

跨断层水工隧洞地震响应数值模拟分析方法

刘国庆¹, 肖明^{1†}, 杨阳², 任俊卿¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 断层破碎带是影响高地震烈度区隧洞结构稳定的关键因素之一. 针对地震作用下围岩与断层动力相互作用特点, 建立了一种考虑多种接触状态的动接触力算法. 该算法考虑了有限元模型中的点对接触和点面接触两种接触类型, 可以模拟围岩与断层之间的黏结接触、静接触、分离和滑动接触4种接触状态, 适合研究地震作用下围岩与断层动接触系统的非线性大滑移问题. 首先, 通过一滑块算例, 验证了该算法的合理性. 然后将此算法应用于滇中引水工程香炉山隧洞抗震稳定计算, 对比分析了无断层, 有断层、不考虑动接触, 有断层、考虑动接触3种工况对隧洞地震响应的影响. 结果表明, 断层破碎带的存在加剧了隧洞的地震反应, 主要表现为衬砌位移和应力的增加, 以及围岩破坏区的扩大; 考虑动接触后, 围岩与断层在地震加载过程中, 出现了明显的错动位移, 进而对衬砌产生破坏作用; 衬砌损伤区主要分布于断层穿过的部位及断层两侧约10 m范围内, 其中上盘衬砌受断层影响较大; 在横向地震动激励下, 衬砌腰拱的应力和位移明显大于顶拱和底拱, 为衬砌结构的薄弱部位.

关键词: 水工隧洞; 地质断层; 动接触力法; 显示积分; 衬砌结构; 地震响应

中图分类号: TU45

文献标志码: A

Numerical Simulation and Analysis Method of Seismic Response for Hydraulic Tunnel across Fault

LIU Guoqing¹, XIAO Ming^{1†}, YANG Yang², REN Junqing¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The fault fracture zone is one of the key influencing factors on the structural stability of a tunnel in high earthquake-intensity area. Aimed at dynamic interaction characteristics between surrounding rock and fault under seismic action, a dynamic contact force method considering various contact states was established. The method considers point-to-point contact and point-to-surface contact in finite element model, and it can simulate four contact states between the rock and fault: bonded contact, static contact, separation and sliding contact. Therefore, it is suitable to study the nonlinear large slip problem of dynamic contact system composed of the rock and fault under seismic load. First, the rationality of the method was verified by a sliding block example. Then, the method was applied to the anti-seismic stability calculation of Xianguoshan tunnel in Dianzhong water diversion project. The influ-

* 收稿日期: 2017-08-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB057904), National Key Basic Research and Development Program(973 Program)(2015CB057904); 国家自然科学基金资助项目(51579191), National Natural Science Foundation of China(51579191)

作者简介: 刘国庆(1989—), 男, 湖北随州人, 武汉大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: mxiao@whu.edu.cn

ences of three working conditions on seismic response of the tunnel were contrastively analyzed: without fault, with fault but without dynamic contact, and with fault and dynamic contact. The results indicate that the existence of fault fracture zone aggravates the seismic reaction of the tunnel, which mainly appears as displacement and stress increase of the lining as well as failure zone enlargement of the rock. When considering the dynamic contact, the evident alternate displacement forms between the rock and fault during seismic loading procedure, and then exerts destructive effects on the lining. The damage zone of the lining mainly distributes in the place where the fault passes through and within about 10 m range of distance from both sides of the fault, and the lining in hanging wall is greatly affected by the fault. Under the motivation of horizontal seismic motion, the stress and displacement of the lining haunch are significantly larger than that of the top and bottom arch, so that the haunch is considered as the weak part of the lining structure.

Key words:hydraulic tunnel; geological fault; dynamic contact force method; explicit integration; lining structure; seismic response

我国水资源蕴藏量丰富,但由于空间地理位置的差异,水资源分布极不均匀。全国水电能源总量的 75%集中于西南高山峡谷地区,在此区域已规划建设了一大批水利水电工程,从而形成了为数众多的地下水工隧洞群。此外,为实现水资源优化配置,一批长距离、跨流域引水调水工程,如滇中引水、南水北调、引江济淮等工程已逐步或即将兴建。水工隧洞一般延伸较长,沿线地质条件复杂,常常不可避免地要穿越断层破碎带和高地震烈度区,面临突出的抗震稳定问题^[1-4]。“5.12”汶川大地震表明,隧洞震害多发生在围岩条件差和地层有较大变化等地质条件较复杂的部位^[5-7],因而断层破碎带是隧洞结构抗震的薄弱环节。工程实践表明,地震一旦发生,围岩极易与断层发生相对错动,进而对衬砌结构造成不可恢复的损伤破坏,影响隧洞的正常运行。因此,研究跨断层水工隧洞地震响应特性与破坏机理对保证工程的安全运行具有重要意义。

针对穿越断层破碎带隧洞的地震响应特性及抗震稳定问题,已有一定的研究成果。李林等^[8]采用实体单元与结构面单元组合的方法模拟断层,研究了某穿越断裂带隧道的动力响应特性。耿萍等^[9]通过数值模拟与振动台试验相结合的方法,分析了地震作用下穿越断裂带隧道衬砌的横向和纵向内力分布。何川等^[10]通过震害调查、振动台试验及数值计算研究了穿越断裂带隧道的震害特征和震害机理。王峥峥^[11]基于建立的无限元静-动力统一人工边界,对跨断层隧道的非线性地震损伤特性进行了分析。跨断层隧洞抗震问题的数值模拟研究,关键在于建立合理的围岩与断层动力相互作用分析模型,目前关

