

文章编号: 10014632 (2023) 050116-11

引用格式: 付晓东, 丁海锋, 袁维, 等. 非一致性地震作用下穿越破碎带长大隧道衬砌结构动力变形分析 [J]. 中国铁道科学, 2023, 44 (5): 116-126.

Citation: FU Xiaodong, DING Haifeng, YUAN Wei, et al. Analysis of Lining Structure Dynamic Deformation of Long Tunnel Passing through Fracture Zone under Non-Uniform Seismic Action [J]. China Railway Science, 2023, 44 (5): 116-126.

非一致性地震作用下穿越破碎带长大隧道衬砌结构动力变形分析

付晓东^{1,2}, 丁海锋^{1,2}, 袁维³, 王宏超⁴, 周永强^{1,2}, 盛谦^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049;

3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

4. 中铁二院工程集团有限公司 土木建筑设计研究一院, 四川 成都 610031)

摘要: 为探讨非一致性地震作用下穿越破碎带长大隧道衬砌结构的变形机制, 基于随机地震动理论, 生成能体现长大隧道行波效应和衰减效应等局部地场效应的地震加速度时程曲线; 通过建立不同的不利地质结构形式的多方案隧道有限元计算模型, 采用仰拱分区垂直入射地震波的方式, 分析不同倾角、厚度以及岩体等级的破碎带对隧道衬砌轴向和横向变形的影响, 揭示非一致性地震作用下长大隧道衬砌结构变形特征。结果表明: 非一致性地震作用下长大隧道衬砌结构变形具有明显的空间非一致性; 沿隧道轴向方向, 破碎带的存在限制了衬砌轴向拉压变形, 但加剧了衬砌的轴向剪切变形, 当破碎带与隧道夹角为 45° 时衬砌的轴向拉压和剪切变形最大, 而衬砌整体轴向变形受破碎带厚度和岩体等级的影响较小; 沿隧道横断面方向, 衬砌纵向剪切变形主要集中于拱腰位置, 而径向剪切变形集中于拱顶和仰拱位置, 衬砌的最大纵向和径向剪切变形均出现在破碎带倾角为 45° 时, 且当破碎带厚度过大时, 衬砌横断面的剪切变形也较大, 但不同岩体等级对衬砌横断面的剪切变形影响不大。

关键词: 隧道工程; 衬砌变形; 数值分析; 不良地质; 地震作用; 非一致性

中图分类号: U451.4 文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.10014632.2023.05.12

随着我国交通运输工程的不断发展, 由高速公路和高速铁路组成的路网向西部纵深持续延伸。然而西部地区山体众多, 地质结构复杂, 涉及的隧道工程不可避免地需要穿越众多破碎带。同时, 西部地区位于亚欧板块和印度洋板块碰撞处, 地震活动频度高、强度大、震源浅、分布广。根据调查发现, 最近几十年间发生的大地震, 破碎带附近均产生了严重的地震灾害^[1-5]。因此, 研究地震作用下穿越破碎带隧道的动力响应具有重要意义。

目前, 众多学者围绕跨破碎带隧道震害因素方面开展了系统的研究, 并取得丰硕的成果。陶双江等^[6]调研了汶川地震4处较严重的隧道破坏, 对穿越破碎带隧道破坏的主要因素进行统计分析, 初步总结了隧道震害的主要影响因素。朱长安等^[7]基于土-结构相互作用理论, 分析了破碎带不同倾角对隧道围岩稳定性的影响。赵颖等^[8]基于拟静力弹塑性有限元方法, 利用损伤指标分析了不同覆土层厚度条件下城市隧道走位的破坏特征。杨胜硕

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52179117）；道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室（石家庄铁道大学）开放课题（STDTKF202103）；中国科学院青年创新促进会资助项目（2021325）

