

DOI: 10.11779/CJGE201909018

隧道掘进中掏槽孔爆破引起的地表振动波形预测

刘小鸣¹, 陈士海^{*1, 2}

(1. 华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省隧道与城市地下空间与工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了研究钻爆法隧道掘进中掏槽孔爆破对地表的影响, 建立了隧道工程中掏槽孔爆破引起的地表振动波形的预测方法。首先, 从弹性半无限介质中球形药包爆破引起的地表振动波形理论解出发, 根据实际介质的地表振动特性构造出一个适用于实际介质且更加简洁的球形药包地表振动波形函数, 并用实测数据验证构造函数的正确性; 然后, 将隧道掘进中掏槽孔的爆破简化为单孔柱状药包的爆破来分析掏槽孔爆破引起的地表振动波形, 再利用球形药包叠加法得到简化后的单孔柱状药包爆破引起的地表振动波形函数, 从而得出掏槽孔爆破引起的地表振动波形; 并讨论了不同围岩等级对隧道掏槽孔引起的地表振动波形的影响; 最后以大坪山隧道为背景, 利用现场实测数据验证了上述预测方法的正确性。

关键词: 波形预测; 构造函数; 波形叠加; 隧道掘进

中图分类号: TU94; TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)09-1731-07

作者简介: 刘小鸣(1994—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: xmlu152@163.com。

Prediction of surface vibration waveform caused by cuthole blasting in tunneling

LIU Xiao-ming¹, CHEN Shi-hai^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: The surface vibration waveform function caused by cuthole blasting in tunneling in actual rock medium is established. Based on the spherical charge, the theoretical solution of surface vibration waveform caused by the spherical charge blasting in elastic semi-infinite medium is derived by using the Hoop point source theory, and a more concise surface vibration waveform function of the spherical charge suitable for actual medium is then, constructed according to the surface vibration characteristics of the actual medium. Secondly, the blasting of cuthole in tunneling is simplified to the blasting of single-hole cylindrical charge. Finally, the vibration waveform function of the spherical charge is superimposed to obtain the surface vibration waveform function caused by the simplified cylindrical charge blasting, thus the surface vibration waveform caused by cuthole blasting is obtained and applied to actual tunnel engineering, and the influences of different surrounding rock grades on the surface vibration waveform caused by tunnel cuthole are discussed by using the vibration velocity waveform function. The surface vibration waveform function obtained in this study provides a scheme for predicting the surface vibration waveform of tunnel excavation blasting, and has certain engineering value.

Key words: waveform prediction; constructor; waveform superposition; tunneling

0 引言

近年来, 国家对交通建设的投入不断加大, 大量兴建公路和铁路工程, 同时也伴随着大量的隧道工程。钻爆法因其对地质条件适应性强, 开挖成本低等优点, 是目前隧道建设主要施工方法之一。但在钻爆法施工中爆破的一小部分能量将转换为地震波, 从爆源以波的形式向外传播, 经过介质到达地表, 引起地表的振动, 这可能会造成建筑物损伤, 故需要对隧道爆破掘

进引起的地表振动进行预测, 从而加以控制。

最早开始研究爆破引起的地表振动效应是国外的学者, De Hoop^[1]对弹性半空间内的点源进行了研究, 得到点源作用下自由面上质点的振动波形函数; E. И.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672112); 华侨大学科研基金项目(13BS402)

收稿日期: 2018-11-07

*通讯作者(E-mail: cshblast@163.com)

Шемякин^[2]用不完全分离变量法得到在球腔压力作用下自由表面上质点的运动时程曲线;而对于柱状药包的研究^[3-5]大多是通过数值模拟或利用短柱药包进行叠加的方式进行。这些研究大多是针对弹性半无限介质中的爆破,很少直接对实际工程中出现的问题进行研究。

