

基于物理震源模型的跨断层隧道地震响应分析方法

罗超^{1,2}, 曹晓雨², 高阳³, 徐飞³, 徐阳⁴, 王昊^{1,2}

- (1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障教育部重点实验室, 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 石家庄 050043;
4. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要: 在跨断层隧道的抗震设计和地震响应分析中, 目前存在断层错动与地震动耦合加载物理机制不明确和计算理论不完善的问题。基于物理震源模型和简化波动输入法, 提出了一种跨断层隧道地震响应分析框架, 可在跨断层隧道地震响应分析中实现断层错动和地震动的耦合加载。通过自由场和土-隧道结构相互作用体系两组算例, 对该方法和同震变形场法进行了对比, 验证了该方法的正确性和先进性。结果表明: 在自由场模型的地震响应分析中, 该方法计算的加速度响应结果精度显著优于同震变形场法, 两种方法的位移响应结果误差均较小; 对于土-隧道相互作用模型的地震响应分析, 该方法与同震变形场法在隧道衬砌的加速度、位移、等效应力的计算结果分别最大相差 19.20%、3.04%、4.48%, 隧道衬砌的位移呈现了显著的跨断层分布特性。该方法可以实现模拟断层错动和地震动对隧道结构的共同作用, 计算精度较现有方法更高, 可用于跨断层工程结构的地震响应分析。

关键词: 隧道工程; 跨断层隧道; 物理震源模型; 简化波动输入法; 断层错动

中图分类号: U452.28

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.22.033

Physics-based seismic response analysis method for tunnels crossing faults

LUO Chao^{1,2}, CAO Xiaoyu², GAO Yang³, XU Fei³, XU Yang⁴, WANG Hao^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
4. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: In the seismic design and earthquake response analysis of tunnels crossing faults, the current challenges include the coupled loading of fault displacement and ground motion, with unclear physical mechanisms and imperfect calculation theories. A seismic response analysis framework for tunnels crossing faults was proposed based on a physical source model and a simplified wave input method, enabling to consider the coupled loading of fault displacement and ground motion in seismic response analysis of tunnels crossing faults. Through two sets of cases, one involving a free-field model and the other a soil-tunnel structure interaction system, the results of the proposed method were compared with those of the co-seismic deformation field method, validating the correctness and superiority of the proposed method. The results indicate that: in seismic response analysis of free-field models, the acceleration response accuracy by the proposed method is significantly superior to that by the co-seismic deformation field method, with relatively small errors in the displacement responses for both methods. In seismic response analysis of the soil-tunnel interaction model, the proposed method shows maximum differences of 19.20%, 3.04%, and 4.48% in the acceleration, displacement, and equivalent stress calculations of the tunnel lining, respectively, compared to the co-seismic deformation field method. The displacement in the tunnel lining exhibits significant cross-fault distribution characteristics. This method successfully simulates the combined effects of fault displacement and ground motion on tunnel structures, demonstrating higher

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600800); 中央引导地方科技发展资金项目(216Z5402G); 国家自然科学基金(52078311; 52278467); 河北省自然科学基金面上项目(E2022210095; E2024210049); 河北省重点研发计划项目(21375407D); 中国国家

铁路集团有限公司科技研发计划(P2022G013); 河北省地震科技星火计划项目(DZ2023120500009)

收稿日期: 2024-02-28 修改稿收到日期: 2024-04-14

第一作者 罗超 男, 博士, 讲师, 1987 年生

通信作者 王昊 女, 博士, 讲师, 1989 年生

calculation accuracy compared to existing methods. It is applicable to the seismic response analysis of engineering structures crossing faults.

Key words: tunnel engineering; tunnels crossing faults; physics-based source model; simplified elastic wave input method; fault displacement

随着全球城市化进程的加快和人口快速增长^[1-2],交通基础设施建设的紧迫性日益凸显,为了满足民众不断增加的交通需求,需要积极加快交通基础设施建设的步伐^[3-6]。然而,值得注意的是,在当今世界的许多地区,地震断层分布异常复杂,并且由于工程设施的特殊性和必要性,很多情况下地铁隧道等长线形工程结构不得不跨越活动断层,它们在满足人们交通需求的同时,也面临着跨断层地震灾害的威胁^[7-10],因此对跨断层工程结构进行地震响应分析,为工程结构的抗震设计提供科学依据和技术支撑已经尤为重要。

当隧道横跨的活动断层发生地震时,隧道会在断层错动作用下发生剪切变形,引发衬砌裂缝、位移、坍塌等震害。不同于远场地震作用、非活动断层和隧道穿越断层破碎带的情况,横跨活动断层的隧道结构同时承受了断层错动和由此引发的地震动的共同作用。在结构抗震分析中,直接模拟发震断层的错动运动对隧道结构的影响是相当困难的。为了解决这一问题,很多研究人员假设断层表面的错动滑动量是均匀的,通过模拟隧道附近有限区域内的断层面的静力错动来分析隧道结构地震响应。比如:赵密等^[11]以有限元数值模拟结果为标准,对比验证了3种经典的简化解析方法在不同地质条件及隧道不同埋深条件下的精度;刘国钊等^[12-13]推导了正断层错动作用下隧道纵向力学响应的解析解,并对断层错位、倾角、隧道刚度和上、下盘相对刚度等参数对隧道响应影响的敏感性进行了分析。但由于跨断层隧道地震动输入的特殊性,静力分析方法已不再适用,或只能用于分析断层破碎带而非发震断层对隧道地震响应的影响。

为了弥补拟静力分析的缺陷,夏雨成等^[14]通过数值建模和模型箱试验相结合的方式,研究了断层错动与地震作用下的隧道动力响应;赵大能等^[15]依托某隧道工程,研究逆断层错动和不同强度地震动共同作用下隧道结构地震响应特征;陈之毅等^[16]通过同时在模型底部垂直入射地震波和在上盘施加滑动速度来模拟断层错动,模拟断层错动-地震动共同作用下隧道结构的损伤情况,结果表明,地震动对隧道的影响是不可忽略的。虽然使用断层错动-地震动共同作用的方法考虑了地震动的动力特性,但简单地将地震波和断层错动两种作用叠加在一起,不能反映断层错动产生地震波的物理现象,同时在实际应用中难以量化两者的比例关系。

有学者基于反应位移法的思想,将同震变形场以位移人工边界的形式对工程模型进行加载,对跨断层隧道地震响应开展分析。例如:刘艳琼等^[17]基于Lee等^[18-20]提出的断层地震引起的地表最大永久位移估计方法,提出了近断层引起的最大永久位移场的估计方法;郭凯等^[21-24]为了描述断层位错影响下地表变形程度的分布规律及对隧道衬砌损伤的影响,提出了一种基于同震变形和位错模型理论的隧道位错反应分析方法。结合成层地质模型与有限断层模型,研究了地震同震变形场内部的变形特点及其对隧道的影响。但由于反应位移法中的人工边界缺乏吸能能力,可能导致波在模型内部的反射,导致反应偏大。仅考虑施加在隧道模型上的位移,仅能考虑土-隧道的真实变形,且未考虑土-隧道的边界效应和地震动的动力效应。

当将跨断层隧道地震响应分析看作是跨断层场地-结构相互作用地震响应分析时,可以借鉴场地地震反应或土-结构相互作用的分析方法来解决这一问题。这一类问题一般为外源问题,即地震的发震断层往往距离场地较远,不被包含在计算模型中。刘晶波等^[25]运用脱离体的概念,提出了在使用黏性边界或者黏弹性边界时,二维和三维有限元模型的等效地震动输入方法,这种方法在近20年来有着极为广泛的应用。Wang等^[26-27]在对边坡场地地震输入方法的研究中提出了简化波动输入法,对刘晶波提出的地震动输入方法进行了简化,使其等效地震动荷载的计算只需要边界处的加速度、速度和位移时程,并且可直接在人工边界上实现波动输入,不再需要边界处的应力时程。这些方法目前的应用主要为断层-场地-结构分析,具有应用在跨断层隧道结构的断层错动和地震动共同作用分析的潜力。

