黄禄渊,王成虎,杨树新.基于同震位移的隧道抗震设计及其工程应用[J].地震工程学报,2019,41(1):29-35.doi:10.3969/j. issn.1000-0844.2019.01.029

HUANG Luyuan, WANG Chenghu, YANG Shuxin. Seismic Design and Engineering Application of Tunnels Based on Coseismic Displacement[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1):29-35.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.029

# 基于同震位移的隧道抗震设计及其工程应用

黄禄渊<sup>1,2</sup>,王成虎<sup>1</sup>,杨树新<sup>1</sup>

(1. 中国地震局地壳应力研究所,北京 100085;

2. 中国地质科学院地质研究所,大陆构造与动力学重点实验室,北京 100037)

摘要:首次在隧道抗震设计中考虑地震同震位移场,通过搜集历史地震破裂信息估计工程区地震位错,采用"分裂节点法"获得隧道周边的同震位移场,并联合拟静力隧道抗震设计方法,成功应用于 某公路隧道。研究表明:基于同震位移的隧道抗震设计方法能够为我们估算未来可能的地震灾害 提供有力的定量分析工具;当地层自振周期和基岩反应谱未知,可以利用同震位移场估算远场剪应 变开展隧道拟静力抗震设计;例如对于云南某隧道,如果龙陵—澜沧断裂带发生地震,隧道南北两 端强制位移约为6 cm。如果龙陵—瑞丽断裂发生地震,由于强制位移导致隧道南北部分出现反向 运动,将会对隧道中部产生剪切作用,且隧道出现明显的横向和垂向差异运动。

关键词:同震位移;隧道抗震;拟静力法;地震位错

 中图分类号: TU44
 文献标志码:A
 文章编号: 1000-0844(2019)01-0029-07

 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.029

## Seismic Design and Engineering Application of Tunnels Based on Coseismic Displacement

HUANG Luyuan<sup>1,2</sup>, WANG Chenghu<sup>1</sup>, YANG Shuxin<sup>1</sup>

(1. Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China; 2.Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: In this work, the theory of the coseismic displacement field is first considered in the aseismic design of tunnels. We estimate earthquake dislocation in the engineering area by collecting historical earthquake rupture data. The coseismic displacement field around the tunnel is calculated through the splitting nodes method and applied in combination with the pseudostatic method in the aseismic design of a highway tunnel in Yunnan Province. Results show that the method based on coseismic displacement for the aseismic design of tunnels can provide a powerful quantitative analytical tool for the estimation of possible future earthquake disasters. If the natural vibration period and bedrock response spectrum are unknown, the coseismic displacement field can be used to estimate the far-field shear strain when conducting the quasistatic aseismic design of the tunnel. The forced displacement of the north and south segments of a tunnel in Yun-

收稿日期:2018-06-04

基金项目:国家自然基金青年基金(41704097);中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项项目(Y201706);中央级科研院所基本 科研业务专项项目(ZDJ2017-12)

第一作者简介:黄禄渊(1988-),男,博士,助理研究员,主要从事地球动力学方面的工作。E-mail:pekinghlyl@163.com。

nan is approximately 6 cm if earthquakes occur along the Longling—Lancang Fault Zone. If earthquakes occur along the Longling—Ruili Fault, forced displacement will cause reverse movement in the north and south parts of the tunnel. These movements will exert a pronounced shear effect on the middle of the tunnel, and lateral and vertical differential movements in the tunnel will intensify. Keywords: coseismic displacement; seismic design of tunnel; pseudo-static method; earthquake dislocation

#### 0 引言

我国的地下交通网络开发,尤其是隧道建设取 得了不俗的进展。地下结构由于受围岩约束抗震性 能优于地面结构,因此在以往隧道的抗震研究中没 有得到足够重视。随着 1995 年日本阪神、2008 年 汶川等破坏性地震中许多隧道遭受破坏<sup>[1,2]</sup>,类似 隧道破坏案例已经引起了工程界的广泛关注,人们 意识到需要加强对隧道抗震和减震的研究。

前人对隧道抗震的关注主要集中于地震惯性 力,认为地震引起的强惯性力导致结构过度变形而 发生破坏。近年来,越来越多学者关注到大量地下 结构破坏与断层同震错动有关<sup>[3,4]</sup>。除了发震断层 外,震区中小规模断层和次级断层也会产生被动的 同震错动,这种同震效应会破坏穿越断层的地下结 构<sup>[5]</sup>,例如未跨越映秀一北川断裂的龙溪隧道受次 级断层影响遭受了剪切错动破坏。穿越发震断层或 次级断层的隧道都有可能由于地震同震位移场而遭 受破坏。

由于地下隧道线路取决于交通功能需求,隧道 选址往往难以完全避让断层,断层错动引起的地下 岩体同震形变场成为地下结构抗震设计亟待解决的 问题。本文首次在隧道抗震设计中考虑地震同震位 移场,通过搜集历史地震破裂信息估计工程区未来 地震位错量,采用"分裂节点法"获得隧道周边的同 震位移场,并联合拟静力隧道抗震设计方法,应用于 云南某高速公路隧道的抗震设计。本文初步尝试了 在隧道抗震设计中定量考虑同震位移场,能够为隧 道抗震设防提供新的研究思路和分析手段。

#### 1 同震位移场及隧道破坏实例

活断层错动能够使覆盖土层产生永久位移,对 穿越断层的地下结构等产生不可修复性的破坏。断 层错动引起的同震位移场可以用位错理论描述, Steketee<sup>[6]</sup>最早把位错理论引入地震学,导出了弹 性半无限空间中走滑断层的位移格林函数。其后, 许多地震学家针对不同地球模型和断层类型推导出 了解析或半解析的同震变形位错表达式,其中最经 典的是 Okada 在前人工作基础上总结出了半无限 空间介质剪切与张拉断层引起的地表和内部位移、 应变表达式<sup>[78]</sup>。根据 Okada 解析表达式,活断层 错动的走滑、倾滑和张拉分量将会分别导致如图 1 所示的地表和地下形变。



Fig.1 Coseismic displacement field induced by fault dislocation

断层错动引起的同震位移场会对隧道产生不可 恢复的破坏。例如:1930年日本伊豆地震中丹那线 排水隧洞在穿越丹那断层处发生 2.39 m 水平错位 和 0.6 m 垂向错位;1971 年美国圣佛南都地震,与 SantaSuzana 断层和 Sylmar 断层临近的隧道最大 垂直位错量约为 2.29 m<sup>[9]</sup>;1999 年台湾集集地震中 某水电站地下输水隧道水平和垂向变形分别达到 3 m和 4 m;2008 年汶川地震,断层错动导致龙溪隧 道发生约1m竖向错动变形<sup>[10]</sup>,隧道衬砌拱部 塌落。

#### 基于同震位移场的隧道抗震设计 2

#### 2.1 同震位移场计算

由于传统有限元法使用连续形函数,在处理地 震位错这种间断解问题时,需要采用特殊处理方法, 如"DG法"、"罚函数法"、"分裂节点法"及"扩展有 限元法"等[11-14]。相比其他方法,"分裂节点法"具有 物理含义明确,形式简洁的优点。Melosh 和 Raefsky 在文献「13]中对"分裂节点法"的介绍以一维单 元为例,如图2所示,单元1和单元2分别位于断层 两侧,U为位移,上标代表单元号,下标代表单元内 节点号, $\Delta U$ 为位错量,则有 $U_2^1 = \overline{U_2^1} + \Delta U_2^1, U_1^2 = \overline{U_1^2}$  $+\Delta U_1^2$ ,其中分裂节点上位移平均值为 $\overline{U_2^1} = \overline{U_1^2}$ ,  $\Delta U_2^1 = -\Delta U_2^2$ 



图 2 "分裂节点法"示意图(修改自文献[13])

Fig.2 Schematic diagram of "splitting nodes method" (After reference  $\lceil 13 \rceil$ )

### 在有限元分析中,单元1刚度矩阵为:

$$\begin{bmatrix} K_{11}^{1} & K_{12}^{1} \\ K_{21}^{1} & K_{22}^{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1}^{1} \\ \overline{U_{2}^{1}} + \Delta U_{2}^{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1}^{1} \\ F_{2}^{1} \end{bmatrix}$$
(1)

将位错移到等式右边,

$$\begin{bmatrix} K_{11}^{1} & K_{12}^{1} \\ K_{21}^{1} & K_{22}^{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1}^{1} \\ U_{2}^{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1}^{1} - K_{12}^{1} \Delta U_{2}^{1} \\ F_{2}^{1} - K_{22}^{1} \Delta U_{2}^{1} \end{bmatrix}$$
(2)

同理,经过整理单元2的局部刚度矩阵为:

$$\begin{bmatrix} K_{11}^2 & K_{12}^2 \\ K_{21}^2 & K_{22}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{U_1^2} \\ \overline{U_2^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^2 - K_{11}^2 \Delta U_1^2 \\ F_2^2 - K_{21}^2 \Delta U_1^2 \end{bmatrix}$$
(3)

则全局旳忌体刚度矩阵为:

$$\begin{bmatrix} K_{11}^{1} & K_{12}^{1} & 0 \\ K_{21}^{1} & K_{22}^{1} + K_{11}^{2} & K_{12}^{2} \\ 0 & K_{21}^{2} & K_{22}^{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1} \\ U_{2} \\ U_{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1} - K_{12}^{1} \Delta U_{2}^{1} \\ F_{2} - K_{22}^{1} \Delta U_{2}^{1} - K_{11}^{2} \Delta U_{1}^{2} \\ F_{3} - K_{21}^{2} \Delta U_{1}^{2} \end{bmatrix}$$
(4)

其中:U, 为位移,F, 为位移,i 为全局节点编号,并  $\exists U_1 = U_1^1, U_2 = \overline{U_2^1} = \overline{U_2^1}, U_3 = U_2^2, F_1 = F_1^1, F_2 =$  $F_{2}^{1} + F_{1}^{2}, F_{3} = F_{2}^{2}$ 

由式(4)可知,地震位错可等效为体力项,"分裂 节点法"将地震断层引入到有限元计算中只需要修 改右端项,是一种物理含义明确且简单有效的方法。 该方法在有限元软件 MSC.Marc 上的实现及验证 详见文献[15],"节点分裂法"能够精确计算断层错 动引起的同震位移场。

#### 2.2 基于同震位移场的拟静力抗震设计方法

西南交通大学何川教授课题组提出了"基于薄 壁圆柱壳理论的隧道抗震拟静力分析方法"[16]。该 方法在获得深埋隧道周边自由场剪应变和剪应力的 基础上(图 3),基于弹性薄壁圆柱壳理论,给出了深 埋隧道水平地震剪切作用下的附加内力计算公式: 假设在水平剪切波作用下,均质地层周边地层剪切 应力为 $\tau_{ff}$ ,等同于周边边界发生等值拉压情形,视 为弹性力学简单剪切问题。因此,隧道周边自由场 剪应变和剪应力是该方法的关键参数,自由场剪应 变的确定,根据文献「16]可采用式(5)进行计算:

$$\gamma_{\rm ff} = \frac{u(z,t_c) - u(z_2,t_c)}{z_2 - z} \tag{5}$$

其中: $u(z,t_c)$ 为水平地层位移差最大的  $t_c$  时刻对 应的z位置处水平位移分布函数,z1和z2分别为 自由场两个特点位置点的埋深。文献「16]根据式 (5)采用地层自振周期和基岩面速度反应谱估计均 质地层剪切应变,但当地层自振周期和基岩反应谱 未知,则剪应变估计受到很大限制。



Fig.3 Far-field shear strain and shear stress of tunnel

为了克服上述限制,本文采用另外一种思路, 流程如下:1、根据历史地震资料估计断层最大位错 量。地震地质学家对未来时段断层最大位错量评 估通常有几类方法:古地震或历史地震法、滑动速 率法、断层长度转换法、预测震级转换法、定量类比 法和加权综合法<sup>[17]</sup>。同时,Wells 等<sup>[18]</sup>给出了震 级-位错量经验表达式用来估计未来断层位错量。 我们取上述方法的最大值作为未来断层发生地震 的位错量;2、得到未来断层的最大位错量后,利用 2.1节方法获取同震位移场,进一步计算均质地层 的最大水平剪切应变,利用文献[16]计算公式得到 隧道衬砌内力。

本文的隧道抗震设计思路和传统拟静力抗震设 计方法相比,额外获取同震形变场信息,可以直接获 知隧道发生较大强制位移的部位,为隧道的抗震设 防提供更多有用信息。

#### 3 工程实例

我们在云南某高速公路深埋隧道的工程区开展 了地震和地质资料调查分析、场地工程地震条件评 价、地震危险性分析等工作,并在此基础上进行隧道 抗震分析研究。

#### 3.1 工程区主要断裂活动性

隧道周边工程区共有 5 条主要活动断裂(图 4), 龙陵一瑞丽断裂( $F_5$ )、龙陵一澜沧断裂( $F_1$ )、怒江 断裂带( $F_2$ 、 $F_3$ )、蒲缥一施甸断裂带( $F_4$ )。

龙陵一澜沧断裂带由多条不连续的次级断层组 成,呈斜列或丛集状展布,彼此相互平行,走向较稳 定,被认为是在前新生代构造背景上产生的一条新 生断裂带<sup>[19]</sup>。沿龙陵一澜沧断裂带,历史上发生过 6次7级以上地震,其中1976年龙陵地震震源区位 于NW向龙陵一澜沧断裂与NEE龙陵一瑞丽断裂 带交会地带。根据文献[20-22],龙陵一瑞丽断裂北 段是以左旋走滑为主兼张性正断的区域性全新世活 动断裂,断裂晚更新世以来的平均水平滑动和垂直 速率分别为2.2 mm/a和0.6 mm/a;全新世以来平 均水平滑动和垂直速率分别为1.8~3.0 mm/a和 0.5 mm/a。

#### 3.2 同震位移场计算

根据断裂活动性鉴定结果、新构造运动特点及 历史地震活动性分析,工程区内龙陵一瑞丽断裂与 龙陵一澜沧断裂具备发生7级以上地震的构造条 件,需要估计未来这两条断层可能的最大位错量。 我们汇总了几种常用估计方法得到的最大位错量列 于表1。从偏于安全角度,我们采用上述几种方法 的评估结果最大值3.71m作为未来百年龙陵一瑞 丽断裂和龙陵—澜沧断裂的错动量。

#### 表 1 断层未来百年最大位错量评估

Table 1 Estimation of the maximum fault dislocation

in the next hundred years

评估方法	水平位错量/m		
	均值	标准差	权重
断层长度转换法	2.94	0.94	0.18
预测震级转换法	3.71	0.88	0.20
定量类比法	2.00	0.50	0.62

根据断层和隧道分布情况,本文建立了云南某隧 道近场区的有限元计算模型(图 4),模型包含六面体 单元数为 69 240,节点数为 73 479。模型东西向和南 北向尺寸分别为 177 km 和 155 km,垂向深度为 100 km,模型共包含 5 条断层和 1 条隧道。材料本 构关系为线弹性,边界条件有两类:1、东、西、南、北 以及底部施加零法向位移的第一类边界条件;2、内 部不连续位移边界即地震位错的引入采用"分裂节 点法",利用子程序 SUBROUTINE USELEM 实现 该方法在有限元软件 MSC.Marc 中的嵌入。由于 模型的研究尺度远大于隧道,因此建模中涉及的深 部结构和岩石参数更多选用基于地球物理的结果, 深部结构根据文献[21]选取,近场的 Moho 深度约 为 34 km,材料参数采用 Crust1.0 模型。



图 4 同震位移场计算使用网格



3.2.1 龙陵一澜沧断裂带 (F<sub>1</sub>)发生 3.71 m 右旋地 震错动

当龙陵一澜沧断裂带(F<sub>1</sub>断层)发生右旋 3.71 m 地震错动,隧道近场同震位移场如图 5 所 示。水平位移在断层尖端呈现出典型的花瓣形状。 对于发震断层近场的同震衰减关系,可归纳为水平 面上和深度上的衰减。根据图 5(d),沿水平方向的 衰减速度远大于沿深度方向的衰减速度,尽管这和 破裂面在深度方向的尺度有关,但目前的隧道埋深 一般小于 1 km。作为一级近似,可认为地表位移场 足以代表地下隧道深度的位移场。



Fig.5 Coseismic displacement field induced by Longling-Lanchang fault

对于隧道的同震位移场,东向和北向位移量值 呈现衰减关系,东向位移由6cm衰减至1cm,北向 位移甚至出现反向现象,因此隧道南北差异运动达 到6cm。由于龙陵一澜沧断裂带镇安断裂距离隧 道的最近距离尚有11km,因此从发震断层到隧道 处,同震位移场迅速从米量级衰减至厘米量级。但 对于龙陵一瑞丽断裂南支断裂(F。断层),由于距离 隧道较近,该断层产生的同震错动将会对隧道造成 较大量级的位移。 3.2.2 龙陵—瑞丽断裂 (F5)发生左旋 3.71 m 地震错动

当龙陵一瑞丽断裂(F<sub>5</sub>)发生左旋 3.71 m 地震 错动,隧道近场同震位移场如图 6 所示。水平位移 场在发震断层尖端呈现出典型的花瓣形状。垂向 上,隧道南端下沉 40 cm,北端下沉位移较小,故隧 道存在垂向差异运动。根据图 6,如果龙陵一瑞丽 断裂南支断裂发生左旋地震错动,隧道处同震位移 量尽管小于发震断层,但水平位移最高仍达到 0.7 m,严重威胁隧道安全。





Fig.6 Coseismic displacement field induced by Longling-Ruili Fault

隧道北半部分具有近东方向的同震位移,而南 半部分具有西北方向位移,且隧道南部位移大于北 部,隧道中部是位移反向过渡区,将会对隧道产生明 显的剪切作用。如果龙陵一瑞丽断裂南支断裂发生 左旋地震错动,该隧道中部的剪切效应不容忽视。 2008 年汶川地震发生后,工程界开始重视隧道的竖 向地震作用,例如靠近映秀的龙溪隧道与紫坪铺隧 道,仰拱隆起的最大幅度可达 80 cm 以上。如果龙 陵一瑞丽断裂南支断裂发生左旋地震错动,勐捧隧 道整体下沉,但隧道南段下沉量大于北段,隧道南北 的竖向差异最大约 15 cm。

#### 3.3 拟静力抗震设计

根据文献[16],采用"基于薄壁圆柱壳理论的隧 道抗震拟静力分析方法",若衬砌和周围岩体界面可 以滑移,则衬砌的内力计算公式如式(6)所示:

$$M(\theta) = \frac{12(1 - v_s)}{3(5 - 6v_s) + (1 - v_s)F} \tau_{\rm ff} R^2 \sin 2\theta,$$

$$N(\theta) = -\frac{12(1 - v_s)}{3(5 - 6v_s) + (1 - v_s)F} \tau_{\rm ff} R \sin 2\theta,$$

$$Q(\theta) = \frac{24(1 - v_s)}{3(5 - 6v_s) + (1 - v_s)F} \tau_{\rm ff} R \cos 2\theta,$$

$$F_1 = -\frac{E_s R^3 (1 - v_1^2)}{E_s L_s (1 - v_1^2)}$$
(6)

式中:*I*<sub>1</sub>为衬砌截面惯性矩;*E*<sub>1</sub>为衬砌弹性模量; *v*<sub>1</sub>为衬砌泊松比;*E*<sub>s</sub>为均匀地层弹性模量;*v*<sub>s</sub>为均 匀地层泊松比;*R*为衬砌中轴线半径(取值为隧道外 径减去衬砌厚度的一半)。参数取值如下:隧道衬砌 外径 6.25 m,衬砌厚度为 0.3 m,管片衬砌混凝土弹 性模量为 32.5 GPa, 泊松比为 0.2, 管片衬砌环的横 向等效刚度系数取为 0.85, 根据同震位移估计的远 场剪应变约为 4×10<sup>-5</sup>。将各参数代入式(6), 得到 衬砌的内力如图 7 所示。

根据图7,附加弯矩的最大值出现在衬砌135°





及 315°方向上,最大附加弯矩约为 40 kN · m;附加 剪力分布规律基本相同,都以 0°、180°和 90°、270°雷 达轴为对称轴,最大剪力约为 28 kN。衬砌弯矩和 剪力的对称特性与文献[16]类似。值得注意的是解 析法需要输入远场剪应变,但远场剪应变是一个需 要估计的量,本节的估算方法区别于文献[16],按照 地震同震位移场计算的地层位移差最大值估计远场 剪应变。同时将隧道的形状等效成圆形本身也是一 种近似,需要知悉这种近似可能带来的误差,以便在 隧道抗震设防中正确使用。

#### 4 讨论与结论

本文初步尝试了在隧道抗震设计中定量考虑同 震位移场并得到以下结论:

(1)采用历史地震资料估计断层未来最大位错量,并利用"分裂节点法"计算地震错动引起的同震 位移场,能够为我们估算未来可能的地震灾害提供 有力的定量分析工具。

(2)当地层自振周期和基岩反应谱未知,可以 利用同震位移场估算远场剪应变开展隧道拟静力抗 震设计。

(3)对于云南某隧道,如果距离隧道较远的龙 陵一澜沧断裂带镇安断裂重复发生历史地震,隧道 南北两端强制位移约为6 cm,如果距离隧道较近的 龙陵一瑞丽断裂南支断裂重复发生左旋历史地震, 由于强制位移导致隧道南北部分出现反向运动,将 会对隧道中部产生明显的剪切作用,并且隧道南北 的横向差异运动超过 50 cm,竖向差异运动达到 15 cm。

(4)根据隧道抗震拟静力分析附加弯矩最大值 发生部位在衬砌135°、315°方向上,最大附加弯矩约 为40 kN•m;附加剪力分布最大值在90°位置,最 大剪力约为28 kN。

根据上述结论,我们得到一些初步认识。目前 隧道抗震设计理论还仍处在发展之中。本文首次同 时考虑地震同震位移场的强制位移效应和隧道拟静 力抗震设计,应当在地震强制位移较大的隧道部位、 衬砌弯矩和剪力较大、软弱围岩等不利部位采取相 应的抗震和减震措施。采用不同方法估计隧道的远 场剪应变均具有其优点和局限性,并且隧道抗震计 算中未来地震发生位置和震级、地震引起远场地震 形变仍具有不确定性,隧道沿线详尽的围岩物理力 学参数仍有待补充,这些方法的局限性和资料的缺 失会对全面认识隧道的抗震性能有所影响。后续研 究者需充分利用多方面的资料,采用不同方法评估 隧道的最不利内力,只有这样才能得出符合实际情 况的可靠结论。此外,本文选取的历史地震由于相 关资料较少,下一步我们将利用汶川地震及其隧道 灾害的丰富实例,来验证或修正本文提出的隧道抗 震设计方法。

#### 参考文献(References)

[1] 郑永来,杨林德,李文艺,等.地下结构抗震[M].上海:同济大学 出版社,2011.

ZHENG Yonglai, YANG Delin, LI Wenyi. Anti-seismic of Underground Structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001.

[2] 王明年,崔光耀.高烈度地震区隧道设置减震层研究[J].土木 工程学报,2011,44(8):126-131.

WANG Mingnian, CUI Guangyao. Study of the Mechanism of Shock Absortion Layer in the Supporting System of Tunnels in Highly Seismic Areas[J] Chinese Civil Engineering Journal, 2011,44(8):126-131.

- [3] ASAKURA T, SATO Y. Damage to Mountain Tunnels in Hazard Area[J]. Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, 1996, (Special Issue): 301-310.
- [4] MIYABAYASHI H, TOSAKA T, ISOGAI A, et al. Basic Studies on Earthquake Damage to Shallow Mountain Tunnels [C]//Proceedings of World Tunnel Congress 2008-Underground Facilities for Better Environment and Safety. India, 2008.
- [5] 王成虎,仇文革,陈永前.震区同震地表破裂统计经验关系及其 对隧道抗震设计的意义[J].现代隧道技术,2014(5):1-8.
   WANG Chenghu, CHOU Wenge, Statistical Empirical Relationship of Coseismic Surface Rupture and Aseismic Tunnel Design[J].Modern Tunnelling Technology,2014(5):1-8.
- [6] STEKETEE J A.On Volterra's Dislocations in a Semi-Infinite Elastic Medium[J].Canadian Journal of Physics, 1958, 36(2): 192-205.
- [7] OKADA Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J].Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2):1018-1040.
- [8] OKADA Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J].Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75(4):1135-1154.
- [9] 马艳晶.水电站地下洞室群地震反应初步分析[D].大连理工大学,2009.

MA Yanjing, Elementary Seismic Analysis of Underground Hydropower Cavern Groups[D] Dalian University of Technology, 2009.

[10] 李天斌.汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素 分析[J].工程地质学报,2008,16(6):742-750.

> LI Tianbin.Failure Characteristics and Influence Factor Analysis of Mountain Tunnels at Epicenter Zones of Great Wenchuan Earthquake[J].Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6):742-750.

[11] ARNOLD D N. An Interior Penalty Finite Element Method with Discontinuous Elements[J].SIAM Journal on Numerical Analysis, 1982, 19(4):742-760.

- [12] AAGAARD B, WILLIAMS C, KNEPLEY M. PyLith: A Finite-element Code for Modeling Quasi-static And Dynamic Crustal Deformation[J].Eos Trans, AGU, 2007, 88:52.
- [13] MELOSH H J.RAEFSKY A.A Simple and Efficient Method for Introducing Faults Into Finite Element Computations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71 (5):1391-1400.
- [14] BELYTSCHKO T,BLACK T.Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45(5):601-620.
- [15] 黄禄渊,王成虎,杨树新.地震位错模拟在有限元软件 MSC.
   Marc 中的实现[J].华北地震科学,2018(1):1-9.
   HUANG Luyuan, WANG Chenghu, YANG Shuxin. Numerical Modeling of Earthquake Dislocation Using MSC. Marc[J]
   North China Earthquake Sciences, 2018(1):1-9.
- [16] 晏启祥,唐茂皓,何川,等.基于薄壁圆柱壳理论的盾构隧道抗 震拟静力分析法[J].岩土工程学报,2014,36(7):1371-1376.
   YAN Qixiang, TANG Maohao, HE Chuan. Seismic Quasistatic Analysis Method of Shield Tunnel Based on the Theory of Thin Shell Cylindrical Tunne [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(7):1371-1376.
- [17] 邓起东.活动断裂研究[M].北京:地震出版社,1993.
   DENG Qidong.Research on Active Fault[M].Beijing:Seismological Press,1993.
- [18] WELLS D L. COPPERSMITH K J. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement[J]. Bulletion of the Seismological Society of America, 1994, 84(4):974-1002.
- [19] 虢顺民,周瑞琦,滇西南龙陵—澜沧断裂带;大陆地壳上一条 新生的破裂带[J].科学通报,1999,44(19);2118-2121.
  GUO Shunmin,XIANG Hongfa,ZHOU Ruiqi,et al.The Longlinbg-Lancang Fault Zone in the Southwestern Yunnan Province: A Newly Generated Rupture Zone in Continental Crust[J].Chinese Science Bulletin,1999,44(19);2118-2121.
- [20] 黄学猛,杜义,舒赛兵,等.龙陵一瑞丽断裂(南支)北段晚第四 纪活动性特征[J].地震地质,2010,32(2):222-232.
   HUANG Xuemeng, DU Yi, SU Saibing, et al. Study of the Late Quaternary Slip Rate Along the Northern Segment on the South Branch of Longling-Ruili Fault.[J] Seismology and Geology,2010,32(2):222-232.
- [21] 胡家富,苏有锦,朱雄关,等.云南的地壳S波速度与泊松比结构及其意义[J].中国科学(D辑),2003,33(8):714-722.
   HU Jiafu,SU Youjin,ZHU Xiongguan, et al.S-wave Velocity and Poissons Ratio Structure of Crust in Yunnan and Its Implication[J].Science in China (Ser.D),2003,33(8):714-722.
- [22] 刘兴旺,袁道阳,张波,等.滇西南地区澜沧断裂全新世滑动速 率 与走滑起始时间探讨[J].地震工程学报,2016,38(3):414-422.

LIU Xingwang, YUAN Daoyang, ZHANG Bo, et al. Study of Holocene Slip Rate and Strike-slip Initial Time Along the Lancang Fault, Southwestern Yunnan[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(3):414-422.