第一作者：付晓东（1986—），男，四川南充人，副研究员，博士。E-mail：xdfu@whrsm.ac.cn

通讯作者：袁 维（1986—），男，湖南常宁人，副教授，博士。E-mail：yuanweisuper001@126.com

等^[9]考虑破碎带宽度对隧道围岩的地震动响应影响,通过数值模拟,重点研究了10 m内小宽度破碎带环境下衬砌的破坏特征。Zhu^[10]基于有限差分法,对不同破碎带刚度及宽度条件下隧道围岩地震响应进行数值模拟分析,得出地震条件下隧道衬砌横向和纵向动力响应的一般规律。

对于大尺度的隧道工程,因结构几何尺寸大于地震波长,地震波射入支护结构中具有显著的行波效应、相干效应和衰减效应,若继续采用一致性地震输入将与实际情况产生明显出入,故需考虑非一致性地震作用。在非一致性地震波合成方面,屈铁军等^[11-12]考虑各激振点之间的相关性,提出了较为完善的多点地震合成计算式,并给出适用于Ⅱ类和Ⅲ类场地的功率谱模型。Wang等^[13]基于傅里叶谱和传递函数,给出了一种物理参数为随机变量的地震物理随机函数模型,并与1995年阪神地震进行对比验证。在非一致性地震的应用方面,李海波、何伟、吴祚菊、周云东等^[14-17]通过数值模拟论证了在实际工程中考虑非一致性地震的必要性。李海波、何伟等^[14-15]较早地在地下洞室和地下车站的动力分析中引入了非一致性地震。吴祚菊^[16]分析了非一致性地震作用下延长型管道结构动力响应,重点研究了各频率成分在不同土层中的放大效应。周云东等^[17]基于数值模拟对一致性地震和非一致性地震作用下隧道的动力响应进行对比,结果表明在地下长尺寸建筑中,非一致性地震的影响不可忽略。在室内物理试验方面,谷音等^[18]设计非一致性地震作用下粉质黏土地基中地铁车站的振动台模型试验,通过对各截面加速度、应力和应变的记录分析,得到了纵向非一致性地震作用下地铁隧道的动力响应规律。Yu等^[19]设计多点振动台模型试验,比较了一致性地震与非一致性地震条件下隧道衬砌各段接头部分的动力响应,从试验的角度论证了非一致性地震在隧道抗震设计中的必要性。在非一致性地震波频谱分析方面,王国波等^[20]以长大盾构隧道为例,从响应幅值、频域和位移曲线角度对比分析了隧道结构和土体的地震响应规律。周永强等^[21]基于随机地震动理论生成非一致性地震加速度时程曲线,分析了围岩动力响应与输入地震的频谱相关性和围岩衬砌地震响应的空间非一致性,初步揭示了非一致性地震作用下长大隧道动力响应的时空效应。

上述文献研究方向主要集中在均质岩土中隧道的动力响应和破坏特征上,很少有考虑在非一致性

地震下不良地质条件对支护结构的影响,涉及破碎带的地质构造、几何尺寸等对隧道结构震动响应影响的研究则更少。

本文基于非一致性地震合成法生成地震动加速度时程曲线,建立了具有不同形式的穿越破碎带隧道计算模型,通过在模型仰拱沿隧道轴向分区域水平输入地震波的方式,实现了能体现隧道衰减效应、行波效应及局部地场效应的非一致性地震输入,针对计算结果,分析和总结了非一致性地震作用下穿越不同倾角、厚度及岩体等级破碎带隧道衬砌结构变形规律。

1 模拟理论与方法

1.1 穿越破碎带长大隧道概化模型

某地下隧道工程长63 km,为复杂地质地震环境下的长大隧道。隧道计算模型横断面尺寸如图1(a)所示。图中: x 方向为与隧道轴向垂直的方向; y 方向为隧道轴向; z 方向为隧道竖直方向。隧道外径为8.4 m,内径为6.4 m,衬砌厚1 m^[22];横向计算宽度取不小于7倍的隧道直径,设置为100 m;埋深取100 m。纵向计算长度方面,在考虑非一致性地震的空间效应和计算效率方面寻找平衡点:选取过短,无法体现非一致性地震的空间效应;选取过长,计算效率低下。在试算的基础上,最终选取纵向长度为1 000 m。