综上所述,针对现有的跨断层隧道地震响应分析方法难以实现断层错动-地震动的耦合加载,采用场地地震动输入方法时需要确定跨断层区域的地震动场的问题。本文提出一种物理震源模型的跨断层隧道响应分析方法,首先通过确定性地震动模拟确定跨断层区域的非一致地震动输入,再将非一致地震动转化为等效荷载施加于局部场地模型,实现跨断层隧道的断层-场地-结构地震响应分析,最后通过两组算例,对本文提出方法的正确性和先进性进行验证,为完善跨断层工程结构的抗震设计提供理论基础。

1 基于物理震源模型的跨断层隧道地震响应分析方法

跨断层工程结构受到断层错动的影响,其地震动输入具有永久位移和强烈的非一致性等特点。因此,需要对地震波从断层破裂,经传播路径传播至局部场地和结构的全物理过程开展研究。本文提出一种跨断层隧道地震响应分析框架,分为 3 个步骤:

步骤 1 跨断层地震动模拟。确定总体计算区域的区域尺度和位置,基于物理震源模型,使用数值方法或解析方法进行确定性地震动模拟,获得断层上、下盘的跨断层地震动场。

步骤 2 跨断层地震动等效荷载的计算。建立跨断层隧道的有限元模型,使用简化刘晶波波动直接输入法 (simplified Liu's direct method, SLDM) 法和步骤 1 计算的跨断层地震动场计算模型的跨断层地震动等效荷载。

步骤 3 结构地震响应分析。将步骤 2 计算的跨断层等效荷载施加在有限元模型上,对跨断层隧道结构进行地震响应分析。

1.1 跨断层地震动模拟

在进行跨断层结构地震响应分析时,首先需要开展确定性跨断层地震动模拟。现如今跨断层地震动模拟有多种方法,其中数值方法主要包括有限差分法和谱元法等^[28-30],解析法包括格林函数、FK (frequency-wavenumber) 法等^[31-36]。在模拟断层错动的物理过程时,断层破裂模型可选择运动学断层破裂模型^[37-39]或动力学断层破裂模型^[40]。

在进行跨断层地震动模拟时还需考虑多因素对模拟精度的影响。例如:在使用数值解中的有限差分法和谱元法来模拟地震动时,需考虑地形条件和网格尺寸等对拟结果频率精确度的影响;解析法一般仅可以考虑简单的水平成层场地,不能考虑复杂的地形,无法满足工程问题的实际需求。数值方法的主要缺点是计算量巨大,但随着计算机能力的不断发展,通过数值方法模拟跨断层地震动研究已经越来越容易实现。

1.2 跨断层地震动等效荷载的计算

跨断层地震动等效荷载的计算是实现跨断层地震动加载的关键,本文使用 SLDM 计算跨断层地震动等效荷载。SLDM 将整体地震动场区域中取出一个跨断层局部计算域。全局模型如图 1 所示。图 1 中:局部场地及其相连的网格部分表示计算时我们所关心的区域,记为 Ω ;最外层虚线框包含的部分表示系统中的其他区域,记为 Ω^+ ;一般来说,在地震计算中通常断层距离 Ω 较远,位于 Ω^+ 中;最外层网格实线部分是前两个区域的截断边界,记为 Γ ;最外层网格相连的虚线表示

半无限空间,与 Γ 相连的一层内部节点为 Γ_i 。

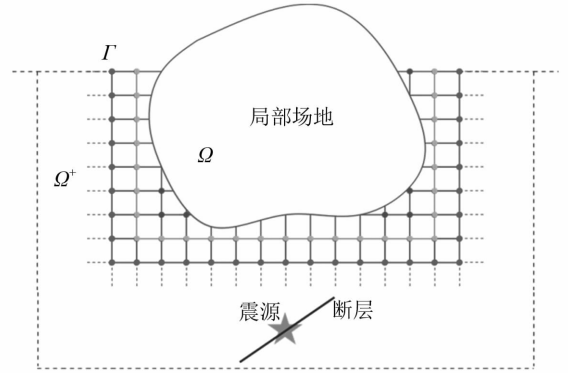


图 1 全局模型

Fig. 1 Global model

考虑到有限元模型是使用人工边界人为地从半无限空间切取而出,因此若要准确地实现波动输入,在人工边界上施加的等效荷载应该能使局部场地模型边界处位移和人工边界位移均与原自由场一致。因此,图 1 边界节点处的等效荷载激励由两部分构成:①使未施加黏弹性边界的局部计算域的边界节点的位移和应力与原自由场相同的节点力 P_{fre} ;②黏弹性边界运动所需的节点力 P_{vs} 。令所求的等效节点力为 P_{eff} ,则有

$$P_{eff} = P_{fre} + P_{vs} \quad (1)$$

显然, P_{fre} 就是自由场模型中 Γ 边界上节点所受到的节点力,设为 F_{b0} 。若要计算 F_{b0} ,考虑如图 2 所示的自由场全局模型。在全局模型中,使用 Ω^0 代替 Ω ,则自由场模型系统的运动方程可以写成

$$[K]\{u(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [M]\{\ddot{u}(t)\} = \{P(t)\} \quad (2)$$

式中: K 、 C 和 M 分别为自由场系统的刚度、阻尼和质量矩阵; $u(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 和 $\ddot{u}(t)$ 分别为自由场系统的位移、速度和加速度时程; $P(t)$ 为系统的动力荷载。由于我们关心的区域是 Ω^0 区域,因此,将式(2)以分块形式给出

$$\begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega^0} & M_{ib}^{\Omega^0} & 0 \\ M_{bi}^{\Omega^0} & M_{bb}^{\Omega^0} + M_{bb}^{\Omega^+} & M_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & M_{cb}^{\Omega^+} & M_{ce}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i^0 \\ \ddot{u}_b^0 \\ \ddot{u}_e^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ii}^{\Omega^0} & C_{ib}^{\Omega^0} & 0 \\ C_{bi}^{\Omega^0} & C_{bb}^{\Omega^0} + C_{bb}^{\Omega^+} & C_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & C_{cb}^{\Omega^+} & C_{ce}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_i^0 \\ \dot{u}_b^0 \\ \dot{u}_e^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega^0} & K_{ib}^{\Omega^0} & 0 \\ K_{bi}^{\Omega^0} & K_{bb}^{\Omega^0} + K_{bb}^{\Omega^+} & K_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & K_{cb}^{\Omega^+} & K_{ce}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i^0 \\ u_b^0 \\ u_e^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_e \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: M 、 C 和 K 分别为质量、阻尼和刚度矩阵;下标 i 、 b 和 e 分别为区域 Ω^0 、 Γ 和 Ω^+ 上的节点;上标 Ω^0 和 Ω^+ 为矩阵所处的区域。将式(3)在区域 Ω^0 上展开,可得

$$\begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega^0} & M_{ib}^{\Omega^0} \\ M_{bi}^{\Omega^0} & M_{bb}^{\Omega^0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i^0 \\ \ddot{u}_b^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ii}^{\Omega^0} & C_{ib}^{\Omega^0} \\ C_{bi}^{\Omega^0} & C_{bb}^{\Omega^0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_i^0 \\ \dot{u}_b^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega^0} & K_{ib}^{\Omega^0} \\ K_{bi}^{\Omega^0} & K_{bb}^{\Omega^0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i^0 \\ u_b^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中, P_b 为界面 Γ 处的节点力。显然, 式(4)中的 P_b 就是式(1)中的 P_{fre} 。展开式(4)第二行, 并使用 P_{fre} 代替 P_b , 可得

$$P_{\text{fre}} = \mathbf{M}_{bi}^{\Omega^0} \ddot{u}_i^0 + \mathbf{M}_{bb}^{\Omega^0} \ddot{u}_b^0 + \mathbf{C}_{bi}^{\Omega^0} \dot{u}_i^0 + \mathbf{C}_{bb}^{\Omega^0} \dot{u}_b^0 + \mathbf{K}_{bi}^{\Omega^0} u_i^0 + \mathbf{K}_{bb}^{\Omega^0} u_b^0 \quad (5)$$

