

小净距隧道中夹岩爆破振动响应规律研究

汪智渊

川藏铁路有限公司

摘要：为了有效控制小净距隧道中夹岩爆破振动，采用数值模拟方法研究了小净距隧道中夹岩爆破振动响应规律。建立了净距为6m的小净距隧道数值模型，开展了典型爆炸荷载作用下小净距隧道中夹岩爆破振动响应计算，根据计算结果分析了中夹岩厚度和高度方向以及隧道轴线方向中夹岩爆破振动响应分布规律。研究表明，相同条件下中夹岩三个方向爆破振动中水平径向爆破振动最大。沿中夹岩厚度方向，中夹岩水平切向和竖直向爆破振动由迎爆侧到背爆侧呈先衰减后增大趋势，水平径向爆破振动由迎爆侧到中夹岩中部呈衰减趋势，由中夹岩中部到背爆侧呈先增大后衰减趋势。沿中夹岩高度方向，中夹岩水平切向和径向爆破振动由爆源附近到中夹岩上下两端整体呈衰减趋势，而竖直向爆破振动则整体呈增大趋势。沿隧道轴线方向，中夹岩爆破振动由爆源附近到洞口位置整体呈衰减趋势，且在洞口附近存在一定放大效应。

关键词：小净距隧道；中夹岩；爆破振动；分布规律；数值模拟

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.08.019

一、引言

小净距隧道具有受地形和线路限制少、施工过程简便以及建设成本受控等特点，在交通隧道建设中得到了快速发展和应用。由于小净距隧道左右洞净距较小，隧道钻爆掘进过程中，后行洞开挖爆破振动易对隧道中夹岩产生不利影响，威胁隧道安全稳定，制约隧道掘进效率。随着小净距隧道在交通隧道建设中被更多地采用，小净距隧道左右洞净距越来越小，隧道中夹岩厚度也越来越小，后行洞开挖爆破振动对隧道中夹岩的不利影响更突出。因此，有必要开展小净距隧道中夹岩爆破振动响应规律研究，为有效控制小净距隧道爆破振动提供理论和技术参考。

国内外学者在小净距隧道中夹岩爆破振动响应研究方面取得了可供参考的丰富成果，且主要集中在中夹岩爆破振动和损伤方面。依托厦门海沧疏港通道工程项目，分析了循环爆破作用下中夹岩爆破振动传播与损伤演化规律。研究了爆破近远区中夹岩振动速度的主要影响因素和振动频率的演变规律。以大帽山隧道为工程背景，运用数值模拟方法得到中夹岩和既有隧道壁面的振动速度随时间的变化规律。建立了爆破荷载作用下中夹岩累积损伤计算新方法，并应用该方法对大坪山隧道中夹岩爆破累积损伤进行了预测。结合沈海高速公路泉厦扩建工程，对小净距隧道中夹岩爆破累积损伤进行测试

研究。以六月田分岔隧道为工程背景，采用LS-DYNA有限元软件模拟了循环荷载作用下小净距隧道保留岩体的累积损伤演化过程，探讨了中夹岩累积损伤程度和范围与爆破次数之间的关系。采用FLAC3D模拟了爆破荷载作用下分岔小净距隧道交替开挖过程，研究了中夹岩在不同开挖工况下损伤分布及演化规律。结合大帽山小净距隧道研究了小净距隧道群中夹岩的累积损伤效应。国内外相关研究重点关注中夹岩的爆破损伤情况，中夹岩爆破振动的相关研究相对较少，且已有相关研究缺乏不同爆破振动传播路径上的中夹岩振动响应规律成果。

本文采用数值模拟方法开展小净距隧道中夹岩爆破振动响应规律研究。建立小净距隧道三维数值模型，计算典型爆炸荷载工况下中夹岩爆破振动响应，进而分析不同爆破振动传播路径上的中夹岩振动响应规律。研究成果拟为有效控制小净距隧道爆破振动提供理论和技术参考。