围岩、破碎带和衬砌均采用实体单元模拟,破碎带为倾斜薄弱岩体,体现破碎带夹层与隧道空间位置的纵断面如图1(b)所示。图中: A 点为隧道入口处拱顶监测点; B 点为隧道任意位置的拱顶监测点。其中,围岩和破碎带采用Mohr-Coulomb屈服准则及弹塑性增量本构关系;衬砌采用弹性本构关系。考虑到隧道与围岩之间的滑移,围岩与衬砌之间设置接触面。为吸收地震波在截断边界产生

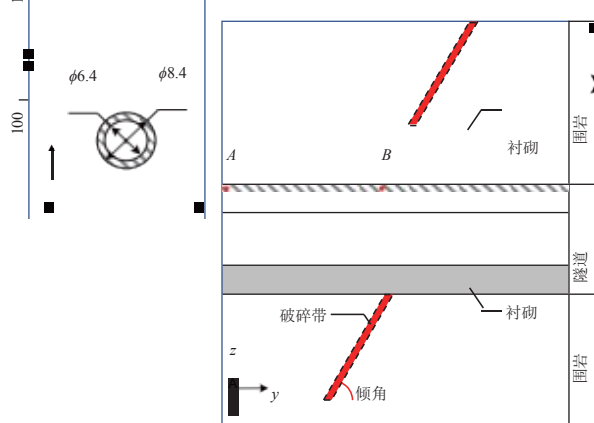


图 1 隧道计算模型及破碎带夹层示意图 (单位: m)

的散射波,模型四周设置自由场边界,仰拱设置黏性边界。计算采用瑞利阻尼(临界阻尼比为

0.05^[21])近似表征岩土体在地震波传播过程的阻尼作用。材料的物理力学参数见表1。

表1 材料参数

名称	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	法向刚度/(N·m ⁻¹)	切向刚度/(N·m ⁻¹)	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
围岩	2 720	3.62	1.97			38.6	1.4	3.0
衬砌	2 500	16.67	12.50					
接触面				6.00	6.00	30.0	1.2	1.6

1.2 非一致性地震模拟

合理的空间非一致性地震波是地下长大隧道动力响应分析的基础。目前关于非一致性地震输入的方式包括时域法、频域法和合成法3种^[14]。合成法可以描述地震波的频谱特征,且能够合成得到时域中的多点地震动时程,可以很好地考虑地震动的空间非一致性。鉴于此,采取合成法生成空间非一致性地震波。

1.2.1 地震波合成理论

采用屈铁军等^[11]提出的方法合成模型底面各激振点的加速度时程曲线,第 n ($n=1, 2, 3, \dots$)个激振点的加速度 $a_n(t)$ 计算式为

$$a_n(t) = \sum_{m=1}^n \sum_{k=0}^{N-1} A_{nm}(\omega_k) \cos(\omega_k t + \theta_{nm}(\omega_k) + \varphi_{mk}) \quad (1)$$

其中,

$$N \leq fT + 1$$

$$\omega_k = k \frac{2\pi}{T}$$

$$A_{nm}(\omega_k) = \sqrt{4 \frac{2\pi}{T} |I_{nm}(\omega_k)|}$$

$$\theta_{nm}(\omega_k) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(I_{nm}(\omega_k))}{\text{Re}(I_{nm}(\omega_k))}$$

式中: t 为时间; T 和 f 分别为所合成地震波的总持续时间和频率上限; N 为与地震波持续时间 T 和频率上限 f 相关的整数; φ_{mk} 为随机相位角,在区间 $(0, 2\pi)$ 上服从均匀分布; ω_k 为圆频率离散点; $A_{nm}(\omega_k)$ 和 $\theta_{nm}(\omega_k)$ 分别为第 n 点与第 m 点相关的第 k 个圆频率 ω_k 的幅值和相位角; $\text{Re}(\cdot)$, $\text{Im}(\cdot)$ 和 $|\cdot|$ 分别为取复数实部、虚部和模的运算符; $I_{nm}(\omega_k)$ 为功率谱矩阵 $\mathbf{S}(\omega_k)$ 进行科列斯基分解(Cholesky)的下三角矩阵元素。