于这方面的研究较少,且水工隧洞大多深埋于地下,而目前的研究多是针对浅埋隧洞。

围岩与断层动力相互作用属于典型的动接触问题。目前动接触问题的数值算法主要有 Lagrange 乘子法、罚方法、线性补偿法、接触单元法及动接触力法等^[12],其中动接触力法以其稳定性和精度良好、计算效率高而被研究者青睐^[13]。但该方法在处理离散模型之间的接触方式时,主要采用了点对点接触类型,不适合研究大滑移接触问题,且忽略了接触体之间的黏聚力。

本文以刘晶波等^[14-15]提出的动接触力法为基础,针对围岩与断层循环往复相互作用特点,建立了一种考虑多种接触状态的动接触力算法。该算法通过引入点面接触类型,考虑了接触体之间的黏聚力,可以模拟围岩与断层之间的大滑移现象。以滇中引水工程香炉山隧洞为实例,分析了断层破碎带对隧洞地震响应的影响,期望对深埋水工隧洞抗震设计提供有益的参考。

1 围岩与断层接触系统动力响应分析

1.1 动接触力法的显示有限元积分格式

围岩动力接触系统经有限元离散后,可得到包含动接触力的节点运动微分方程:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F + R \quad (1)$$

式中: M 、 C 和 K 分别为接触节点质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{u} 、 \dot{u} 和 u 分别为节点加速度、速度和位移向量; F 为外荷载向量; R 为动接触力向量,且 $R = N +$

T, N 和 T 分别为 R 的法向和切向分量。

采用中心差分法离散式(1),一般积分格式为:

$$\dot{u}^t = \frac{1}{2\Delta t}(u^{t+\Delta t} - u^{t-\Delta t}) \quad (2)$$

$$\ddot{u}^t = \frac{1}{\Delta t^2}(u^{t+\Delta t} - 2u^t + u^{t-\Delta t}) \quad (3)$$

式中: t 为时间; Δt 为时步长。

联立式(2)和式(3),得:

$$\ddot{u}^t = \frac{2}{\Delta t^2}(u^{t+\Delta t} - u^t - \Delta t \dot{u}^t) \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)在 t 时刻的表达式,得:

$$u^{t+\Delta t} = \bar{u}^{t+\Delta t} + \Delta u^{t+\Delta t} \quad (5)$$

式中: $\bar{u}^{t+\Delta t}$ 为不考虑动接触力的节点位移向量,由式(6)计算; $\Delta u^{t+\Delta t}$ 为由动接触力引起的附加位移场向量,由式(7)计算。

$$\bar{u}^{t+\Delta t} = \frac{\Delta t^2}{2} M^{-1} F^t + (I - \frac{\Delta t^2}{2} M^{-1} K) u^t + (\Delta t I - \frac{\Delta t^2}{2} M^{-1} C) \dot{u}^t \quad (6)$$

$$\Delta u^{t+\Delta t} = \frac{\Delta t^2}{2} M^{-1} R^t \quad (7)$$

基于 Newmark 常平均加速度法的基本假定,得 $t + \Delta t$ 时刻的速度和加速度递推公式:

$$\dot{u}^{t+\Delta t} = \frac{2(u^{t+\Delta t} - u^t)}{\Delta t} - \dot{u}^t \quad (8)$$

$$\ddot{u}^{t+\Delta t} = \frac{2(\dot{u}^{t+\Delta t} - \dot{u}^t)}{\Delta t} - \ddot{u}^t \quad (9)$$

从上述有限元积分格式可以看出, $t + \Delta t$ 时刻接触节点运动状态可由 t 时刻的运动状态和动接触力求出,而 t 时刻接触节点的运动状态是已知的,动接触力 R^t 是未知的, R^t 需根据 $t \sim t + \Delta t$ 时刻的接触状态计算。

1.2 考虑多种接触状态的动接触力计算

假定地震荷载施加前,围岩与断层接触面胶结良好,即接触节点对处于黏结接触状态;地震加载过程中,围岩与断层可能发生较大的相对滑动,此时接触节点与其对应的单元某一面发生接触。前者称之为点对点接触,需要考虑接触面黏聚力,后者称为点面接触,不再考虑黏聚力。两种情况下接触面法向极限抗拉力 P_N 和切向极限剪切力 P_T 分别由式(10)和式(11)计算:

$$P_N = cA, P_T = \mu_s \| N \| + cA \quad (10)$$

$$P_N = 0, P_T = \mu_s \| N \| \quad (11)$$

式中: μ_s 为接触面静摩擦系数; A 为接触节点对的控制面积; c 为接触面黏聚力。对于点对点接触,若 t 时刻接触节点对处于滑动接触或分离状态,则 t 时刻及以后所有时刻对处于再接触状态的节点对, c 值

取 0。

1.2.1 点对点接触类型下动接触力计算

点对点接触类型下,认为接触节点对在地震作用下未发生相对滑移或滑移量较小。对任意一节点对 l 和 l' ,在 $t + \Delta t$ 时刻应满足变形协调条件,即法向互不嵌入条件和切向无相对滑移条件:

$$n_l^T (u_{l'}^{t+\Delta t} - u_l^{t+\Delta t}) = 0 \quad (12)$$

$$t_l^T (u_{l'}^{t+\Delta t} - u_l^{t+\Delta t}) = t_l^T (u_{l'}^t - u_l^t) \quad (13)$$

式中: n_l 为接触节点对的单位法向矢量,由节点 l' 指向 l ; t_l 为对应的单位切向矢量。

记 $\Delta u = n_l^T (\bar{u}_{l'}^{t+\Delta t} - \bar{u}_l^{t+\Delta t})$,联立式(5)和式(12),得:

$$\Delta u = n_l^T (\Delta u_l^{t+\Delta t} - \Delta u_{l'}^{t+\Delta t}) \quad (14)$$