近年来,随着研究方法的丰富,学者们开始对实际工程中出现的问题进行研究,特别是隧道爆破掘进中引起的地表振动效应方面。张继春等^[6]通过现场试验分析了浅埋隧道掘进爆破的地表振动效应;高文学等^[7]对密兴路火郎峪隧道工程出口段爆破开挖的地表振动监测数据分析,得到掏槽孔爆破振动控制是降低浅埋隧道振害的关键等结论;张自光等^[8]采用现场测试和数值模拟相结合的方法研究了地铁隧道爆破地表振动效应随埋深变化的规律;张超^[9]利用某区间隧道的爆破地表振动监测数据对垂直切向、水平切向与水平径向3个方向的峰值和主频的变化规律进行分析;樊浩博等^[10]以某隧道为依托,采用数值模拟对地表建筑质点振速进行分析,结合现场爆破振动测试,对地表振动速度衰减规律进行了研究,并指出了爆破振动的显著影响区域。张震等^[11]采用现场监测和动力有限元数值模拟相结合的研究方法,对超浅埋通道下台阶爆破开挖的地表振动传播规律进行研究。王超等^[12]基于数值模拟、实测数据验证和量纲分析方法对不同埋深隧道爆破地震波在邻近地表一定范围内的反射叠加规律和地表振动速度衰减规律进行研究。王举等^[13]采用Midas/GTS有限元分析软件,建立了隧道洞中爆破振动对地表影响模型,对地表振动规律进行分析;费鸿禄等^[14]基于实测隧道爆破的地表振动数据,采用小波包分析技术分析了爆破振动信号能量在各频带上的分布,并从能量的角度探讨隧道掘进爆破地震波沿各个方向的衰减规律;肖文芳等^[15]根据现场实测数据和数值模拟对地铁隧道钻爆法施工引起的地表振动速度进行了分析。由此可知,目前对隧道掘进爆破引起的地表振动效应的研究大多是通过分析实测数据进行的,少数利用数值模拟进行研究,很少从理论方面进行深入研究,还没有得到隧道爆破掘进引起的地表振动波形函数,还需在理论方面进行深入研究。

故本文从球形药包的地表振速理论波形函数出发,对隧道掘进过程中掏槽孔爆破引起的地表质点振动速度波形进行预测,得到其振速波形函数。

1 弹性介质中球形药包地表振速函数

在均匀、各向同性的弹性半空间内,自由面以下深 h 处有一个球形药包爆炸,根据等效孔穴理论可将球形药包的爆炸等效为一个半径为 a 、内压力为 $p(t)$ 的

球腔压力源作用,如图1所示。半空间介质的密度为 ρ ,杨氏模量为 E ,泊松比为 ν 。自由面位于 $z=0$ 平面上,球形药包位于 z 轴上,自由面上质点 B 到原点的距离为 r ,到震源的距离为 R ,内压力 $p(t)=p_0e^{-\alpha_0 t}$ 在 $t=0$ 时开始作用。

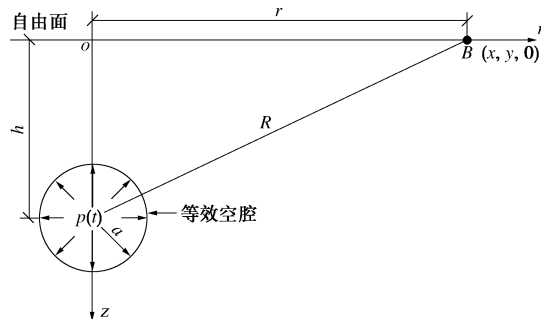


图1 半空间球形药包爆破

Fig. 1 Spherical charge blasting in a half-space

根据De Hoop^[1]推导出的在点源作用下自由面质点的振动速度函数理论解,推导出在半径为 a 、压力为 $p(t)=p_0e^{-\alpha_0 t}$ 的球腔压力源作用下的地表质点振动速度函数为