功率谱矩阵 $\mathbf{S}(\omega_k)$ 表达式为

$$\mathbf{S}(\omega_k) = \begin{pmatrix} S_{11}(\omega_k) & S_{12}(\omega_k) & \cdots & S_{1n}(\omega_k) \\ S_{21}(\omega_k) & S_{22}(\omega_k) & \cdots & S_{2n}(\omega_k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(\omega_k) & S_{n2}(\omega_k) & \cdots & S_{nn}(\omega_k) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $S_1(\omega_k)$, $S_2(\omega_k)$, ..., $S_n(\omega_k)$ 分别为第1

2, ..., n个激振点的自谱密度; $S_{ij}(\omega_k)$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 为第 i 个激振点与第 j 个激振点的互谱密度。

自谱密度 $S(\omega_k)$ 采用金井清 (Kanai Tajimi) 谱, 即

$$S(\omega_k) = \frac{\omega_k}{\omega_k^6 + \omega_c^6 \left(1 - \frac{\omega_k^2}{\omega_g^2}\right)^2 + 4\xi_g^2 \frac{\omega_k^2}{\omega_g^2}} S_0 \quad (3)$$

式中: ω_c , ω_g , ξ_g 和 S_0 为 Kanai Tajimi 谱的相关参数, 通过谱参数的调整可以控制 Kanai Tajimi 谱的几何形状。各参数的取值参考文献 [14], 具体为 $\omega_c = 3.5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\omega_g = 4.58 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\xi_g = 0.18$ 和 $S_0 = 0.005 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 。

最后, 对式 (1) 所求得第 n 个激振点的加速度时程 $a_n(t)$ 进行非平稳化处理, 即

$$\dot{a}_n(t) = f(t) a_n(t) \quad (4)$$

式中: $\dot{a}_n(t)$ 为非平稳化处理后的第 n 个激振点的加速度时程; $f(t)$ 为强度包络曲线。

1.2.2 地震波输入方式

合成地震加速度时程曲线后, 可通过数值积分获得速度和位移时程曲线。为消除速度和位移曲线的“偏移现象”, 对加速度曲线进行基线校正^[22]。隧道总长 1 000 m, 两端按 25 m 划分为 1 个激振区间, 其余部分按 50 m 划分为 1 个激振区间, 共计划分为 21 个激振区间。因此, 根据 1.2.1 节理论生成共计 21 个激振点的加速度时程曲线, 并沿着隧道轴向依次加载到不同的激振区间。地震波输入方向为 z 轴方向, 振动方向为 y 轴方向^[21]。1#, 7#, 14# 和 21# 激振点监测到的加速度时程曲线如图 2 所示。由图 2 可知: 每个激振点的加速度时程曲线的波形基本一致, 随着轴向距离的增加, 各监测点的时程曲线具有一定的延时效应, 且加速度峰值逐渐降低。