显然, 观察式(5)可知, 当 u_i^0 和 u_b^0 已知时, 对应的速度和加速度时程可以通过对位移时程进行微分求得, 进而可求得 P_{fre} 。

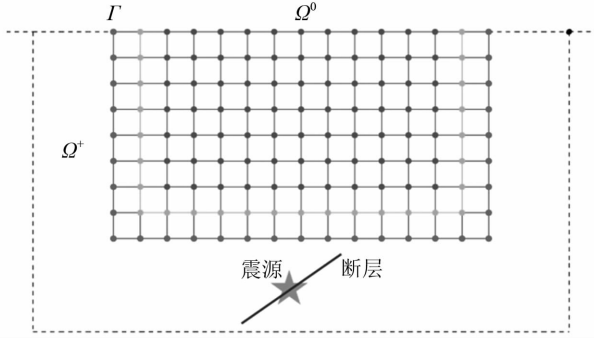


图2 自由场模型

Fig.2 Free-field model

根据 P_{vs} 的定义, 计算式可由式(6)给出

$$P_{\text{vs}} = \mathbf{C}_b \dot{u}_b^0 + \mathbf{K}_b u_b^0 \quad (6)$$

式中, \mathbf{C}_b 和 \mathbf{K}_b 分别为节点 b 处黏弹性人工边界的阻尼系数矩阵和刚度系数矩阵。

虽然计算 P_{eff} 的各子矩阵都是自由场模型中的矩阵, 但是确定这些子矩阵的边界节点和单元在自由场模型和局部有限元模型中并未发生变化。因此, 根据有限元理论, P_{eff} 可以通过使用图1中有限元模型的矩阵计算求得

$$P_{\text{eff}} = \mathbf{M}_{bi}^{\Omega} \ddot{u}_i^0 + \mathbf{M}_{bb}^{\Omega} \ddot{u}_b^0 + \mathbf{C}_{bi}^{\Omega} \dot{u}_i^0 + \mathbf{C}_{bb}^{\Omega} \dot{u}_b^0 + \mathbf{K}_{bi}^{\Omega} u_i^0 + \mathbf{K}_{bb}^{\Omega} u_b^0 + \mathbf{C}_b \dot{u}_b + \mathbf{K}_b u_b \quad (7)$$

式(6)、式(7)中 u_b^0 可以体现边界处的永久位移, 同时 SLDM 是一种波动加载方法, 因此可用于跨断层隧道结构的断层错动和地震动耦合加载分析。

值得注意的是, 由于跨断层地震动会在断层两侧产生永久大变形位移, 在计算时需要注意结构的大变形破坏, 且地下结构的工程应用中需要考虑土和结构的非线性和弹塑性; 而对于地上工程结构, 不仅要考虑土和结构的非线性和弹塑性, 还需要考虑土-结构相互作用的影响。

本文提出的方法适用于解析解的地震动输入, 例如 SV 波、P 波和 Rayleigh 波等类型波输入的情况; 同时也适用于确定性地震动模拟的地震动场在局部区域的输入。在具体有限元实现中, 简化波动输入法需配合黏弹性人工边界使用。当使用其他类型人工边界条件时, 需要修改 P_{vs} , 保证人工边界可随自由场运动。

2 跨断层隧道地震响应分析方法验证

2.1 基于物理震源模型的地震动模拟

2.1.1 GP 断层破裂模型

本节以山东省青岛市胶州湾第二海底隧道为实际工程背景, 验证本文提出的计算方法的正确性和先进性。在跨断层地震动模拟中, 使用基于 GP (Graves & Pitarka) 法建立的运动学断层破裂模型, 采用“Seismic Waves, 4th order” (SW4) 有限差分计算程序^[41-44], 对胶州湾地区第二海底隧道横跨的沧口断裂进行跨断层地震动模拟。

根据沧口断裂的活动性质分析及沧口断裂与隧道交汇位置, 本节对沧口断裂胶州湾-丹山区段进行地震动模拟, 沧口断裂的破裂面的走向、倾角和滑动角分别取为 35° 、 75° 和 5° ^[45], 设置震源位于断层破裂面的几何中心, 子断层的大小为 $0.04 \text{ km} \times 0.04 \text{ km}$, 震中位于 $(36.117^\circ \text{N}, 120.326^\circ \text{E})$, 震源深度为 9.5 km , 断层长度取为 22 km 。沧口断裂为走滑型断层, 根据 Wells 等^[46]统计的 $5.6 < M_w \leq 8.1$ 时走滑地震的震源参数经验关系式, 计算本次地震动模拟矩震级 (M_w) 和断层破裂宽度 (R_w), 公式为

$$\lg(R_{\text{LD}}) = -2.57 + 0.62 \times M_w \quad (8)$$

$$\lg(R_w) = -0.76 + 0.27 \times M_w \quad (9)$$

式中: R_{LD} 为断层破裂长度; R_w 为断层破裂宽度; M_w 为矩震级。

经计算求得本次地震动模拟矩震级 M_w 为 6.33 级, 断层破裂面宽度为 9 km 。综合上述的震源数据, 使用 GP 法生成断层破裂模型, 沧口断裂的断层破裂模型参数, 如表1所示。表1中, 断层破裂模型是使用南加州地震中心 (The Southern California Earthquake Center, SCEC) 开发的宽频带平台 (Broadband Platform, BBP) 生成, 详细的内容可以查看网站 <https://github.com/SCECcode/bbp/wiki>。

表1 沧口断裂震源参数

Tab.1 Seismic source parameters of cangkou fault

参数	数值	参数	数值
震中经度/ $(^\circ)$	36.117	断层埋深/km	5
震中纬度/ $(^\circ)$	120.326	震级 M_w	6.33
震源深度/km	9.5	走向/ $(^\circ)$	35
破裂长度/km	22	倾角/ $(^\circ)$	75
破裂宽度/km	9	滑动角/ $(^\circ)$	5

2.1.2 地形模型及地质模型

断层和地震动模拟区域的相对位置和模拟区域的地形, 如图3所示。图3中: 虚线框为沧口断裂破裂面在地表投影迹线; 实现线条为隧道场址位置在地表的投影。使用美国地质调查局发布的具有 30 m 精度的全球地形数据 STRM1^[47] 建立研究区域内的地形模

型;使用模型 USTClitho2.0^[48]来建立速度结构模型,由于模型 USTClitho2.0 中没有地下岩层的密度,使用全球地壳模型 CRUST1.0^[49]中的地下岩层密度进行补充。

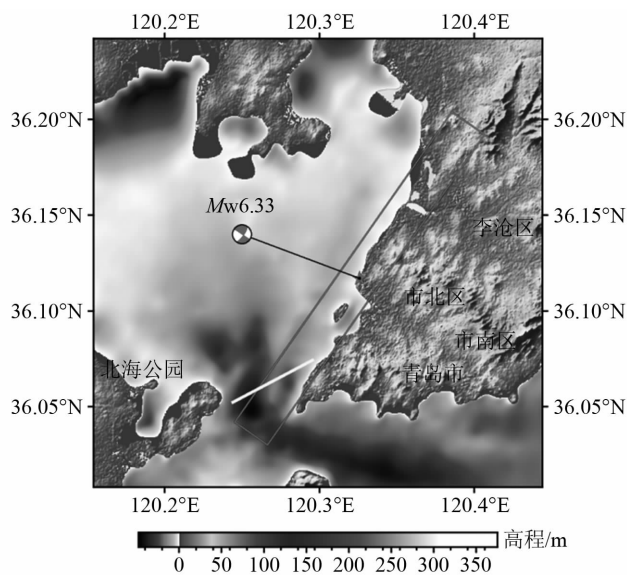


图 3 跨断层地震动模拟区域

Fig. 3 Cross-fault seismic simulation area

2.1.3 地震动模拟

本文使用 SW4 软件进行地震动模拟时,需要用到输入脚本文件、地形模型、速度结构模型和断层破裂模型。输入脚本文件内的代码在计算时会读取地形模型、速度结构模型和断层破裂模型,同时定义计算区域的原点位置、计算区域的总尺寸、网格尺寸、模拟的总时间、模拟网格点的输出等关键运行参数。

2.2 数值结果对比验证

由于隧道结构的存在引起的土-结构相互作用会对自由场地震动产生影响,本节使用无结构的自由场模型进行验证,其中自由场模型取图 3 中隧道部分区段所在位置(实线条位置与相应的长度)。有限元模型的网格尺寸不超过模拟的地震动的最小波长的 $1/8$ ^[50],在本文中,地震动模拟的频率为(0~5 Hz),网格划分尺寸 h 为

$$h \leq \frac{\lambda_{\min}}{8} = \frac{2960/5}{8} = 74 \text{ m} \quad (10)$$

基于有限元模型网格尺寸的要求,自由场有限元模型的网格尺寸 h 取 60 m。自由场模型的三维有限元自由场模型,如图 4 所示。图 4 中,模型顶部为实际海床地形,底部深度为海平面下 240 m,自由场模型材料属性与地震动模拟对应区域的材料参数一致,具体材料属性如表 2 所示。为了证明本文所提出方法的正确性和先进性,将本文计算结果与自由场和使用郭凯等、赵天次等、Guo 等和赵伯明等提出的同震变形场法的计算结果进行对比。同震变形场法的加载方法为将截断边界 Γ 位置处的跨断层地震动位移时程直接施加于

对于位置处。自由场地震动和两种方法的观测点阵列,如图 5 所示。图 5 中,阵列 1、阵列 2 为沿模型中心 y 轴 $y = -2160 \sim 2160 \text{ m}$,深度分别为 60 m、180 m 的阵列。所有阵列中相邻观测点的间距为 180 m,每个阵列各有 25 个观测点。

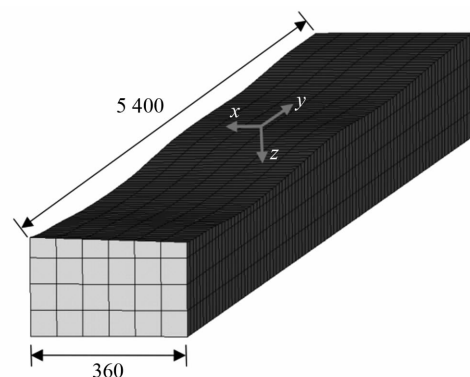


图 4 自由场模型(m)

Fig. 4 Free field model(m)

表 2 自由场模型材料属性

Tab. 2 Material properties of free field model

参数	数值			
z 轴分段/m	海床~60	60~120	120~180	180~240
横波波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2 960	2 969	2 975	2 981
纵波波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	4 922	4 931	4 940	4 949
密度/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$)	2 110	2 111	2 111	2 112
弹性模量/MPa	44 991	45 225	45 402	45 579
泊松比	0.216 7	0.215 6	0.215 5	0.215 3

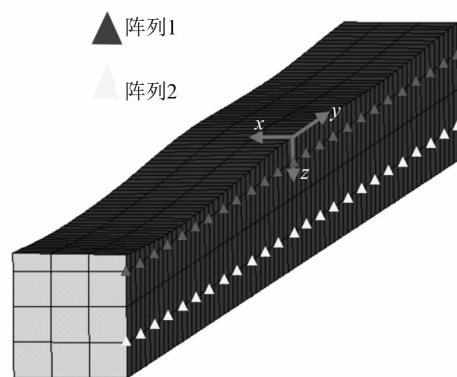


图 5 计算结果提取阵列位置

Fig. 5 Array position extraction from computational results

2.2.1 峰值加速度、峰值位移结果分析

自由场、本文方法和同震变形场法的峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)和峰值位移(peak ground displacement, PGD)数据,如表 3 所示。受篇幅限制,仅展示 y 方向的结果。由表 3 可知,本文方法和自由场各观测点的峰值加速度数值在 y 轴方向从 $-2160 \sim 0 \text{ m}$ 和 $2160 \sim 0 \text{ m}$ 内逐渐增加,但同震变形场法峰值加速度结果分布规律杂乱。自由场和两种方法的峰值位移在 y 轴坐标为 1080 m 的位置处出现了方向相反的突变,显示出有限元模型在跨断层作用下模型的相对错动。

表3 自由场、本文方法、同震变形场法 y 方向结果

Tab.3 Free field, the method of this study, and co-seismic deformation field method y-direction results

观测点阵列	计算方法	阵列点 y 方向坐标/m								
		-2 160	-1 620	-1 080	-540	0	540	1 080	1 620	2 160
阵列 1 峰值 加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	自由场	1.033	1.082	1.168	1.256	1.395	1.331	1.110	1.087	1.483
	本文方法	0.966	1.040	1.178	1.251	1.438	1.292	1.091	1.108	1.515
	同震变形场法	1.303	1.277	1.200	1.299	1.620	1.365	1.097	1.304	1.609
阵列 2 峰值 加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	自由场	1.223	1.335	1.295	1.302	1.189	1.062	0.895	0.889	0.968
	本文方法	1.174	1.292	1.244	1.302	1.169	1.051	0.886	0.902	0.935
	同震变形场法	1.239	1.436	1.306	1.238	1.192	1.134	0.881	1.063	1.026
阵列 1 峰值 位移/m	自由场	0.142	0.130	0.115	0.098	0.080	0.059	-0.041	-0.060	-0.082
	本文方法	0.141	0.129	0.115	0.097	0.080	0.059	-0.041	-0.061	-0.083
	同震变形场法	0.142	0.130	0.115	0.099	0.080	0.059	-0.041	-0.061	-0.082
阵列 2 峰值 位移/m	自由场	0.144	0.133	0.119	0.101	0.082	0.061	-0.037	-0.058	-0.081
	本文方法	0.144	0.133	0.117	0.100	0.082	0.060	-0.037	-0.058	-0.082
	同震变形场法	0.144	0.133	0.118	0.101	0.082	0.061	-0.037	-0.058	-0.081

值得注意的是,本文方法的峰值位移略小于自由场的结果,这是由于本文方法采用等效荷载加载,由于使用了 Rayleigh 阻尼,低频对应的阻尼比会偏大,导致对于的响应偏小,而位移响应又主要受结构的低频响应控制,因此导致了本文提出方法的位移结果精度略低于同震变形场法,但是这种误差非常小,对结果的计算精度影响很小。

2.2.2 峰值加速度、峰值位移误差对比

本文方法、同震变形场法在 y 方向的峰值加速度、峰值位移的相对误差,如表 4 所示,为更明确地

展现出两种方法较大的误差,将两种方法大于 5% 的误差做出了加粗标记。由表 4 可知,两种方法的位移误差均较小,但是本文方法加速度计算结果的精度显著高于同震变形场法,同震变形场法在 y 方向上的峰值加速度的最大误差约为 28.81%,而本文方法最大误差仅约为 4.17%。综上所述,本文提出的方法在自由场模型的加速度和速度响应两方面均具有很高的计算精度,而同震变形场法仅能保证位移响应的精度,验证了本文方法的正确性和先进性。

表4 本文方法和同震变形场法 y 方向结果误差

Tab.4 Error in y-direction results between the method in this paper and same-shake deformation field method

观测点阵列	计算方法	阵列点 y 方向坐标/m								
		-2 160	-1 620	-1 080	-540	0	540	1 080	1 620	2 160
阵列 1 峰值 加速度/%	本文方法	2.66	4.04	0.86	0.41	3.02	2.98	1.68	1.87	2.15
	同震变形场法	28.81	21.90	1.88	3.79	13.01	5.45	0.49	18.09	6.34
阵列 2 峰值 加速度/%	本文方法	4.17	3.35	4.14	0.07	1.72	1.07	1.00	1.40	3.50
	同震变形场法	5.34	10.79	4.79	4.85	1.92	7.79	0.51	18.10	9.42
阵列 1 峰值 位移/%	本文方法	0.42	0.48	0.11	0.31	0.83	0.85	0.51	0.68	0.59
	同震变形场法	0.01	0.44	0.46	0.87	0.18	0.12	1.26	0.61	0.11
阵列 2 峰值 位移/%	本文方法	0.42	0.27	1.51	1.18	0.56	0.77	1.03	0.30	0.51
	同震变形场法	0.01	0.15	0.20	0.11	0.01	0.15	0.33	0.16	0.07

2.2.3 峰值加速度、峰值位移波形对比

本文方法、同震变形场法 y 轴方向的加速度时程,如图 6 和图 7 所示。图 6 和图 7 中,纵坐标为每条时程对应的观测点在图 4 中 y 轴方向的坐标。由图 6 和图 7 可知,本文方法的加速度的波形较同震变形场法与自由场吻合程度更好。不同位置的加速度时程呈现出了

明显的跨断层分布,证明了本文计算方法可以实现地震动和断层错动的耦合加载。

本文方法和同震变形场法的位移时程,如图 8 和图 9 所示。由图 8 和图 9 可知,本文方法与同震变形场法在位移时程上与自由场的吻合度都很高。此外,隧道衬砌的位移方向在 1 080 ~ 2 160 m 和 1 080 ~ -2 160 m 的