$$\left. \begin{aligned} v_r(t) &= f''(0)g_r(t) + \int_{(R-a)/v_p}^t f'''(t-\tau)g_r(\tau)d\tau, \\ v_z(t) &= f''(0)g_z(t) + \int_{(R-a)/v_p}^t f'''(t-\tau)g_z(\tau)d\tau, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $f(t)$ 为震源强度函数,表达式如下:

$$f(t) = -4\pi A e^{-\xi\omega_0 t} \left[\left(\frac{\alpha_0}{c_p^2} + \frac{1}{R} \right) \cos(\omega_d t) + \left(\frac{\omega_d^2 + \xi\omega_0 - \alpha_0}{c_p^2\omega_d} + \frac{\xi\omega_0 - \alpha_0}{R\omega_d} \right) \sin(\omega_d t) \right] + 4\pi A \left(\frac{\alpha_0}{c_p^2} + \frac{1}{R} \right) e^{-\alpha_0 t}, \quad (2)$$

式中,

$$A = \frac{ap_0}{(\omega_0^2 - 2\xi\omega_0\alpha_0 + \alpha_0^2)\rho}, \quad (3)$$

式(2),(3)中, $\omega_0 = 2c_s/a$, $\xi = c_s/c_p$, $\omega_d = \omega_0\sqrt{1-(\xi)^2}$, c_p 和 c_s 分别为p波和s波的传播速度,且 $c_p = \sqrt{(\lambda+2\mu)/\rho}$, $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$ 。

式(1)中 $g(t)$ 为格林函数,表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} g_r(x, y, 0, \tau) &= \frac{1}{\pi^2 R} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \text{Re}\{w_r\gamma_p\} d\Psi, \\ g_z(x, y, 0, \tau) &= \frac{1}{\pi^2 R} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \text{Re}\{w_z\gamma_p\} d\Psi, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} w_r &= \frac{p\gamma_s}{2v_s^2\eta}, \\ w_z &= \frac{p^2 - (q^2 + 1/(2v_s^2))}{2v_s^2\eta}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\eta = (q^2 + 1/(2v_s^2) - p^2)^2 + (p^2 - q^2)\gamma_p\gamma_s \quad , \quad (6)$$

$$\gamma_{p,s} = (q^2 + 1/v_{p,s}^2 - p^2)^{1/2} \quad (\text{Re}\gamma_{p,s} \geq 0) \quad , \quad (7)$$

$$q(\Psi) = \frac{1}{R} \left(\tau^2 - \frac{(R-a)^2}{v_p^2} \right)^{1/2} \sin \Psi \quad \left(0 \leq \Psi \leq \frac{\pi}{2} \right), \quad (8)$$

$$p(\Psi) = (r/R^2)\tau + i(h/R^2)(\tau^2 - (R-a)^2/v_p^2)^{1/2} \cos \Psi \quad . \quad (9)$$

2 实际介质中球形药包地表振速函数

由于弹性介质与实际介质存在很大差异，且推导得到的振动速度函数形式复杂，不适合应用到实际工程中。故需要在前文得到的振动速度函数理论解的基础上，根据实际介质的地表振动特性构造出一个更为简洁且能应用到实际介质中的振动波形函数。

由于式（1）形式复杂，无法得到其表达式的具体形式，故本文通过曲线拟合的方法确定式（1）振速波形的通用拟合表达式。

首先，根据实际工程选择3种不同的工况，其中爆破参数和岩石参数见表1，炸药为乳化炸药，密度为1100 kg/m³，爆速为3600 m/s；并选取3组不同的爆心距10，15和20 m。

表 1 不同工况下的爆破参数和岩石参数

Table 1 Blasting parameters and rock parameters under different working conditions

参数	装药量/kg	药包半径/m	炸药埋深/m	岩石密度 k/(g·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
工况1	0.42	0.045	2	2350	18	0.25
工况2	3.36	0.090	5	2350	18	0.25
工况3	0.42	0.045	2	2670	45	0.22