沿隧道纵向生成的各激振点的地震加速度峰值如图 3 所示。由图 3 可知: 合成的激振点加速度峰

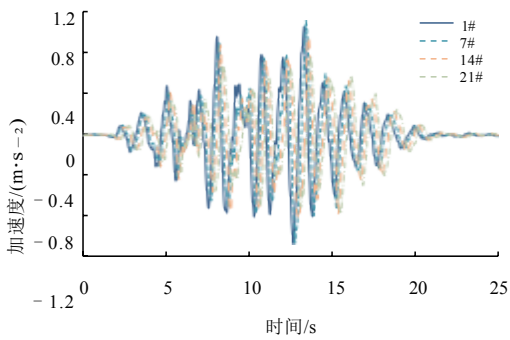


图2 1#，7#，14#和21#激振点加速度时程曲线

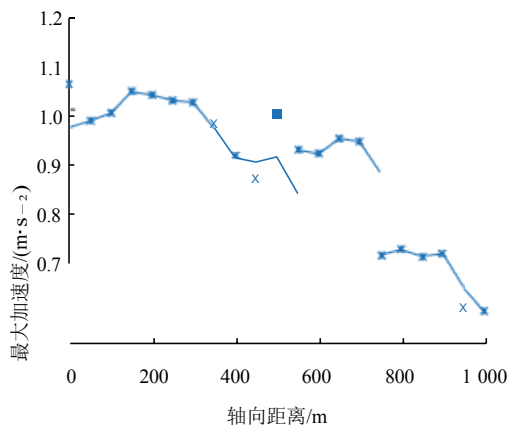


图3 各激振点加速度峰值

值曲线很好地体现了行波效应和衰减效应，证明了所合成非一致性地震波的可行性。

1.3 数值模拟方案

为研究非一致性地震作用下隧道衬砌的结构变形规律，考虑倾角、厚度和岩体等级 3 种因素，设计不同类型的破碎带，开展多工况下隧道地震动力响应研究，模型中模拟的不同类型破碎带的物理力学参数见表 2，计算方案见表 3。通过对破碎带的

表2 不同岩体等级破碎带物理力学参数

岩体等级	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
Ⅲ类	2 720	3.62	1.97	38.60	1.40	3.00
中等Ⅳ	2 500	3.47	1.38	33.00	0.45	0.60
较差Ⅳ	2 500	2.15	0.84	29.79	0.42	0.37
V类	2 500	0.83	0.30	26.57	0.40	0.15

表3 计算方案

工况	夹层厚度/m	夹层倾斜角度/($^{\circ}$)	夹层岩体等级
A1	0.0	30	V
A2	0.5	30	V
A3	5.0	30	V
A4	20.0	30	V
B1	0.5	45	V
B2	0.5	90	V
C1	0.5	45	中等Ⅳ
C2	0.5	45	较差Ⅳ
C3	0.5	45	Ⅲ

参数进行差别设置，对参数变量采用控制变量法，分析不同倾角、厚度和岩体等级条件下衬砌结构的变形特征，深入研究破碎带几何参数对非一致性地震作用下长大隧道衬砌结构变形的响应规律。

2 衬砌结构轴向变形

地震作用下，长大隧道在非一致性地震作用下往往会发生明显的沿轴线方向的拉伸和压缩变形，也会发生沿轴线方向的剪切变形，表现出明显的空间非一致性。

2.1 拉压变形

衬砌沿隧道轴向的平均拉伸和压缩应变^[23]为

$$\varepsilon = \frac{y_B - y_A}{L_{B-A}} \quad (5)$$

式中： y_A 和 y_B 分别为监测点A和B沿y方向的位移； L_{B-A} 为A点和B点之间的距离； ε 为衬砌沿隧道轴向的应变，当 ε 为正时，说明衬砌发生拉伸变形，反之则为压缩变形。

非一致性地震作用下衬砌沿隧道轴向的拉压变形峰值曲线如图4所示。由图4可知：①在不同倾角、厚度和岩体等级破碎带状况下，无破碎带（包括Ⅲ级岩体）时衬砌的轴向拉压变形均大于有破碎带时，说明在非一致性地震作用下，破碎带的存在限制了衬砌整体沿轴向拉压变形的能力；②在不同倾角破碎带状况下，衬砌的轴向拉压变形基本上都是沿隧道轴向呈现先近似线性增大后基本保持不变的趋势，拉压变形量排序为“破碎带倾角 45° >破碎带倾角 30° =破碎带倾角 90° ”，说明破碎带倾角 45° 时衬砌的拉压破坏比其他有破碎带的情况更严重；③在不同厚度破碎带状况下，破碎带厚度为5m时衬砌的拉压变形最小，而破碎带厚度为0.5和20m时衬砌的拉压变形较大，变化量一致，说明当破碎带的厚度过小或过大时，隧道衬砌的拉压破坏更严重；④在不同岩体等级破碎带状况下，衬砌的轴向拉压变形几乎一致，说明破碎带的岩体等级对隧道整体的拉伸变形影响不大。