二、工程概况

(一) 小净距隧道概况

某隧道为双洞单线隧道，隧道断面形状及位置关系如图1所示，两隧道线间距为17.14~25.01m，相邻边墙水平距离最小只有6.0m，属于小净距隧道。

隧道洞身通过的地层主要为三叠系上统甲丕拉组砂岩夹砾岩层，隧道围岩为III~IV级围岩，围岩物理力学参数见表1。

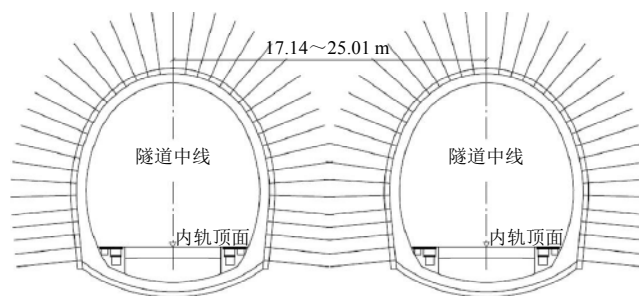


图1 隧道断面形状及位置关系图

表1 隧道围岩物理力学参数表

密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 μ	弹性模量/ GPa	切线模量/ GPa	屈服强度/ MPa
2500	0.28	20	2.0	50

(二) 爆破参数

该隧道除局部里程段采用明挖法施工外，其余里程段均采用钻爆法暗挖施工。隧道按2m循环进尺进行台阶法爆破，典型的炮孔布置和起爆顺序，具体的爆破参数见表2。

表2 爆破参数表

台阶	炮孔名称	炮孔直径/mm	雷管段别	孔深/m	数量/个	单孔药量/kg	单段药量/kg	
上台阶	掏槽	42	MS1	1.8	4	1.5	6.0	
		42	MS3	2.8	6	2.1	12.6	
		42	MS5	2.5	4	2.1	8.4	
	辅助	42	MS5	2.2	3	1.2	3.6	
		42	MS7	2.2	12	1.2	14.4	
		42	MS9	2.2	16	1.2	19.2	
	周边	42	MS11	2.2	30	0.6	18.0	
		底板	42	MS7	2.2	6	1.5	9.0
			42	MS11	2.2	4	1.5	6.0
42	MS13		2.2	2	1.5	3.0		
中台阶	辅助	42	MS3	2.2	8	1.2	9.6	
		42	MS5	2.2	8	1.2	9.6	
	底板	42	MS7	2.2	8	1.5	12.0	
仰拱	周边	42	MS9	2.2	12	0.6	7.2	
	辅助	42	MS9	2.2	7	1.2	8.4	
	底板	42	MS11	2.2	10	1.5	15.0	
	周边	42	MS13	2.2	4	0.6	2.4	

三、数值模型

(一) 模型尺寸

采用如图3所示的模型开展小净距隧道中夹岩爆破振动响应规律研究。模型整体几何尺寸为70.0m×44.2m×29.1m，隧道边墙至模型边界的距离均设置为10m。考虑中夹岩厚度的最危险工况，将中夹岩厚度设置为6.0m。后行洞开挖进度设置为滞后先行洞30m。

如图4所示，模型所有边界均施加透射边界以消除人工截断边界处应力波反射对计算结果的影响。模型中岩体采用实体单元模拟，模型共划分单元696 800个、节点728 915个。

(二) 爆炸荷载

考虑诱发围岩振动最大的爆炸荷载工况，即掏槽爆破。爆破加载采用Lu等[12]提出的等效弹性边界方法，具体如图5所示，单个炮孔壁上作用有爆炸荷载 P_0 ，炮孔半径为 r_0 ，根据力和力矩平衡，可以将 P_0 等效施加在如图2(b)所示的炮孔连心线上。

等效爆炸荷载采用如图3所示的三角形荷载形式，等效荷载峰值计算式为：

$$P_e = k \left(\frac{\rho D^2}{2(\gamma+1)} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} P_k^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \left(\frac{a}{b} \right)^{2\gamma} \alpha^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \frac{b}{S} \quad (1)$$

式中： ρ 、 D 分别为炸药的密度和爆轰速度； γ 为等熵指数； a 为装药直径； b 为炮孔直径； k 为考虑空气冲击波与孔壁作用的放大系数，一般取8~11， P_k 为炸药临界压力，一般中等威力炸药取为200MPa； ν 为绝热指数； S 为相邻两炮孔之间的距离； α 为轴向装药比。