记 $\Delta_{2l} = t_l^T [(\bar{u}_{l'}^{t+\Delta t} - \bar{u}_l^{t+\Delta t}) - (u_{l'}^t - u_l^t)]$,联立式(5)和式(13),得:

$$\Delta_{2l} = t_l^T (\Delta u_l^{t+\Delta t} - \Delta u_{l'}^{t+\Delta t}) \quad (15)$$

将式(7)代入式(14)和式(15),并根据 $R_l^i = -R_{l'}^i$,得:

$$N_l^i = \frac{2M_l M_{l'}}{(M_l + M_{l'}) \Delta t^2} \Delta_{1l} n_{li} \quad (16)$$

$$T_l^i = \frac{2M_l M_{l'}}{(M_l + M_{l'}) \Delta t^2} \Delta_{2l} t_{li} \quad (17)$$

式中: M_l 和 $M_{l'}$ 分别为节点 l 和 l' 的集中质量。

1.2.2 点面接触类型下动接触力计算

点面接触类型下,认为接触节点对在地震作用下发生了较大的相对滑动。记接触节点 l 在与之对应的接触面上接触点为 l' , l' 所在单元记为 B , l' 的位移场由有限元形函数插值而得:

$$u_{l'}^t = \sum_{j=1}^k \phi_j u_j^t, u_{l'}^{t+\Delta t} = \sum_{j=1}^k \phi_j u_j^{t+\Delta t} \quad (18)$$

式中: k 为单元 B 的节点数; ϕ_j 为该单元节点 j 的形函数在接触点 l' 的取值。

接触点 l' 的等效集中质量 $M_{l'}$ 由式(19)和式(20)计算^[16]:

$$m_j = \phi_j M_j / \sum_{i=1}^k \phi_i^2 \quad (19)$$

$$M_{l'} = \sum_{j=1}^k m_j \quad (20)$$

式中: M_j 为节点 j 的集中质量; m_j 为节点 j 在接触点 l' 的质量贡献。

假定 $t + \Delta t$ 时刻节点 l 与接触点 l' 处于静接触状态,根据接触点对法向互不嵌入条件和切向无相对滑移条件,并由 $R_l^i = -R_{l'}^i$,同样可求得节点 l 形如式(16)和式(17)的动接触力表达式。

单元 B 中各节点动接触力可按其对接触点 l' 总质量的贡献进行分配,即:

$$R_j^i = \frac{m_{l'}}{M_T} R_l^i \quad (21)$$

1.2.3 基于接触状态的动接触力修正

点对接触和点面接触类型下,式(16)和式(17)动接触力 N_l^i 和 T_l^i 的计算表达式分别是基于接触点对处于黏结接触或静接触状态的假定而得,但是动力加载过程中,接触点对还可能出现其他不同的接触状态.因此每一时步计算完毕后,需对接触点对的接触状态进行判别,并对动接触力进行修正,具体方法如下:

1)若 $\Delta_{ul} < 0$,表明接触点对有互相分离的趋势,并作如下分析:

①若 $\|N_l^i\| < P_N$,则接触点对处于黏结接触(静接触)状态;

②若 $\|N_l^i\| > P_N$,则接触点对处于分离状态,此时:

$$N_l^i = 0, T_l^i = 0 \quad (22)$$

2)若 $\Delta_{ul} > 0$,表明接触点对有互相嵌入的趋势,并作如下分析:

①若 $\|T_l^i\| < P_T$,则接触点对处于黏结接触(静接触)状态;

②若 $\|T_l^i\| > P_T$,则接触点对处于滑动接触状态,此时:

$$T_l^i = \mu_d \|N_l^i\| t_l \quad (23)$$

式中: μ_d 为接触面动摩擦系数.

接触点对由黏结接触(静接触)状态到滑动接触状态的转变必然带来切向接触力方向的改变,且该方向与接触点对的相对运动方向相反,于是引入接触点对的相对速度方向来判定^[17]:

设 $\tilde{u}_i^{t+\Delta t}$ 为考虑动接触力时接触节点的初步校核速度,若 $(\tilde{u}_l^{t+\Delta t} - \tilde{u}_i^{t+\Delta t})^T (\dot{u}_l^t - \dot{u}_i^t) \geq 0$,则切向接触力方向由 $\dot{u}_l^t - \dot{u}_i^t$ 确定;反之,分两种情况讨论:若 $\|\tilde{u}_l^{t+\Delta t} - \tilde{u}_i^{t+\Delta t}\| \geq \|\dot{u}_l^t - \dot{u}_i^t\|$,则切向接触力方向由 $\tilde{u}_l^{t+\Delta t} - \tilde{u}_i^{t+\Delta t}$ 确定;反之,由 $\dot{u}_l^t - \dot{u}_i^t$ 确定.

1.3 动接触力的基本计算步骤

地震荷载施加前,首先基于节点分离技术^[18],设置断层和围岩一一对应的接触节点对,以实现有限元模型的不连续化;地震加载过程中,部分接触节点可能突破黏聚力进入滑动状态,此时需要通过接触搜索确定与这些节点相互接触的单元及其单元面.

$t + \Delta t$ 时刻动力接触系统显示有限元计算一般

步骤为:

1)不考虑动接触力,由式(6)计算所有接触节点的位移 $\bar{u}^{t+\Delta t}$.

2)通过接触搜索,确定接触类型(点对接触或点面接触).

3)计算接触间隙 Δ_{u1} 和 Δ_{u2} ,由式(16)和式(17)计算动接触力 N_l^i 和 T_l^i .

4)判别接触状态,并修正动接触力.

5)由式(7)计算附加位移场 $\Delta u^{t+\Delta t}$,由式(5)计算接触节点的总位移 $u^{t+\Delta t}$.

6)更新模型几何信息.