2.2 剪切变形

衬砌沿隧道轴向方向上的平均剪切应变^[23]为

$$\gamma = \frac{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (z_B - z_A)^2}}{L_{B-A}} \quad (6)$$

式中： x_A 和 x_B 分别为监测点A和B沿x方向的位移； z_A 和 z_B 分别为监测点A和B沿z方向的位移。

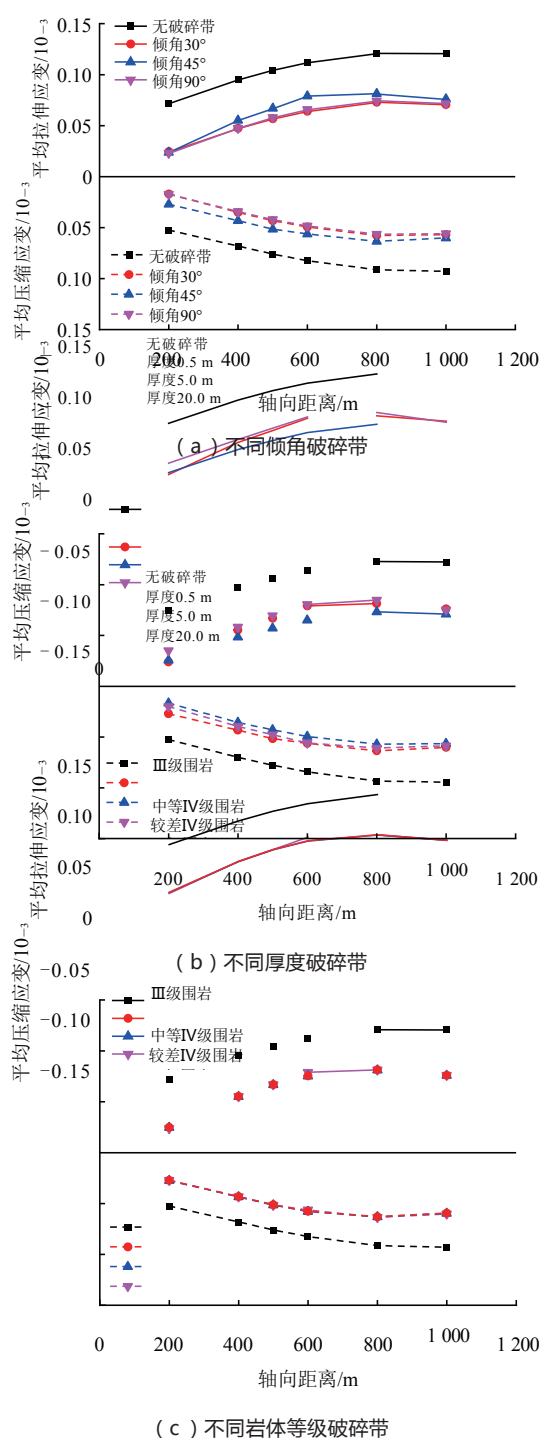


图4 衬砌结构沿隧道轴向拉压变形

带倾角 $45^\circ >$ 破碎带倾角 $30^\circ >$ 破碎带倾角 90° ，说明破碎带倾角 45° 时衬砌的轴向剪切破坏比其他情况更严重；③在不同厚度破碎带状况下，衬砌的轴

非一致性地震作用下衬砌沿隧道轴向的剪切变形峰值曲线如图5所示。由图5可知：①在不同倾角、厚度和岩体等级破碎带状况下，无破碎带时衬砌的轴向剪切变形均小于有破碎带时，说明在非一致性地震作用下，破碎带的存在加剧了衬砌整体沿轴向的剪切破坏；②在不同倾角破碎带状况下，衬砌的轴向剪切变形基本上都是沿隧道轴向呈现先迅速降低后缓慢减小的趋势，说明隧道入口段衬砌更容易发生轴向剪切破坏，剪切变形量排序为“破碎

以上内容仅为本文档的试下载部分，
为可阅读页数的一半内容。如要下载
或阅读全文，请访问：

[https://d.book118.com/2350421010
42011200](https://d.book118.com/235042101042011200)