根据图2和表2所示的爆破参数，计算得到的三角形等效爆炸荷载峰值约为15.21 MPa，爆炸荷载压力上升

时间 t_u 为1.5ms，正压作用时间 t_d 为6.0ms。将等效爆炸荷载施加在掏槽区域边界上。

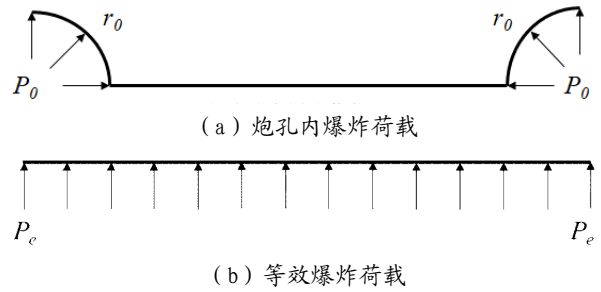


图2 爆炸荷载等效施加示意图

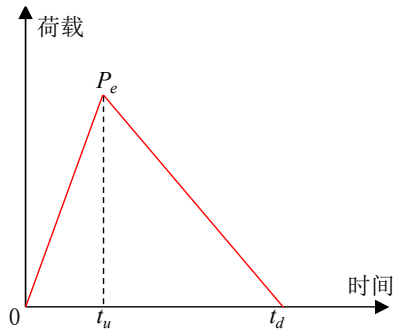


图3 三角形等效爆炸荷载

(三) 材料参数

岩体材料采用式(2)表示的考虑应变率影响的随动硬化模型描述，具体参数见表1。在LS DYNA中，随动硬化模型采用*MAT_PLASTIC_KINEMATIC关键字描述。

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{c_0} \right)^{1/\beta_1} \right] (\sigma_{y0} + \beta_2 E_p \epsilon_{eff}^p) \quad (2)$$

式中： σ_y 为岩体屈服强度， σ_{y0} 为岩体屈服强度初始值； E_p 为岩体塑性硬化模量； ϵ_{eff}^p 为有效塑性应变； c_0 、 β_1 为与应变率有关的参数， β_2 的值描述不同的硬化模型。

四、爆破振动响应规律分析

在中夹岩中沿中夹岩厚度方向、中夹岩高度方向和隧道轴线方向分别设置爆破振动测线，如图4所示，提取测线上的爆破振动PPV (peak particle velocity, 质点峰值振速) 计算结果，分析中夹岩爆破振动响应的分布规律。

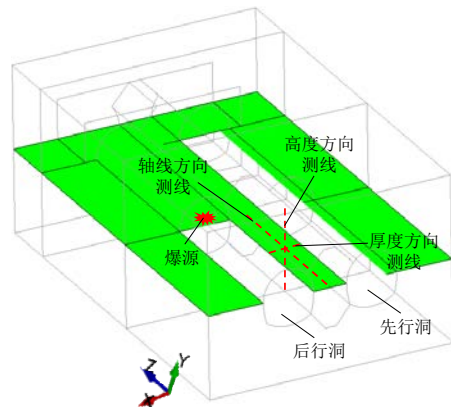


图4 爆破振动测线分布图

(一) 中夹岩厚度方向分布规律

中夹岩厚度方向测线上爆破振动PPV分布情况如图5所示。由图5可知，中夹岩水平切向、竖直向、水平径向三个方向爆破振动中，相同条件下水平径向爆破振动最大，即中夹岩沿隧道轴线方向爆破振动最大。中夹岩水平切向和竖直向爆破振动沿中夹岩厚度方向的变化规律基本一致，由迎爆侧到背爆侧呈先衰减后增大的趋势。由爆源附近迎爆侧到中夹岩中部，中夹岩水平切向和竖直向爆破振动呈衰减趋势，由中夹岩中部到背爆侧，中夹岩水平切向和竖直向爆破振动呈增大趋势，且中夹岩背爆侧水平切向和竖直向爆破振动PPV与爆源附近迎爆侧PPV大小相当。中夹岩水平径向爆破振动由爆源附近迎爆侧到中夹岩中部呈衰减趋势，与水平切向和竖直向爆破振动分布规律相同；中夹岩水平径向爆破振动由中夹岩中部到背爆侧呈先增大后衰减趋势。

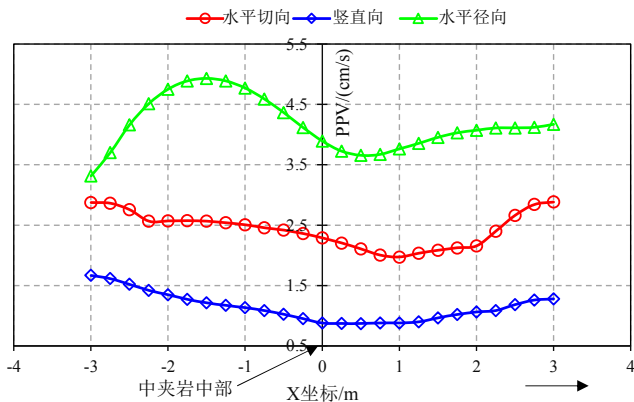


图5 中夹岩厚度方向爆破振动PPV分布

(二) 中夹岩高度方向分布规律

中夹岩高度方向测线上爆破振动PPV分布情况如图6所示。由图6可知，中夹岩水平切向、竖直向、水平径向三个方向爆破振动中，相同条件下水平径向爆破振动最大，即中夹岩沿隧道轴线方向爆破振动最大。中夹岩水平切向和水平径向爆破振动沿中夹岩高度方向的变化规律基本一致，由爆源附近到中夹岩上下两端，中夹岩水平切向和水平径向爆破振动整体呈衰减趋势。中夹岩竖直向爆破振动由爆源附近到中夹岩上下两端整体呈增大趋势。

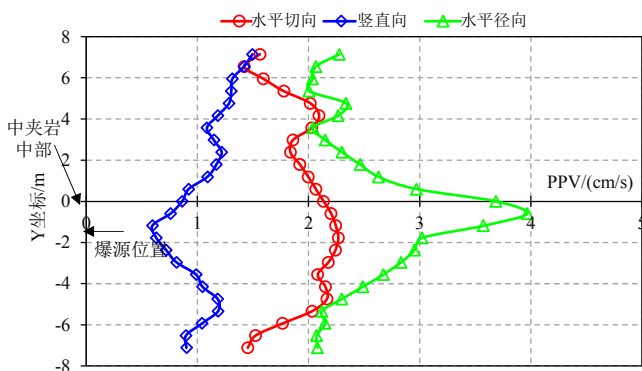


图6 中夹岩高度方向爆破振动PPV分布

(三) 隧道轴线方向规律分析

隧道轴线方向测线上爆破振动PPV分布情况如图7所示。由图7可知，中夹岩水平切向、竖直向、水平径向三个方向爆破振动中，相同条件下水平径向爆破振动最大，即中夹岩沿隧道轴线方向爆破振动最大。中夹岩水平切向、竖直向、水平径向三个方向爆破振动沿隧道轴线方向的变化规律基本一致，由爆源附近到洞口位置，中夹岩爆破振动整体呈衰减趋势，且在洞口附近存在一定程度放大效应。

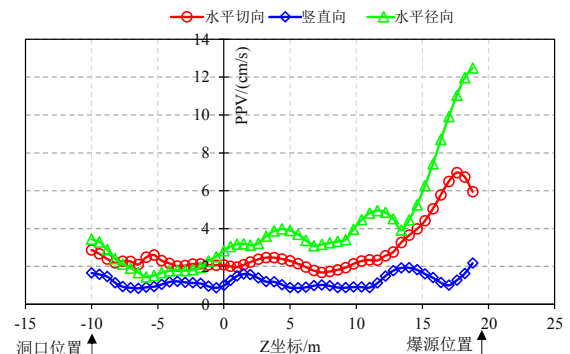


图7 隧道轴线方向爆破振动PPV分布

五、结语

本文采用数值模拟方法开展小净距隧道中夹岩爆破振动响应规律研究，在本文所述的条件下，得到如下主要结论：

- (1) 相同条件下，中夹岩三个方向爆破振动中水平径向爆破振动最大，即沿隧道轴线方向爆破振动最大。
- (2) 沿中夹岩厚度方向，中夹岩水平切向和竖直向爆破振动由迎爆侧到背爆侧呈先衰减后增大的趋势；水平径向爆破振动由爆源附近迎爆侧到中夹岩中部呈衰减趋势，由中夹岩中部到背爆侧呈先增大后衰减趋势。
- (3) 沿中夹岩高度方向，中夹岩水平切向和水平径向爆破振动由爆源附近到中夹岩上下两端整体呈衰减趋势；中夹岩竖直向爆破振动由爆源附近到中夹岩上下两端整体呈增大趋势。
- (4) 沿隧道轴线方向，中夹岩水平切向、竖直向、水平径向三个方向爆破振动沿隧道轴线方向的变化规律基本一致，中夹岩爆破振动由爆源附近到洞口位置整体呈衰减趋势，且在洞口附近存在一定程度放大效应。

参考文献

[1] 陈其学, 江勇顺, 唐浩. 飞仙关特长隧道高压涌突水形成机制及处治技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(4): 143-147.
 [2] 张卫晓. 泥巴山隧道超前地质预报数值模拟方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
 [3] 曹峰, 凌同华, 李洁, 等. 循环爆破荷载作用下小净距隧道中夹岩的累积损伤特征分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(23): 141-148.