2 算例验证

为验证本文动接触力算法的合理性,选取文献[17]中的一滑块模型算例来予以说明,如图 1 所示.滑块和斜坡均为线弹性体,物理力学参数取值见表 1.斜坡底端固定,坡高 5 m,坡角 30°,滑块大小 0.2 m × 0.2 m × 0.1 m,考虑滑块自重.滑块由坡底以初速度 $\dot{u} = 12$ m/s 沿斜坡向上运动,不计滑块与斜坡之间的黏聚力,此时滑块与斜坡处于滑动接触状态.考虑到滑块滑到顶端后可能向下运动或者静止,滑面摩擦系数分别取 $\mu = 0.4$ 和 $\mu = 0.8$,近似认为静、动摩擦系数相等.

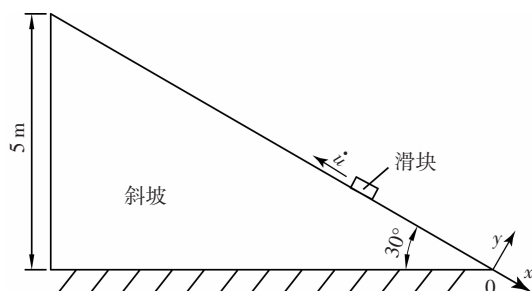


图 1 滑块模型

Fig.1 Sliding block model

表 1 物理力学参数

Tab.1 Physico-mechanical parameters

类别	弹性模量/kPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
滑块	1.0	0.3	2.0
斜坡	3.0 × 10 ⁴	0.3	2.0 × 10 ⁴

将滑块和斜坡用有限元进行离散,滑块在滑动过程中会产生动接触力,在数值模拟时,每一时步均要进行接触搜索.采用本文方法计算得到的滑块速

度和位移时程结果与理论解比较如图 2、图 3 所示.对于 $\mu = 0.4$ 和 $\mu = 0.8$, 滑块的速度和位移时程数值计算结果与理论解均吻合较好, 这表明本文动接触力法是可行的, 适合用于模拟接触系统不同的接触状态, 且具有较高的计算精度.

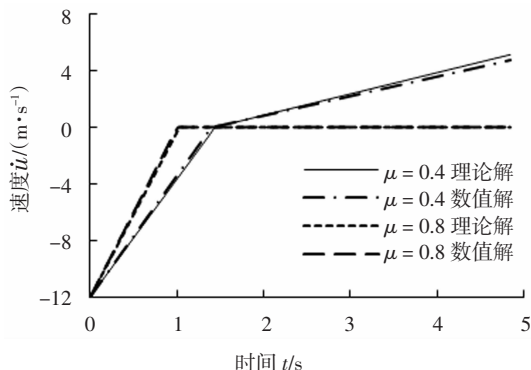


图 2 滑块速度时程曲线

Fig.2 Speed time-history curves of sliding block

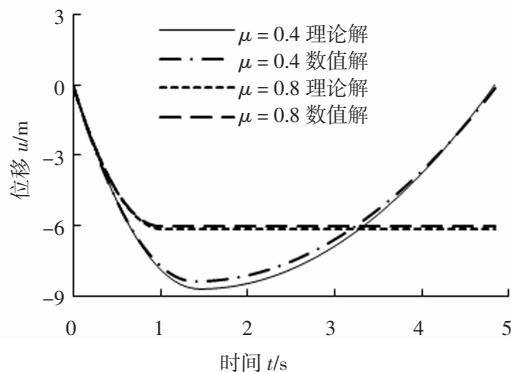


图 3 滑块位移时程曲线

Fig.3 Displacement time-history curves of sliding block

3 工程实例

3.1 计算模型与参数

滇中引水工程是从金沙江上游石鼓河段取水, 以解决滇中区水资源短缺问题的特大型跨流域引(调)水工程, 输水总干渠顺地势由高至低, 向大理、楚雄、昆明、玉溪和红河供水. 大理 I 段渠首建筑物以隧洞型式穿越金沙江与澜沧江分水岭, 称为香炉山隧洞.

香炉山隧洞地质条件复杂, 沿线发育多条大断层, 与线路大多呈中等角度及大角度相交. 该区域表现为强烈的现今地震活动性, 发生多次 6.0 级以上地震. 根据云南省地震工程勘察院研究成果, 香炉山隧洞区 50 年超越概率 10% 水平向地震动峰值加速

度为 0.2 ~ 0.3g, 对应的地震基本烈度为 VIII 度. 隧洞全长 63.426 km, 埋深一般超过 300 m.

本文选取某段埋深 400 m, 含有一条断层破碎带的隧洞区域进行分析. 隧洞开挖断面为圆形, 洞径 9.8 m, 设计水深 6.38 m, 围岩以 IV 类为主. 衬砌采用 C30 钢筋混凝土结构, 厚 55 cm.

鉴于隧洞埋深较大, 在建立三维有限元模型时, 若建至地表, 则单元数量过于庞大, 动力计算耗时多. 因此, 为了提高计算效率, 隧洞顶部只取 55 m. 设置断层为正断层, 走向与洞轴线垂直, 倾角为 60°, 厚度为 20 m. 有限元模型共剖分了 121 920 个八节点六面体单元和 127 917 个节点, 其中衬砌单元 8 640 个, 如图 4 所示. 模型 x 轴沿水平向与洞轴线垂直, y 轴与洞轴线重合, z 轴与大地坐标一致, 3 个方向计算范围分别为 120 m、160 m 和 120 m.

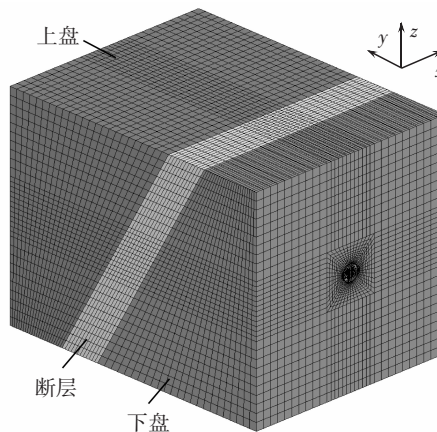


图 4 隧洞三维有限元模型

Fig.4 3D FE model of tunnel

综合分析地应力测试结果, 侧压力系数取 $k_x = 1.2$, $k_y = 0.74$, $k_z = 1.0$. 围岩、衬砌和断层力学参数取值见表 2, 围岩与断层接触面的黏聚力取二者的均值, 静动摩擦系数均取 0.53.

表 2 材料力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of materials

类别	变形模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa
围岩	5.0	0.29	0.6	35.0	2.7	1.3
衬砌	30.0	0.17	2.0	46.0	2.5	1.43
断层	0.3	0.33	0.1	24.2	2.0	0.5

3.2 计算条件

计算程序采用自主开发的大型地下洞室地震灾变过程数值模拟分析平台^[9], 并将本文动接触力法

嵌入其中.围岩和衬砌采用基于 Mohr-Coulomb 屈服准则的弹塑性损伤动力本构模型,表示如下:

$$\begin{cases} f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2T_c(\dot{\varepsilon})\sqrt{N_\varphi} \\ f^t = \sigma_3 - \sigma^t \end{cases} \quad (24)$$

式中: $f^s = 0$ 为剪切屈服准则, $f^t = 0$ 为拉伸屈服准则; σ_1, σ_3 分别为材料损伤后的最小、最大主应力; σ^t 为抗拉强度; N_φ 为与内摩擦角 φ 有关的参数; $c(\dot{\varepsilon})$ 为与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 相关的黏聚力; T 为损伤影响系数,且 $T = 1 - D$, D 为损伤系数,表示为:

$$D = \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2} \quad (25)$$

式中: D_1, D_2, D_3 分别为 3 个主应力方向的损伤系数,由损伤演化方程求得:

$$D_i = 1 - \exp(-R\sqrt{\varepsilon_i^p \varepsilon_i^p}) \quad (26)$$

式中: ε_i^p 为第 i 个主应变方向的塑性偏应变; R 为损伤常数.

模型两侧采用自由场人工边界以减少地震波在边界的反射,底部采用黏弹性人工边界以吸收入射波,顶部采用黏弹性人工边界,并考虑无限域地震波的传播和在地表自由面的反射^[20].

地震波选用日本阪神 Kobe 波,并截取其中地震动较为强烈的 15 s 段作为入射波.根据香炉山隧洞区抗震设防烈度,将入射波峰值加速度调整为 $0.3g$,然后经滤波、基线校正和幅值折减处理后得到如图 5 所示的加速度时程曲线.地震波由模型底部垂直入射,考虑 x 方向的横向激励作用.

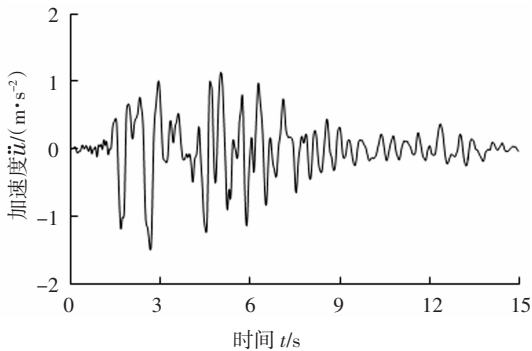


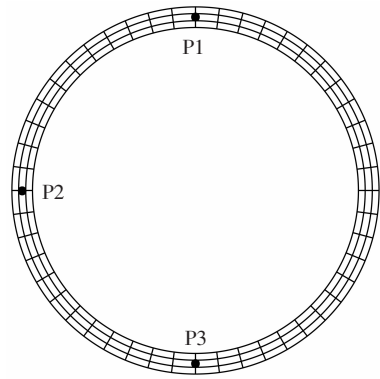
图 5 入射波加速度时程曲线

Fig.5 Acceleration time-history curve of input wave

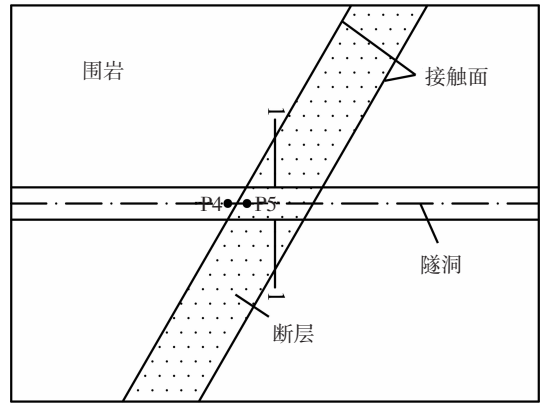
为研究隧洞结构不同部位地震动响应时程特性,布置了如图 6 所示的监测方案,共计 5 个监测点.其中, P1 ~ P3 位于监测断面 1-1 上衬砌的顶拱、腰拱和底拱部位,用于监测衬砌的应力、位移特征; P4 和 P5 位于上盘围岩和接触面附近断层内,用以监测围岩与断层的相对位移特征.

计算分 3 种工况:①不考虑断层;②考虑断层,

不考虑动接触;③考虑断层,且考虑动接触.



(a)衬砌监测点布置



(b)围岩与断层监测点布置

图 6 监测方案

Fig.6 Monitoring schemes

3.3 结果分析

3.3.1 围岩破坏区分布

地震循环作用下,围岩应力处于不断调整状态,塑性变形逐步累积,使得围岩破坏区逐渐增加.从震后 3 种工况下洞周围岩破坏区分布来看(见图 7),当不考虑断层时,围岩破坏区分布较少,塑性区深度为 1.05 m,开裂区深度为 0.30 m.考虑断层后,断层破碎带穿过的部位破坏区显著增大,塑性区深度达到 4.52 m,开裂区深度达到 1.05 m,表明断层的存在极大削弱了围岩稳定性,可能导致隧洞局部失稳破坏.考虑围岩与断层的动接触相互作用后,接触面附近洞周破坏区进一步发展,破碎带内塑性区深度增加了 1.03 m,开裂区深度增加了 0.48 m,表明围岩与断层的动力相互作用加剧了围岩的地震响应.

3.3.2 围岩与断层相对位移分析

从 3 种工况下围岩与断层相对位移时程来看(见图 8),当不考虑断层时,围岩相对位移为零;考虑断层后,围岩相对位移在零线上下波动起伏变化,

最大相对位移为 1.14 cm,震后基本为零;考虑动接触后,围岩与断层出现了明显的错动位移,6.0 s 之后,该位移值基本在-4.40 cm 上下波动变化,表明地震作用下围岩与断层震动不同步,出现了相对滑动,震后接触面处于滑动状态。

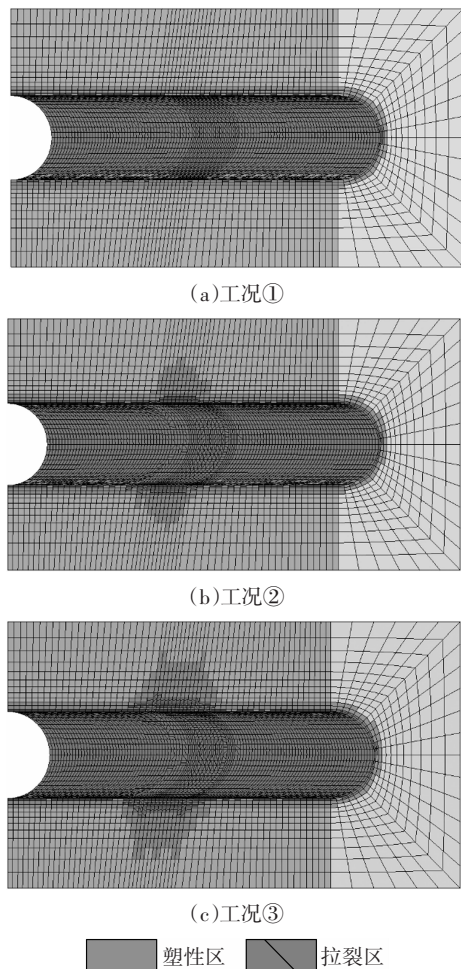


图7 震后围岩破坏区分布

Fig.7 Failure zone distribution of surrounding rock after earthquake

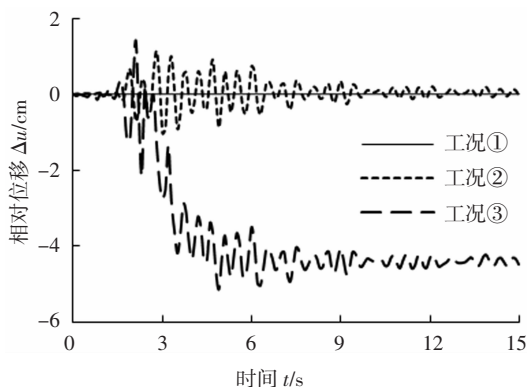


图8 P4 与 P5 相对位移时程

Fig.8 Relative displacement time-history of P4 and P5

3.3.3 衬砌位移分析

3 种工况下衬砌结构监测点 x 向位移时程如图 9 所示.3 种工况下衬砌顶拱、腰拱和底拱位移时程曲线规律均基本一致,表明衬砌各部位处于同步震动状态;受横向地震动影响,衬砌腰拱最大位移要比顶拱和底拱大。

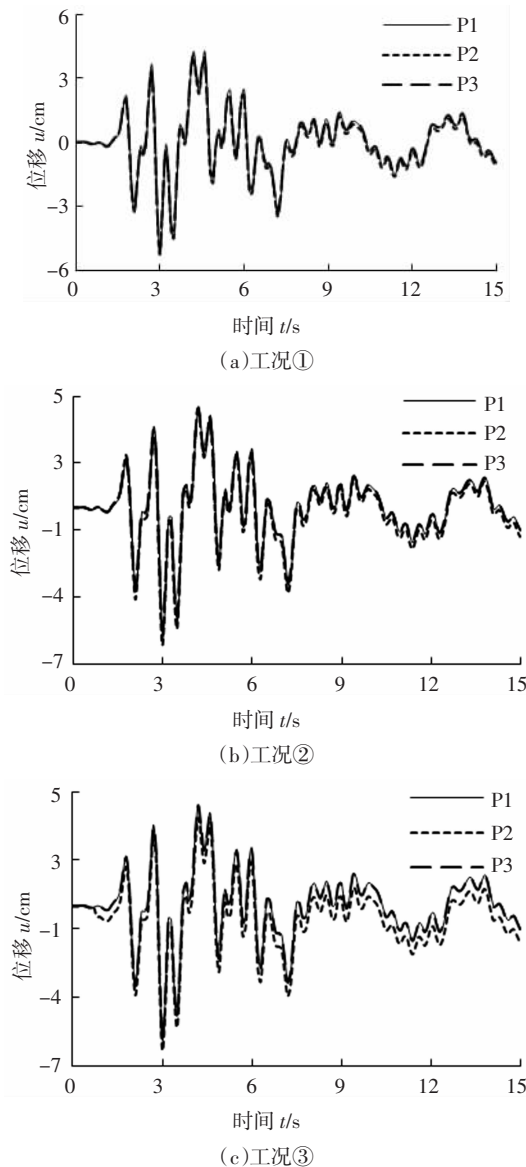


图9 衬砌监测点位移时程

Fig.9 Displacement time-history of monitoring points of lining

当不考虑断层时,衬砌各监测点最大位移为-5.26 cm,腰拱相比顶拱和底拱最大位移差为-0.16 cm;考虑断层后,各监测点最大位移为-6.16 cm,腰拱最大位移差为-0.33 cm,表明衬砌位移受断层影响较大,断层岩体条件越差,衬砌位移响应越大;考虑动接触后,各监测点最大位移为-6.31 cm,腰拱最

大位移差达到-0.64 cm,表明围岩与断层的剪切滑动导致衬砌腰拱产生了较大的相对变形。

3.3.4 衬砌应力与损伤分析

鉴于混凝土的抗压强度远大于其抗拉强度,地震作用下衬砌结构的损伤破坏主要是以拉裂为主^[21],因此仅分析衬砌最大主应力变化规律.3 种工况下衬砌监测点最大主应力时程如图 10 所示.3 种工况下衬砌顶拱、腰拱和底拱最大主应力时程曲线规律基本一致,均表现为前 1.5 s 缓慢增加,1.5 ~ 6.0 s 变化剧烈,6.0 s 以后变化不大;受横向地震动影响,衬砌腰拱拉应力量值要比顶拱和底拱大。

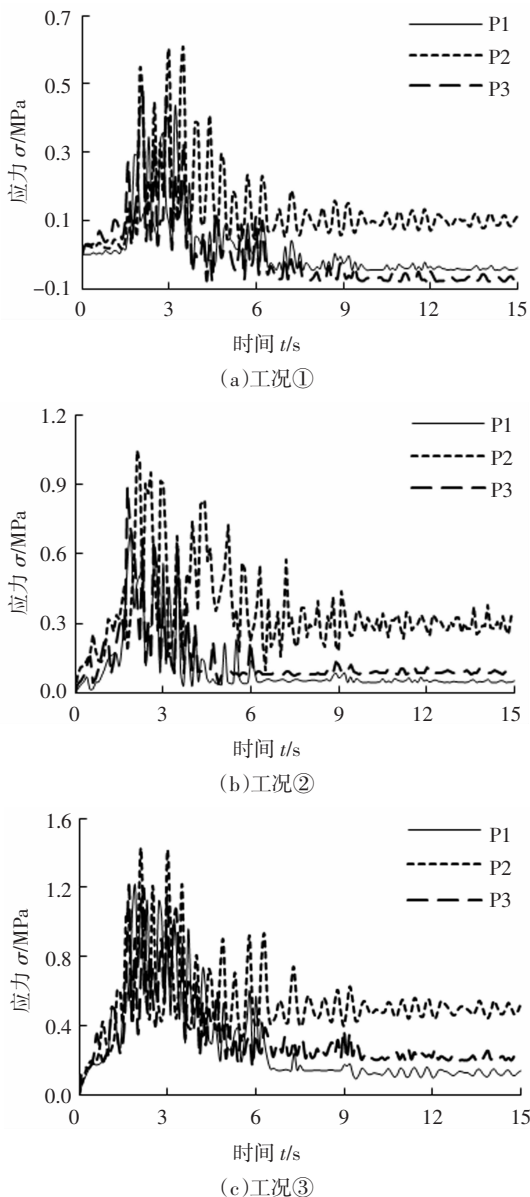


图 10 衬砌监测点最大主应力时程
 Fig.10 Maximum principal stress time-history of monitoring points of lining

当不考虑断层时,衬砌顶拱、腰拱和底拱最大拉

应力分别为 0.43 MPa、0.60 MPa、0.47 MPa;考虑断层后,三者最大拉应力分别为 0.68 MPa、1.05 MPa、0.88 MPa;考虑动接触后,三者最大拉应力分别为 1.21 MPa、1.43 MPa、1.22 MPa,其中腰拱最大拉应力达到了混凝土抗拉强度.这表明断层穿过的部位衬砌应力响应较大,围岩与断层相对滑动对衬砌受力有重要影响,可能导致衬砌开裂破坏,影响其正常运行。

考虑动接触后,震后衬砌结构损伤系数分布如图 11 所示.衬砌损伤区主要分布于断层穿过的部位及断层两侧约 10 m 范围内,其中上盘与断层接触面附近衬砌损伤较严重,受横向地震动影响,衬砌腰拱损伤最严重。

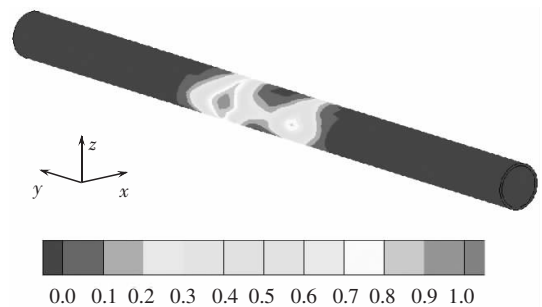


图 11 震后衬砌损伤系数分布
 Fig.11 Damage coefficient distribution of lining after earthquake

4 结 论

1)文中建立的动接触力算法充分考虑了围岩与断层动力相互作用特点,能有效模拟地震作用下接触体之间的非线性大滑移现象。

2)断层破碎带穿过的部位围岩破坏区显著增大,衬砌位移和应力响应也较大,因而加剧了隧洞的地震反应.考虑围岩与断层动接触作用后,接触面附近围岩破坏区进一步发展,衬砌位移和应力也进一步增大。

3)地震作用下围岩与断层震动不同步,极易发生相互错动,进而使衬砌损伤破坏.衬砌损伤区主要分布于断层穿过的部位及断层两侧约 10 m 范围内,其中上盘与断层接触面附近衬砌损伤较严重。

4)横向地震动作用下,衬砌腰拱变形和应力响应值比顶拱和底拱大,因而会首先开裂破坏,腰拱是衬砌结构抗震设计的薄弱部位。

5)数值计算结果揭示了跨断层深埋水工隧洞地震响应特性与破坏机理,为跨断层隧洞结构抗震设计提供了参考。

参考文献

- [1] 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: 133—150.
- [2] YANG Z H, LAN H X, ZHANG Y S, *et al.* Nonlinear dynamic failure process of tunnel-fault system in response to strong seismic event [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 64: 125—135.
- [3] YU H T, CHEN J T, BOBET A, *et al.* Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 54: 102—116.
- [4] HUANG J Q, ZHAO M, DU X L. Non-linear seismic responses of tunnels within normal fault ground under obliquely incident P waves [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 61: 26—39.
- [5] WANG Z Z, GAO B, JIANG Y J, *et al.* Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake [J]. *Science in China: Technological Sciences*, 2009, 52 (2): 546—558.
- [6] 钱七虎, 何川, 晏启祥. 隧道工程动力响应特性与汶川地震隧道震害分析及启示 [C]// 汶川大地震工程震害调查分析与研究. 北京: 科学出版社, 2009: 773—778.
- QIAN Q H, HE C, YAN Q X. Dynamic response characteristics and lessons learnt from damage of tunnels in Wenchuan earthquake [C]// Investigation, Analysis and Research of Seismic Damages in Wenchuan Earthquake. Beijing: Science Press, 2009: 773—778. (In Chinese)
- [7] 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 T B. 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. (In Chinese)
- [8] 李林, 何川, 耿萍, 等. 隧道穿越高烈度地震区断层带围岩地震响应分析 [J]. *重庆大学学报*, 2012, 35(6): 92—98.
- LI L, HE C, GENG P, *et al.* Analysis of seismic dynamic responses of tunnel through fault zone in high earthquake intensity area [J]. *Journal of Chongqing University*, 2012, 35(6): 92—98. (In Chinese)
- [9] 耿萍, 吴川, 唐金良, 等. 穿越断层破碎带隧道动力响应特性分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(7): 1406—1413.
- GENG P, WU C, TANG J L, *et al.* Analysis of dynamic response properties for tunnel through fault fracture zone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(7): 1406—1413. (In Chinese)
- [10] 何川, 李林, 张景, 等. 隧道穿越断层破碎带震害机理研究 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(3): 427—434.
- HE C, LI L, ZHANG J, *et al.* Seismic damage mechanism of tunnels through fault zones [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(3): 427—434. (In Chinese)
- [11] 王峥峥. 跨断层隧道结构非线性地震损伤反应分析 [D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2009: 131—136.
- WANG Z Z. Nonlinear seismic damage response of tunnel structure across fault [D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2009: 131—136. (In Chinese)
- [12] 刘书, 刘晶波, 方鄂华. 动接触问题及其数值模拟的研究进展 [J]. *工程力学*, 1999, 16(6): 14—28.
- LIU S, LIU J B, FANG E H. The advances of studies on the dynamic contact problem and its numerical methods [J]. *Engineering Mechanics*, 1999, 16(6): 14—28. (In Chinese)
- [13] 杨阳, 肖明, 陈俊涛. 动接触力法用于地下厂房结构震损过程分析 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(4): 106—110.
- YANG Y, XIAO M, CHEN J T. Analysis of seismic damage evolving process of underground powerhouse concrete structure using on dynamic contact force method [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Sciences)*, 2014, 42(4): 106—110. (In Chinese)
- [14] LIU J B, SHARAN S K. Analysis of dynamic contact of cracks in viscoelastic media [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1995, 121: 187—200.
- [15] LIU J B, SHARAN S K, WANG D, *et al.* A dynamic contact force model for contactable cracks with static and kinetic friction [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1995, 123: 287—298.
- [16] 王福军, 程建钢, 姚振汉, 等. 结构碰撞数值模拟的一类接触算法 [J]. *工程力学*, 2002, 19(1): 130—134.
- WANG F J, CHENG J G, YAO Z H, *et al.* A new contact algorithm for numerical simulation of structure crashworthiness [J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(1): 130—134. (In Chinese)
- [17] 张立红, 刘天云, 李庆斌, 等. 往复荷载作用下的改进动接触力方法 [J]. *工程力学*, 2014, 31(7): 8—14.
- ZHANG L H, LIU T Y, LI Q B, *et al.* Modified dynamic contact force method under reciprocating load [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(7): 8—14. (In Chinese)
- [18] 赵健, 肖明, 陈俊涛, 等. 基于单元重构与节点分离的大型地下洞室软弱结构面模拟方法 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(3): 134—142.
- ZHAO J, XIAO M, CHEN J T, *et al.* Simulation methodology of weak structural planes in large underground chamber based on element reconstruction and node separation [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(3): 134—142. (In Chinese)
- [19] 张志国, 肖明, 陈俊涛. 大型地下洞室地震灾变过程三维动力有限元模拟 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(3): 509—523.
- ZHANG Z G, XIAO M, CHEN J T. Simulation of earthquake disaster process of large-scale underground caverns using three-dimensional dynamic finite element method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(3): 509—523. (In Chinese)
- [20] ZHANG Z G, CHEN J T, XIAO M. Artificial boundary setting for dynamic time-history analysis of deep buried underground caverns in earthquake disaster [J]. *Disaster Advances*, 2012, 5(4): 1136—1142.
- [21] DENG J, XIAO M. Dynamic response analysis of concrete lining structure in high pressure diversion tunnel under seismic load [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2016, 18(2): 1016—1030.