment of tunnels and underground structures[J]. Geotechnics, 2022, **2**(1): 209-249.
- [17] TOCHER D. Earthquake energy and ground breakage[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1958, **48**(2): 147-153.
- [18] KANAMORI H. The energy release in great earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 1977, **82**(20): 2981-2987.
- [19] MANIGHETTI I, CAMPILLO M, SAMMIS C, et al. Evidence for self-similar, triangular slip distributions on earthquakes: implications for earthquake and fault mechanics[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005, **110**(B5): 1-25.
- [20] BORMANN P, DEWEY J W. The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes[M]// New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2). Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2012: 1-44.
- [21] VAZOURAS P, KARAMANOS S A, DAKOULAS P. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, **41**: 164-180.
- [22] PANET M, GUENOT A. Analysis of convergence behind the face of a tunnel[C]// Tunnelling 82, Proceedings of the 3rd International Symposium, 1982: 197-204.
- [23] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, **25**(3): 299-326.
- [24] CALVI G M, PINHO R, MAGENES G, et al. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years[J]. Iset Journal of Earthquake Technology, 2006, **43**(3): 75-104.
- [25] WESNOUSKY S G. Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, **98**(4): 1609-1632.
- [26] 徐正. 基于发震断裂位移的强震区区域地应力场演化分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2014. (XU Zheng. Analysis of the Evolution of Crustal Stress Field in Meizoseismal Area Based on the Seismogenic Fault Displacement[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese))