DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111075

# 断层错动和地震动共同作用下跨断层隧道的 损伤分析<sup>\*</sup>

### 陈之毅,郭远鹏

(同济大学土木工程学院,上海 200092)

摘要:大量的历史实例表明,跨断层隧道在地震中会受到严重的破坏。因此,跨断层隧道在断层错动作用下的破坏 机理被广泛研究。然而,对在地震现象中占比最高的构造地震而言,断层错动和地震动是形影相随的,将两者分开 考虑存在局限性。文章采用三维有限元模型模拟并量化了断层错动单独作用、地震动单独作用和断层错动-地震动 共同作用三种加载方式下隧道结构的损伤情况,结合耗散能指标对断层错动和地震动共同作用对跨断层隧道的影 响展开了分析。结果表明,在发生断层错动时,地震动对隧道的影响是不可忽略的,在分析中考虑地震动是必要 的;断层错动和地震动共同作用时,由于累积损伤,地震动造成的破坏比地震动单独作用时明显加剧。

关键词: 跨断层隧道; 断层错动; 地震动; 损伤; 耗散能 中图分类号: U459.3; X951 文献标识码: A 文章编号: 1672-2132(2023)01-0132-06

# Analysis of Cross Fault Tunnel Damage under Combined Action of Fault Dislocation and Ground Motion

CHEN Zhiyi, GUO Yuanpeng

(College of civil engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A large number of historical examples show that cross fault tunnels will be seriously damaged in earthquakes. Therefore, the failure mechanism of cross fault tunnels under fault dislocation has been widely investigated. However, in tectonic earthquakes, which account for the highest proportion of seismic phenomena, fault dislocation and ground motion occur simultaneously, and there are limitations in considering them separately. In this paper, a three-dimensional finite element model is used to simulate and quantify the damage to tunnel structures under three loading modes: fault dislocation alone, ground motion alone, and fault dislocation with ground motion combined. The influence of fault dislocation and ground motion on cross fault tunnels is analyzed by incorporating the dissipated energy index. The results show that the influence of ground motion on the tunnel cannot be ignored when fault dislocation occurs, and it is necessary to consider ground motion in the analysis. When fault dislocation and ground motion act together, the damage caused by ground motion is significantly worse than that caused by ground motion alone due to cumulative damage.

Keywords: cross fault tunnel; fault dislocation; ground motion; damage; dissipated energy

\* 收稿日期:2021-11-11;修回日期:2021-11-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51778464)资助

作者简介:陈之毅(1977一),女,教授,博导,博士。主要从事抗震研究。E-mail: zhiyichen@tongji.edu.cn

## 0 引 言

中国是一个活动断裂分布密集,地震频发的国家。有关研究表明,我国数十个主要的大中城市都 很可能存在活动断层<sup>[1]</sup>,其中靠近亚欧板块与印度 洋板块交界处的我国西部更是地震灾害频繁。对 于山高路险的西部地区而言,隧道作为重要的生命 线工程,不仅仅在平日承担着连接各大路网的重要 作用,在灾害来临时也是快速通往灾区救援的生命 通道。由于隧道的走向取决于交通功能的要求,随 着西部大开发战略的不断推进,在西部地区穿越断 层的隧道越来越常见,以川藏铁路为例,其沿线就 发育了十余条深大活动断裂<sup>[2]</sup>。

国内外学者进行震害调查后总结得出<sup>[35]</sup>,与断 层相关的隧道震害占比例虽然不高,但对隧道的危 害却尤为严重。例如,在汶川地震中受损最为严重 的隧道之一的龙溪隧道,其跨断层的截面产生了严 重的崩塌,而在其他部位损伤较为轻微<sup>[6]</sup>;土耳其的 Bolu隧道在Duzce地震发生时,在穿越断层段遭受 了比其他段更为严重的地震破坏<sup>[7]</sup>。因此,开展针 对跨断层隧道结构的破坏机理和工程防灾减灾手 段至关重要。

长期以来国内外学者针对上述问题开展的研 究已经取得了丰硕的成果。M.H.Baziar等<sup>[8]</sup>开展了 模拟逆断层作用下隧道响应的离心机模型试验,研 究了隧道与断层的相对位置、覆土的相对密度及隧 道的刚度等因素对逆断层错动的作用下隧道和覆 土响应的影响。K.Sakashita等<sup>[9]</sup>进行了数值模拟, 以研究断层角和位移角对跨断层隧道结构的影响。 Y.M.Wen等<sup>[10]</sup>为了减轻穿越断层隧道的地震破坏, 提出了分段衬砌的设置方法,结果表明,管片衬砌 对降低剪应力和压应力有显著作用。刘学增等[11] 开展了 60°倾角正断层黏滑错动对山岭隧道影响的 试验研究,总结了隧道在断层发生位错时的破坏形 式并分析了破坏机理。信春雷等[12]通过振动台试 验对跨断层隧道的破坏特征及减灾措施进行了研 究,提出可以在实际工程中采用可变性的套管式减 震措施。梁建文等[13]选用混凝土塑形损伤本构模 拟隧道衬砌,采用三维壳一弹簧有限元模型,模拟 了45°断层错动作用下隧道的响应情况,指出更换隧 道附近土体并提高环间螺栓强度能有效地提高隧 道抗错能力。

可见,目前为止国内外学者针对跨断层隧道进 行了广泛研究,但大部分研究都只考虑了断层错动 的作用。但是由于断层活动往往是地震的诱因,在 此类由断层活动诱发的地震中,断层错动和地震动 并不会单独出现。虽然有学者认为地震激励造成 的破坏不及断层错动<sup>[14]</sup>,但由于两者先后作用在隧 道上会产生初始缺陷和累积损伤,在研究跨断层隧 道时考虑断层错动和地震动的共同作用是有必 要的。

因此,为了说明断层错动和地震动共同作用对 隧道损伤的影响,本研究采用有限元软件 ABAQUS模拟了三种不同的加载条件,分析共同 作用对隧道损伤的影响:算例一(仅施加断层错 动)、算例二(仅施加地震动)、算例三(施加断层错 动和地震动共同作用)。从单元损伤和能量耗散两 个角度分析不同加载条件下隧道的受损情况。

### 1 数值模拟

#### 1.1 计算模型

本文研究的隧道断面为圆形,隧道内的净空为 5.2 m,衬砌的厚度为 0.4 m,隧道管片外径为 6.0 m。 该隧道的覆土层下有一个 90°倾角的垂直断层,可能 产生最大 0.6 m 的竖直错动位移。

为了兼顾精度和效率,本文通过逐渐增加计算 长度的方式进行数次试算,最终选定长100m的区 间隧道建立模型。一般认为,人工边界的宽度超过 结构宽度的5~10倍后几乎对计算结果没有影 响<sup>[15]</sup>。本文的隧道外直径为6m,故取模型宽度为 60m。计算模型整体尺寸为100m×60m×20m, 断层上盘长40m,下盘长60m。隧道外径6m,衬 砌厚度0.3m,隧道顶部埋深10m。衬砌选用S4R 壳单元,覆土选用C3D8R实体单元。模型整体如 图1所示。

#### 1.2 模型材料

模型中的衬砌材料为钢筋混凝土,在这里采用 沈新普等<sup>[16]</sup>提出的对钢筋和混凝土进行等效后的 塑性损伤模型,不再对钢筋单独建模。钢筋对整体 抗拉能力的提升作用通过定义强化拉伸塑性应力 一应变曲线来实现。采用这种塑性损伤模型在简



化建模的同时也能较好地还原实际情况。混凝土 的弹性模量为35.5 GPa, 泊松比为0.15, 密度为 2 400 kg/m<sup>3</sup>, 剪胀角为30°, 混凝土的塑性损伤因子 DAMAGEC和DAMAGET分别由非线性应变ε<sup>in</sup> 和开裂应变ε<sup>cr</sup>定义,其对应关系如图2所示。由于 断层错动位移相比覆土层尺寸十分微小,塑性区有 限且集中在断层与覆土层的接触处,综合计算效 率, 土体采用线弹性本构, 土体的弹性模量为 60 MPa, 泊松比为0.3, 密度为2000 kg/m<sup>3</sup>。



#### 1.3 输入荷载

本文采用在车龙铺断层附近记录的TCU-052 集集地震波作为输入地震动,将加速度幅值调幅为 0.45g,地震持续时间为60s,在模型底部垂直于隧 道轴线方向输入。调整后的1999年的加速度时程 曲线如图3所示。

为了更好地还原断层错动,本文引入滑动速度 函数来考虑断层错动的速度效应<sup>[17]</sup>。综合计算简 便性和对实际情况的还原程度,本文选择 Bell 函数 作为滑动速度函数来模拟断层的粘滑错动:





$$v(t) = \begin{cases} 0 & , & t < 0 \\ u(\infty) \frac{1 - \cos 2\pi T/T}{T}, & 0 \le t < T \ (1) \\ 0 & , & t \ge T \end{cases}$$

式中, u(∞)为最终错动量; T为错动的总时间。

在本文的背景中,最终错动量 $u(\infty) = 0.6 \text{ m}$ , 错动的总时间T = 2 s。在分析中,下盘底部边界固定,上盘底部边界施加v(t)来模拟断层错动。

#### 1.4 算例设计

为了对比探究仅考虑断层错动和考虑共同作 用两种情况下隧道的损伤情况,本文设计了三个算 例用于后文的对比分析,具体情况见表1。算例一 与算例二可直接对单独作用和共同作用造成的隧 道损伤情况进行对比分析,算例三用于从损伤累积 的角度配合算例一和算例二进行进一步分析。

 表1 算例设计

 Table 1
 Calculation case design

 算例编号
 第一步
 第二步

 算例一
 断层错动
 一

 算例二
 断层错动
 地震动

地震动

# 2 损伤分析

算例三

#### 2.1 损伤云图分析

图 4 是三种不同算例的受拉损伤和受压损伤云 图,图中算例表示的含义见表1。

由于混凝土本身属于脆性材料,抗压强度远大 于抗拉强度,所以不论是哪个算例,隧道最终的受 拉损伤都要强于受压损伤。

从算例一和算例三可以分别发现断层位错和 地震动造成损伤的特点。算例一的损伤云图显示, 断层错动产生的剪切作用会使得隧道在断层位置 产生集中的斜向破坏,由于隧道发生了S形变形,在 断层附近还产生了环向开裂。算例三的损伤云图 显示,水平方向地震动对隧道的损伤主要集中在拱 肩和拱脚,体现为在拱肩和拱脚沿隧道长度方向的 贯通损伤。

算例二对比算例一可以发现,除了因为地震动 产生的拱肩和拱脚处的贯通损伤外,共同作用下隧 道的损伤在仅施加断层位错的基础上产生了扩张 (虚线框部分)。对比算例二和算例三同样可以发 现,除了因为断层错动而产生的斜向损伤和环向损 伤外,共同作用下隧道的损伤在仅施加地震动的基 础上也产生了扩张(实线框部分)。



#### 2.2 损伤值分布分析

图 5 展示了三种算例下隧道衬砌单元受拉损伤 和受压损伤的损伤值在不同区间的分布情况,算例 代表的具体含义见表1。

不论是受拉损伤还是受压损伤,隧道衬砌单元 的损伤值主要集中在0~0.2这个区间中,处于这个 区间的单元损伤程度很低,甚至还包括了部分没有 损伤的单元。这与隧道损伤云图给出的损伤集中 在断层附近以及拱肩和拱脚位置的直观表现相 符合。

将算例二的损伤值区间分布与算例一和算例 三进行对比可以发现,算例二处于0~0.2这一区间 的单元数量明显小于算例一和算例三,同时其在其 他区间的分布也产生了变化。尤其是在受拉损伤 值为0.8~1的这一区间,算例二的占比显著增加。 这说明了在算例二中有更多的原本只受到轻微损 伤甚至没有受到损伤的单元转变成为了受到严重



Fig.5 Proportion distribution of lining elements in different intervals

损伤的单元。

# 3 耗散能分析

由热力学定律可知,能量转化是物质物理过程 的本质特征,物质破坏是能量驱动下的一种状态失 稳现象<sup>[18]</sup>。假设在绝热系统中,外力作用输入系统 的能量为U,根据热力学第一定律,这些能量全部转 变为系统的内能U<sub>1</sub>。这些能量可以分为两部分,一 部分为可恢复的弹性应变能U<sub>E</sub>,一部分为单元耗散 能U<sub>D</sub>。单元耗散能U<sub>D</sub>的变化规律符合热力学第二 定律,即系统的熵总是增加的趋势,且不可逆。混 凝土在损伤过程中,裂纹、孔隙等微观缺陷的形成、 发展和贯通都伴随着能量的耗散。因此,我们可以 认为,单元耗散能与单元的损伤情况是高度相关 的,单元耗散能可以作为指标对单元的损伤情况进 行评价。这一部分出现的算例代表的具体含义 见表1。

图6是算例二的耗散能时程图,图中虚线代表

了断层错动和地震动两个阶段的分界时刻*t*=2s。 因为算例一仅施加*t*=2s的断层错动,所以图中虚 线之前的时程曲线也是算例一的耗散能时程曲线。 算例二的时程曲线由两阶段组成,其一是断层错动 导致的显著上升段,这一段曲线同样也是算例一的 含时程曲线,其二是地震作用导致的小段上升段以 及漫长的平台段。断层错动结束后,隧道释放了 1005.12 kJ的耗散能,在输入地震动之后,隧道又释 放了 655.01 kJ的耗散能,这说明断层错动在共同作 用造成的损伤中起主要作用。



Fig.6 Time history of tunnel dissipation energy in case I

图 7 将算例二的地震动阶段的耗散能时程曲线 与算例三的耗散能时程曲线进行了对比。从图中 可以看出,虽然输入同样的地震动,算例二的地震 动阶段和算例三的耗散能时程曲线却有明显不同。 由于算例二在经历地震动作用前已经受到了断层 错动的影响,结构已经存在初始损伤,故对后面的 地震动阶段产生了不利影响,这最终使得隧道在算 例二的地震动阶段比算例三多释放了 263.42 kJ的 耗散能,放大了近七成。



Fig.7 Comparison of tunnel dissipation energy during ground motion

# 4 结 论

根据对仅施加断层位错、先后施加断层位错及 地震动和仅施加地震动三种不同的算例得到的隧 道损伤及耗散能结果进行分析,所得结论如下:

(1)分析的结果表明,地震动的影响在对跨断 层隧道进行分析时是不可忽略的,虽然断层错动在 整个加载过程中占主导作用,但地震动的存在明显 加剧了隧道的损伤。

(2)断层错动和地震动的共同作用对隧道的影 响不仅仅是简单的叠加,通过耗散能时程分析可以 发现隧道受到共同作用时释放的耗散能,大于仅受 到断层错动和仅受到地震动作用时的耗散能的 总和。

(3)断层错动时已经产生的初始损伤会加剧后 续地震动阶段的隧道损伤,本文的条件下在算例二 的地震动阶段隧道释放的耗散能要比算例三多出 近七成。

### 参考文献:

[1] 徐锡伟.中国城市活动断层概论[M].北京:地震出版 社,2015.

Xu X W. Introduction to urban active faults in China [M]. Beijing: Seismological Press, 2015. (in Chinese)

- [2] 郑宗溪,孙其清.川藏铁路隧道工程[J].隧道建设, 2017,37(8):1049-1054.
  Zhen Z X, Sun Q Q. Sichuan Tibet Railway tunnel project[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(8):1049-1054. (in Chinese)
- [3] Asakura T, Kojima Y. Study on the damage mechanism of mountain tunnel under earthquake and improvement of earthquake resistance [R]. Kyoto: Railway Technical Research Institute, 2006.
- [4] 高波,王峥峥,袁松,等.汶川地震公路隧道震害启示
  [J].西南交通大学学报,2009,44(3):336-341,374.
  Gao B, Wang Z Z, Yuan S, et al. Lessons learnt from damage of highway tunnels in Wenchuan earthquake
  [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3): 336-341,374. (in Chinese)
- [5] 崔光耀,伍修刚,王明年,等.汶川地震区跨断层带公路 隧道震害形成机理分析[J].中国地质灾害与防治学 报,2018,29(2):108-114.

Cui G Y, Wu X G, Wang M N, et al. Highway tunnel damage caused by earthquake and its mechanism cross-

ing fault zone in Wenchuan Earthquake Area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2): 108-114. (in Chinese)

- [6] Yu H, Chen J, Bobet A, et al. Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2016, 54:102-116.
- [7] Dalgıç S. Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian Motorway, Turkey[J]. Engineering Geology, 2002, 67(1):73-96.
- [8] Baziar M H, Nabizadeh A, Jung L C, et al. Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2014, 65:151-164.
- [9] Sakashita K, Hata A. Fundamental study on behavior of underground linear structure subjected to fault displacement [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser A1, 2016, 72(4):297-309.
- [10] Wen Y M, Xin C L, Shen Y S, et al. The seismic response mechanisms of segmental lining structures applied in fault-crossing mountain tunnel: The numerical investigation and experimental validation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 151: 107001.
- [11] 刘学增,王煦霖,林亮伦.60°倾角正断层黏滑错动对山
   岭隧道影响的试验研究[J].土木工程学报,2014,47
   (2):121-128.

Liu X Z, Wang X L, Lin L L. Model experimental study on influence of normal fault with 60° dip angle stick-slip dislocation on mountain tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 121-128. (in Chinese)

[12]信春雷,高波,闫高明,等.跨走滑断层隧道地震破坏特 征与抗减震措施研究[J].振动工程学报,2016,29(4): 694-703.

Xin C L, Gao B, Yan G M, et al. Seismic damage characteristics and anti-seismic damping measures for tunnel across strike-slip faults [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(4): 694-703. (in Chinese)

- [13] 梁建文,吴泽群,辛钰,等.断层错动下盾构隧道抗震措施研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(1):1-11.
  Liang JW, Wu ZQ, Xin Y, et al. Seismic countermeasures of shield tunnel under fault movement[J]. Earth-quake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(1):1-11. (in Chinese)
- [14] Li T. Damage to mountain tunnels related to the Wenchuan earthquake and some suggestions for aseismic tunnel construction[J]. Bulletin of Engineering Geology &. the Environment, 2012, 71(2):297-308.
- [15] 赵颖,郭恩栋,刘智,等.走滑断层位错作用下城市地铁 隧道损伤分析[J].岩土力学,2014,35(增2):467-473.
  Zhao Y, Guo E D, Liu Z, et al. Damage analysis of urban metro tunnel under strike-slip fault[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup2): 467-473. (in Chinese)
- [16] 沈新普,王琛元,周琳.一个钢筋混凝土损伤塑性本构 模型及工程应用[J].工程力学,2007(9):122-128.
  Shen X P, Wang C Y, Zhou L. A damage plastic constitutive model for reinforced concrete and its engineering application [J]. Engineering Mechanics, 2007(9): 122-128. (in Chinese)
- [17] 陈熹.活动断层错动下跨断层隧道动力响应及破坏机 理研究[D].成都:西南交通大学,2017.
  Chen X. Study on dynamic response and failure mechanism of the crossing-fault tunnel under the action of active fault[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [18] 谢和平,鞠杨,黎立云.基于能量耗散与释放原理的岩 石强度与整体破坏准则[J].岩石力学与工程学报, 2005,24(17):3003-3010.

Xie H P, Ju Y, Li L Y. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (17) : 3003-3010. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)