两个区间内现方向相反,同时在图中可以清晰地观察到隧道衬砌的位移有着明显的跨断层分布,这充分体现了隧道衬砌在断层作用下,隧道受到断层错动出现方向相反的跨断层错动。

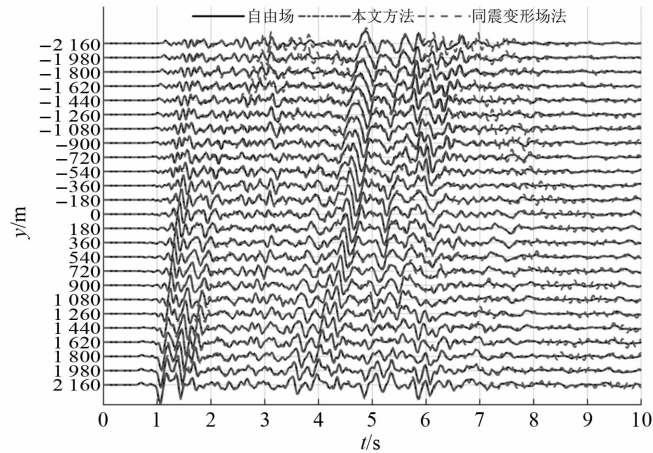


图 6 自由场、本文方法、同震变形场法 y 方向加速度
Fig. 6 Free field, the method of this study, and co-seismic deformation field method y -direction acceleration

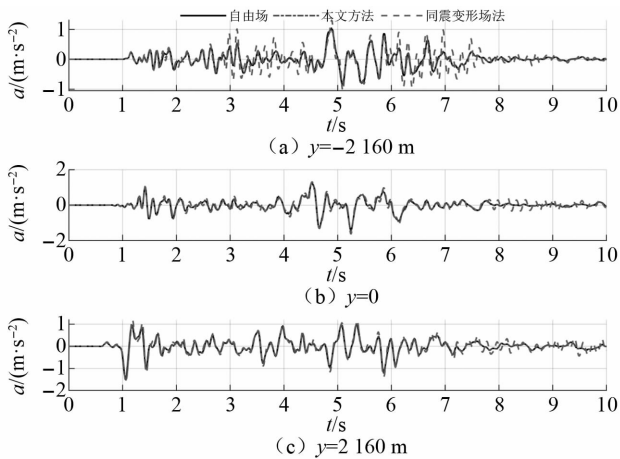


图 7 自由场、本文方法、同震变形场法 y 方向部分阵列点加速度
Fig. 7 Free field, the method of this study, and co-seismic deformation field method of partial array points y -direction acceleration

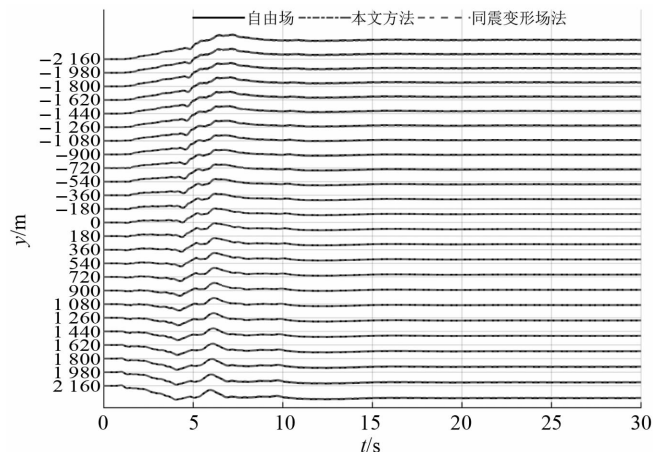


图 8 自由场、本文方法、同震变形场法 y 方向位移
Fig. 8 Free field, the method of this study, and co-seismic deformation field method y -direction displacement

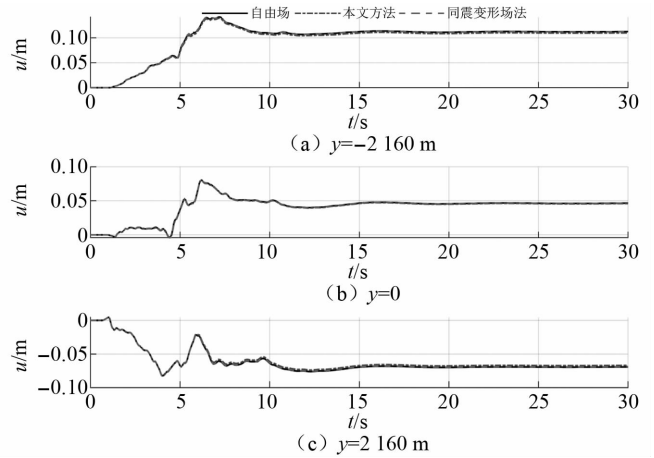


图 9 自由场、本文方法、同震变形场法 y 方向部分阵列点加速度位移
Fig. 9 Free field, the method of this study, and co-seismic deformation field method of partial array points y -direction displacement

3 跨断层隧道地震响应分析

为了分析跨断层隧道在地震作用下隧道衬砌的地震响应,本章在图 3 中白色实线线条位置处建立带有跨断层隧道的土-隧道相互作用模型。三维有限元土-隧道相互作用模型,如图 10 所示。图 10 中,网格尺寸与 2.2 节保持一致,隧道衬砌采用 C60 混凝土,混凝土弹性模量为 36 000 MPa,密度为 2 400 kg/m³,泊松比为 0.20,阻尼比为 0.05。通过 2.1 节中地震动模拟,获得土-隧道相互作用模型的跨断层地震动,分别使用本文方法和同震变形场方法对模型进行跨断层地震动荷载的计算。为避免模型边界处的计算结果受边界效应的影响,以隧道 y 轴 -2 160 ~ 2 160 m 区域为断层错动区,取断层错动区内隧道衬砌横向截面拱顶和拱底的计算结果,分析两种方法在断层错动区内隧道的加速度、位移和衬砌结构应力,各相邻截面在 y 轴方向上间距为 180 m。

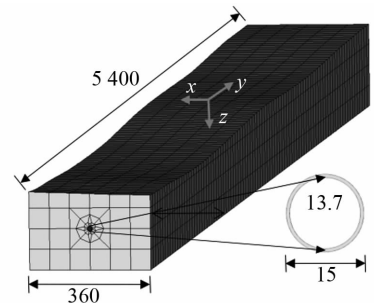


图 10 土-隧道相互作用模型(m)
Fig. 10 Soil-tunnel interaction model(m)

3.1 隧道衬砌加速度响应分析

本文方法、同震变形场法在 y 方向的峰值加速度,如表 5 所示。两种方法在峰值加速度上最大相差约为 19.20%,位于 $y = -540$ m 处的截面处。本文方法的峰

值加速度在 y 轴从 $-2\ 160 \sim -540\ \text{m}$ 逐渐增加,从 $-540 \sim 2\ 160\ \text{m}$ 逐渐减小,体现出了跨断层隧道在地

震作用下加速度沿隧道两端传播并逐渐减小的规律。

表 5 本文方法、同震变形场法在隧道衬砌 y 方向峰值加速度

Tab.5 The method of this study, peak accelerations in the y -direction of tunnel lining

观测点位置	计算方法	阵列点 y 方向坐标/m								
		-2 160	-1 620	-1 080	-540	0	540	1 080	1 620	2 160
拱顶	本文方法/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	1.016	1.201	1.214	1.342	1.295	1.235	1.032	1.021	1.041
	同震变形场法/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	1.194	1.424	1.226	1.270	1.385	1.319	1.002	1.137	1.217
拱底	本文方法/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	1.051	1.226	1.204	1.328	1.254	1.168	0.956	0.988	0.936
	同震变形场法/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	1.140	1.422	1.268	1.251	1.330	1.246	0.935	1.177	1.077

本文方法和同震变形场法隧道衬砌的加速度时程,如图 11 和图 12 所示。由图 11 和图 12 可知:本文方法和同震变形场法的加速度时程的波形随时间的变化趋势相似,两种方法的加速度达到峰值的时间在 y 轴从 $1\ 080 \sim -2\ 160\ \text{m}$ 逐渐增加,时间在 $4.5 \sim 5.1\ \text{s}$ 内;从 $1\ 080 \sim 2\ 160\ \text{m}$ 逐渐减小,时间在 $1.0 \sim 1.6\ \text{s}$ 内。两个区段加速度达到峰值的时间分布规律并不相同,这表明隧道不同区段受到加速度破坏的时间不同,因此跨断层隧道在断层的地震动作用下,需重点关注断层错动区内隧道衬砌结构的振动响应。

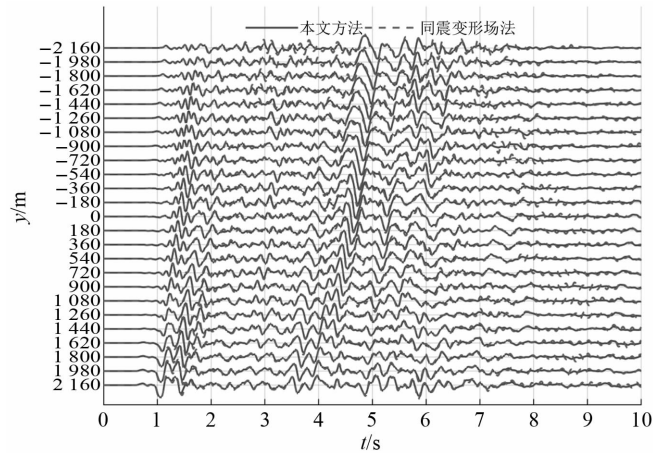


图 11 本文方法、同震变形场法隧道衬砌拱顶 y 方向加速度
Fig.11 The method of this study, co-seismic deformation field method, and y -direction acceleration of tunnel lining arch crown

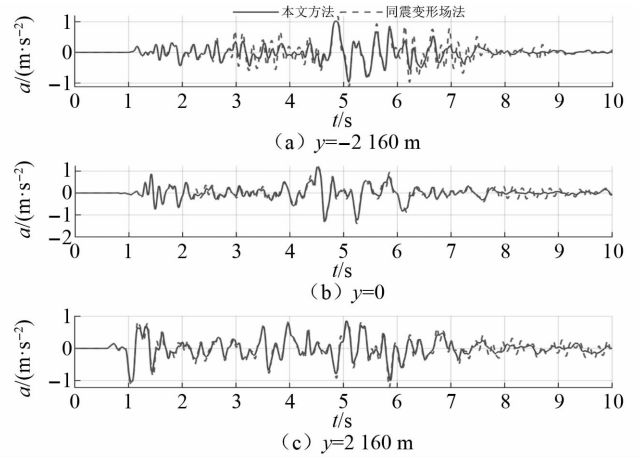


图 12 本文方法、同震变形场法隧道衬砌拱顶 y 方向部分观测点加速度
Fig.12 The method of this study, co-seismic deformation field method of partial observation points y -direction acceleration of tunnel lining arch crown

3.2 隧道衬砌位移响应分析

本文方法、同震变形场法中隧道衬砌的峰值位移结果,如表 6 所示。由表 6 可知,两种方法的峰值位移相差最大约为 3.04% 。在断层错动区内,隧道衬砌 y 方向的错动量在隧道两端达到最大,为 $22.20\ \text{cm}$,在隧道 y 方向 $y = -2\ 160 \sim 1\ 080\ \text{m}$ 和 $y = 1\ 080 \sim 2\ 160\ \text{m}$ 内位移方向相反,在隧道 y 方向从 $-2\ 160 \sim 540\ \text{m}$ 内位移峰值逐渐减小,在 $540 \sim 2\ 160\ \text{m}$ 内位移峰值逐渐增大,呈现出明显的跨断层错动效应。

表 6 本文方法、同震变形场法隧道衬砌 y 方向峰值位移

Tab.6 The method of this study, peak displacements in the y -direction direction of tunnel

单位:m

观测点位置	计算方法	阵列点 y 方向坐标								
		-2 160	-1 620	-1 080	-540	0	540	1 080	1 620	2 160
拱顶	本文方法	0.140	0.129	0.115	0.098	0.081	0.059	-0.040	-0.060	-0.082
	同震变形场法	0.143	0.132	0.117	0.100	0.081	0.060	-0.039	-0.059	-0.082
拱底	本文方法	0.140	0.130	0.115	0.099	0.081	0.060	-0.040	-0.060	-0.082
	同震变形场法	0.143	0.132	0.117	0.100	0.082	0.060	-0.039	-0.059	-0.082

两种方法的 y 方向位移时程,如图 13 和图 14 所示。由图 13 和图 14 可知:位移时程在 y 轴从 $-2\ 160 \sim 1\ 080\ \text{m}$ 内位移时程到达峰值的时间逐渐增加,时间在 $6.1 \sim 6.7\ \text{s}$ 内;从 $1\ 080 \sim 2\ 160\ \text{m}$ 内达到峰值的时间逐

渐减小时间在 $4.0 \sim 4.3\ \text{s}$ 内。在 y 轴 $-2\ 160 \sim 1\ 080\ \text{m}$ 内和 $1\ 080 \sim 2\ 160\ \text{m}$ 内位移方向相反,可以看出以 $1\ 080\ \text{m}$ 处为分界点有明显的跨断层分布,体现了隧道在断层作用下受到断层错动的作用。

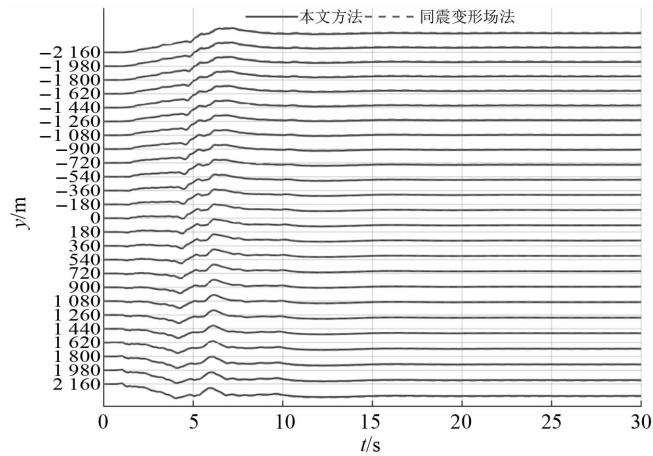


图 13 本文方法、同震变形场法隧道衬砌拱顶 y 方向位移

Fig. 13 The method of this study, co-seismic deformation field method y -direction displacement of tunnel lining arch crown

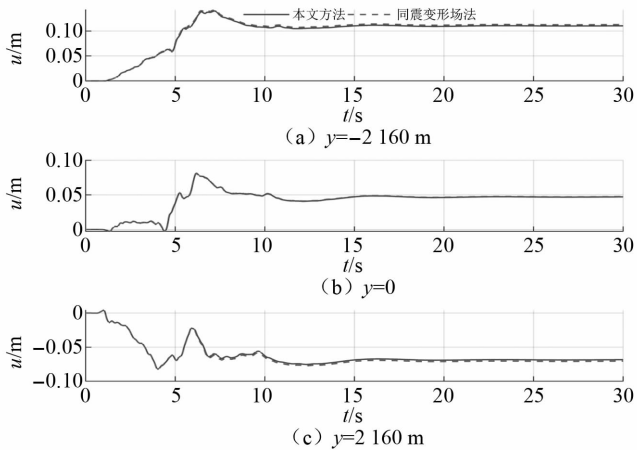


图 14 本文方法、同震变形场法隧道衬砌拱顶 y 方向部分观测点加速度位移

Fig. 14 The method of this study, co-seismic deformation field method of partial observation points y -direction displacement of tunnel lining arch crown

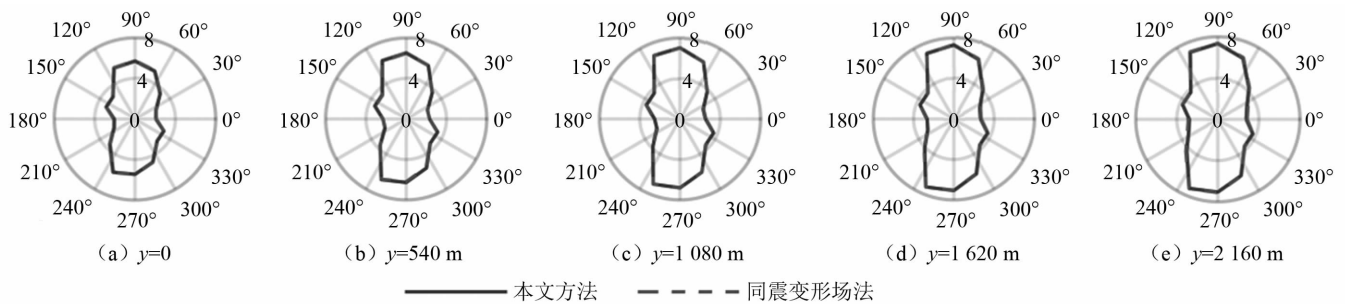


图 15 本文方法、同震变形场法隧道衬砌等效应力

Fig. 15 Equivalent stress of the tunnel for the method in this paper and the same-shake deformation field method

4 结论

本文提出了一种跨断层隧道地震响应分析方法,通过强地震动模拟跨断层地震动,计算土-隧道结构相互作用体系的等效跨断层荷载,实现了跨断层隧道的地震响应分析。本文以自由场模型为例,验证了本文方法的正确性和先进性;再通过一个实际工程,分析了

3.3 隧道衬砌等效应力响应分析

为研究隧道在跨断层错动处的等效应力分布,基于隧道位移结果中峰值位移分布分部,选取 1 080 m 跨断层位置处两侧,即 0 ~ 2 160 m 为研究范围。两种方法在 0 ~ 2 160 m 断层错动区间内隧道衬砌的等效应力,如表 7 所示。由表 7 可知,两种方法在隧道上等效力相差最大约为 4.48%,最大误差主要位于截面 $y=0$ 处。在跨断层截面 $y=1 080$ m 处两种方法等效应力相差最大约为 3.39%。

表 7 本文方法、同震变形场法隧道衬砌等效应力

Tab. 7 Equivalent stress on the tunnel lining

观测点位置	计算方法	阵列点 y 方向坐标/m				
		0	540	1 080	1 620	2 160
拱顶	本文方法/MPa	5.710	6.522	7.031	7.311	7.338
	同震变形场法/MPa	5.454	6.270	6.805	7.071	7.053
拱底	本文方法/MPa	5.743	6.499	7.023	7.340	7.358
	同震变形场法/MPa	5.472	6.203	6.784	7.040	7.100

本文方法、同震变形场法的等效应力玫瑰图,如图 15 所示。由图 15 可知,隧道各截面上的应力分布呈现拱顶和拱底大,拱腰较小的特点。等效应力的峰值在 y 轴从 0 ~ 2 160 m 上逐渐增加,各截面的等效应力主要在拱腰处偏小。因此需要加强关隧道衬砌截面拱顶、拱底、拱肩和拱脚的等效应力对隧道的损伤。从结果中也可以看出,由于胶州湾隧道与断层走向的夹角较小,整个隧道衬砌截面纵向应力分布特征较为接近,对于这种情况,跨断层区域影响范围较大,在实际工程中应引起重视。

跨断层隧道在地震作用下的动力响应。主要结论如下:

- (1) 以一个自由场模型算例,通过对比本文方法和自由场响应,证明了本文提出的方法可以实现断层错动和地震动的耦合作用,适用于跨断层隧道结构的地震响应分析。
- (2) 通过与现有的同震变形场法进行对比,本文提

出的方法在加速度响应的计算上具有显著的优势,证明了本文计算方法在先进性。

(3)在断层错动区内,隧道衬砌有着明显方向相反的相对错动, y 方向最大位移差约为22.20 cm,最大位移差与自由场土层的最大位移差几乎一致,说明本文算例中断层错动-地震动耦合响应在位移响应上影响很小。隧道衬砌上的等效应力分布呈现拱顶和拱底较大,拱腰处较小的规律,拱顶和拱底受拉应力作用较强,为衬砌结构受拉破坏较为严重的区域。由于隧道与断层走向的夹角较小,整个隧道衬砌截面纵向应力分布特征较为接近,跨断层区域影响范围较大,应加以重视。

研究表明,相比于现有方法,本文方法表现出更高的计算精度,在跨断层地震动作用下的隧道结构地震响应有更好的预测能力,为研究隧道、桥梁和管线等跨断层结构的地震响应提供了一种有效工具。在跨断层结构地震响应分析方法较为缺失的现状下可为实际工程的抗震设计提供科学依据和技术支撑。

值得注意的是,本文方法中地震动模拟结果精度的受地质和地形参数精度的影响。目前地震条件的公开数据精度很低,一般约为50 km,这一限制的突破有待地下速度结构探测技术的发展。本文方法的推导中未使用叠加原理,可考虑围岩和隧道弹性和弹塑性的情况,在地质条件和隧道结构类型上没有应用限制。本文使用的方法不仅针对跨断层隧道,还可应用于任何跨断层的工程结构。在工程建设中设置强震观测仪器,以期本方法在未来地震中得到验证。

参考文献

- [1] HAASE D, GÜNERALP B, DAHIYA B, et al. Global urbanization [J]. *The Urban Planet: Knowledge Towards Sustainable Cities*, 2018, 19: 326-339.
- [2] SHARIFI A, KHAVARIAN-GARMSIR A R, ALLAM Z, et al. Progress and prospects in planning: a bibliometric review of literature in urban studies and regional and urban planning, 1956-2022 [J]. *Progress in Planning*, 2023 (7): 100740.
- [3] GOSPODINI A. Urban development, redevelopment and regeneration encouraged by transport infrastructure projects: the case study of 12 European cities [J]. *European Planning Studies*, 2005, 13(7): 1083-1111.
- [4] WANG L Q, XUE X L, ZHAO Z B, et al. The impacts of transportation infrastructure on sustainable development: emerging trends and challenges [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15 (6): 1172.
- [5] TORO LÓPEZ M, SCHEERS J, VAN DEN BROECK P. The socio-politics of the urbanization-transportation nexus: infrastructural projects in the department of Antioquia in Colombia through the lens of technological politics and institutional dynamics [J]. *International Planning Studies*, 2021, 26(3): 321-347.
- [6] LIN X. Transport infrastructure and the interaction of urbanization: with China's three largest cities [C]//7th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2022). Guangzhou: SPIE, 2022.
- [7] WANG W L, WANG T T, SU J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(3): 133-150.
- [8] LI T B. Damage to mountain tunnels related to the Wenchuan earthquake and some suggestions for aseismic tunnel construction [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, 71: 297-308.
- [9] WANG Z Z, ZHANG Z. Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 45: 45-55.
- [10] ZHANG X P, JIANG Y J, SUGIMOTO S. Seismic damage assessment of mountain tunnel: a case study on the Tawarayama tunnel due to the 2016 Kumamoto earthquake [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 138-148.
- [11] 赵密, 邵伟昂, 黄景琦, 等. 圆形隧道横断面地震响应简化解析方法的数值验证 [J]. *工程力学*, 2020, 37(9): 84-93.
ZHAO Mi, SHAO Weiang, HUANG Jingqi, et al. Numerical validation of simplified analytical method for seismic response of circular tunnels [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37 (9): 84-93.
- [12] 刘国钊, 乔亚飞, 何满潮, 等. 活动性断裂带错动下隧道纵向响应的解析解 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 923-932.
LIU Guozhao, QIAO Yafei, HE Manchao, et al. An analytical solution of longitudinal response of tunnels under dislocation of active fault [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 923-932.
- [13] QIAO Y F, TANG J, LIU G Z, et al. Longitudinal mechanical response of tunnels under active normal faulting [J]. *Underground Space*, 2022, 7(4): 662-679.
- [14] 夏雨成, 彭述权. 断层错动作用下穿越断层隧道地震响应特性研究 [J]. *湖南交通科技*, 2022, 48(3): 64-71.
XIA Yucheng, PENG Shuquan. Study on seismic response characteristics of tunnels crossing faults under fault dislocation [J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2022, 48(3): 64-71.
- [15] 赵大能, 王毅, 任志华. 考虑断层错动-地震动共同作用的隧道结构力学响应分析 [J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(4): 95-105.
ZHAO Daneng, WANG Yi, REN Zhihua. Mechanical response analysis for tunnel structure considering the interaction of fault dislocation and seismic motion [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2023, 60(4): 95-105.
- [16] 陈之毅, 郭远鹏. 断层错动和地震动共同作用下跨断层隧道的损伤分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2023(1): 1-6.

- CHEN Zhiyi, GUO Yuanpeng. Analysis of cross fault tunnel damage under combined action of fault dislocation and ground motion[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023(1): 1-6.
- [17] 刘艳琼, 赵纪生, 周正华. 发震断层附近场点的最大永久位移估计[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010(增刊1): 212-219.
- LIU Yanqiong, ZHAO Jisheng, ZHOU Zhenghua. Evaluation on permanent peak displacement near causative faults[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010(Suppl. 1): 212-219.
- [18] LEE V W, TRIFUNAC M D, TODOROVSKA M I, et al. Empirical equation describing attenuation of the peaks of strong motion in terms of magnitude, distance, path effects and site conditions[R]. Los Angeles, CA: University of Southern California, 1995.
- [19] LEE V W, TRIFUNAC M D. Frequency dependent attenuation function and Fourier amplitude spectra of strong earthquake ground motion in California[R]. Los Angeles: University of Southern California, 1995.
- [20] LEE V W, TRIFUNAC M D. Pseudo relative velocity spectra of strong earthquake ground motion in California[R]. Los Angeles: University of Southern California, 1995.
- [21] 郭凯, 赵伯明. 深埋隧道地层工程尺度下同震变形场研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(增刊1): 104-112.
- GUO Kai, ZHAO Boming. Co-seismic deformation field of deep buried tunnel strata at the structural scale[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(Suppl. 1): 104-112.
- [22] 赵天次, 赵伯明, 周玉书, 等. 基于活动断层的地表同震变形及对隧道衬砌损伤的影响[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(4): 107-119.
- ZHAO Tianci, ZHAO Boming, ZHOU Yushu, et al. Co-seismic deformation of ground surface based on active fault and its impact on tunnel lining damage[J]. China Railway Science, 2021, 42(4): 107-119.
- [23] GUO K, ZHAO B M. Deformation intensity distribution and zoning of seismic deformation fields in near-fault areas[J]. Symmetry, 2022, 14(2): 239.
- [24] 赵伯明, 赵天次, 周玉书. 跨活断层隧道抗位错精细化分析方法研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(8): 146-157.
- ZHAO Boming, ZHAO Tianci, ZHOU Yushu. Research on refined analysis method for dislocation resistance of tunnels across active fault[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(8): 146-157.
- [25] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998(3): 55-64.
- LIU Jingbo, LÜ Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 1998(3): 55-64.
- [26] WANG H, LUO C, WAN J Z, et al. A hybrid boundary method for seismic wave propagation problems in slopes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 147:106773.
- [27] 罗超. 河谷地形及土-结构相互作用对大跨度桥梁地震反应的影响[D]. 上海: 同济大学, 2017.
- [28] 廖树超, 于彦彦, 丁海平. 基于 Lamb 问题的谱元法和有限元法模拟精度比较[J]. 世界地震工程, 2018, 34(3): 188-196.
- LIAO Shuchao, YU Yanyan, DING Haiping. Comparison of simulation precision between spectral element method and finite element method based on lamb problem [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(3): 188-196.
- [29] 李春果, 王宏伟, 温瑞智, 等. 2022 年 3 月 16 日日本近海 7.4 级地震地震动场三维有限差分模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(5): 9-17.
- LI Chunguo, WANG Hongwei, WEN Ruizhi, et al. 3D finite-difference numerical simulation of ground motion in Japan Namie $M7.4$ earthquake, March 16, 2022 [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 42(5): 9-17.
- [30] 赵靖轩, 巴振宁, 阎晨阳, 等. 2022 年 9 月 5 日泸定 M_s 6.8 地震宽频带地震动谱元法模拟[J]. 地震学报, 2023, 45(2): 179-195.
- ZHAO Jingxuan, BA Zhenning, KUO Chenyang, et al. Broadband ground motion simulations applied to the Luding M_s 6.8 earthquake on September 5, 2022 based on spectral element method [J]. Acta Seismologica Sinica, 2023, 45(2): 179-195.
- [31] 盛兆琦, 胡进军, 谢礼立. 跨断层工程输入地震动模拟及其应用研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(1): 1-13.
- SHENG Zhaoqi, HU Jinjun, XIE Lili. Review on the simulation of input ground motion for fault-crossing structure and its application [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2023, 43(1): 1-13.
- [32] 孙晓丹, 陶夏新. 宽频带地震动混合模拟方法综述[J]. 地震学报, 2012, 34(4): 571-577.
- SUN Xiaodan, TAO Xiaxin. Hybrid simulation of broadband ground motion: overview [J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(4): 571-577.
- [33] 党鹏飞, 刘启方, 王冲, 等. 地震动随机有限断层模拟方法综述[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(6): 131-139.
- DANG Pengfei, LIU Qifang, WANG Chong, et al. Review on the stochastic finite-fault ground motion simulation method [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 40(6): 131-139.
- [34] 柳国环, 冯啸. 跨越 V 形峡谷的桥梁抗震分析: 多水平成层非均匀介质 V 形场地多点地震动模拟[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2017, 30(12): 150-158.
- LIU Guohuan, FENG Xiao. Dynamic deformation and failure characteristic of deep buried tunnel crossing fault under far-field earthquake loading [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2017, 30(12): 150-158.
- [35] 巴振宁, 刘悦, 赵靖轩, 等. 2021 年漾濞 6.4 级近断层宽频地震动模拟: 一种改进的 FK 方法[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 709-719.
- BA Zhenning, LIU Yue, ZHAO Jingxuan, et al. Near-fault broadband ground-motion simulation of 2021 Yangbi $M6.4$ earthquake: an improved FK method [J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2023,45(4): 709-719.
- [36] 巴振宁, 鲁世斌, 付继赛, 等. 基于 FK-FE 混合方法的位错点源作用下全过程结构地震反应模拟[J]. 工程力学, 2024,41(4): 1-15.
BA Zhenning, LU Shibin, FU Jisai, et al. End-to-end structural seismic response simulation under action of seismic dislocation upon FK-FE hybrid method [J]. Engineering Mechanics, 2024,41(4): 1-15.
- [37] GRAVES R, PITARKA A. Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100 (5A): 2095-2123.
- [38] GRAVES R, PITARKA A. Refinements to the Graves and Pitarka (2010) broadband ground-motion simulation method [J]. Seismological Research Letters, 2015,86(1):1-6.
- [39] GRAVES R, PITARKA A. Kinematic ground-motion simulations on rough faults including effects of 3D stochastic velocity perturbations [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016,106(5): 2136-2153.
- [40] ZHANG W Q, ZHANG Z G, LI M Y, et al. GPU implementation of curved-grid finite-difference modelling for non-planar rupture dynamics [J]. Geophysical Journal International, 2020,222(3): 2121-2135.
- [41] PETERSSON N A, SJÖGREEN B. SW4, version 2.0[R]. Davis, CA:Computational Infrastructure of Geodynamics,2017.
- [42] PETERSSON N A, SJÖGREEN B. User's guide to SW4, version 2.0; LLNL-SM-741439 [R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2017.
- [43] PETERSSON N A, SJÖGREEN B. High order accurate finite difference modeling of seismo-acoustic wave propagation in a moving atmosphere and a heterogeneous earth model coupled across a realistic topography [J]. Journal of Scientific Computing, 2018,74(1): 290-323.
- [44] SJÖGREEN B, PETERSSON N A. A fourth order accurate finite difference scheme for the elastic wave equation in second order formulation [J]. Journal of Scientific Computing, 2012,52(1): 17-48.
- [45] 栾光忠, 王红霞, 尹明泉, 等. 青岛城市主要断裂构造特征以及对城市地质环境的影响[J]. 地球学报, 2010,31(1): 102-108.
LUAN Guangzhong, WANG Hongxia, YIN Mingquan, et al. Characteristics of main faulted structures in qingdao city and their influence on urban geological environment [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010,31(1): 102-108.
- [46] WELLS 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.
- [47] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The shuttle radar topography mission [J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45 (2): G2004.
- [48] HAN S C, ZHANG H J, XIN H L, et al. USTClitho2. 0: updated unified seismic tomography models for continental China lithosphere from joint inversion of body-wave arrival times and surface-wave dispersion data [J]. Seismological Society of America, 2021,93(1): 201-215.
- [49] LASKE G, MASTERS G, MA Z, et al. Update on CRUST1.0--A1-degree global model of Earth's crust [J]. Geophysical Research Abstracts, 2013,15: 2658.
- [50] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99 (5): 421-427.