根据上述不同工况下的爆破参数、岩石参数、炸药性能指标得到球腔压力源的半径 a 和内压力 $p(t)$ ，将上述参数和爆心距代入式（1）中，得到不同工况条件下、不同爆心距处弹性介质中球形药包的地表振速波形，通过对上述多组振速波形的曲线拟合，可确定球形药包振速波形的通用拟合表达式为

$$v(t) = a_1 e^{-b_1 t} [\cos(c_1 t) + d_1 \sin(c_1 t)] \quad , \quad (10)$$

式中， a_1 ， b_1 ， c_1 和 d_1 为拟合系数。其中 a_1 与质点振速峰值相关； b_1 与质点振速的衰减速率相关； c_1 与质点振动频率相关， d_1 为一个没有实际含义的常数。

图 2 为工况 1 的理论解波形与拟合波形对比图。可见，利用式（10）对不同工况下、不同爆心距的多个振速波形拟合的效果都很好，由于每次拟合得到的 d_1 值都非常接近 1，故取 $d_1 = 1$ ，则得振速函数拟合表达式可化简为

$$v(t) = \sqrt{2} a_1 e^{-b_1 t} \sin(c_1 t + \pi/4) \quad . \quad (11)$$

由于实际介质为黏弹性介质且含有较多裂隙节理

面，导致实际介质中地表质点的振速峰值、振速的衰减速率和振动频率与弹性介质中得到的理论解有所不同。故通过理论解拟合得到的 a_1 ， b_1 ， c_1 与实际介质中的值会有所差别，所以 a_1 ， b_1 ， c_1 根据实际介质构造得出，则式（11）即为构造函数的形式。

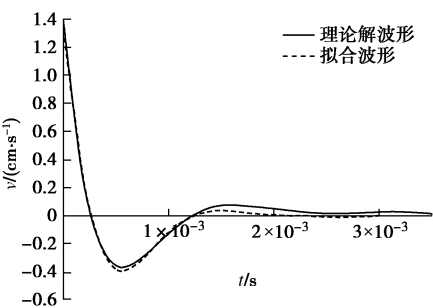


图 2 工况 1 下的理论解波形与拟合波形对比图
Fig. 2 Comparison between theoretical solution and fitted waveforms under working condition 1

为了将波形的起始点设置为原点，将式（11）的波形向前平移 $\pi/4$ 个单位，故得到构造函数形式为

$$v(t) = \sqrt{2} a_1 e^{-b_1 t} \sin(c_1 t) \quad . \quad (12)$$

目前普遍认可的振速峰值计算公式为萨道夫斯基公式，而式（12）中的 $\sqrt{2} a_1$ 与振速峰值有关，故可令 $\sqrt{2} a_1 = k(\sqrt[3]{Q}/R)^\alpha$ ； b_1 与振速的衰减速率相关，而影响振速衰减速率的主要因素是岩石的各方面的综合性质。通过对不同岩体条件下的实测振速波形衰减速率的统计分析，得到了不同岩体条件下振速波形衰减指数的大致取值范围，并将其与岩石的RMR分级评分建立联系； c_1 与振动频率相关，且 $c_1 = 2\pi f$ ，本文根据焦永斌^[16]和唐春海等^[17]给出的振动频率计算公式 $f = 2k(\sqrt[3]{Q}/\lg R)^{\alpha-1}$ 。

综上所述，根据构造得到的实际介质球形药包引起的地表振速波形函数为

$$v(t) = k(\sqrt[3]{Q}/R)^\alpha e^{-\beta t} \sin(\omega t) \quad . \quad (13)$$

式中 Q 为装药量 (kg)； $\beta = 100 - \text{RMR}$ ， β 值与岩体分级类别的关系见表 2； R 为爆心距； $\omega = 2\pi f$ ， $f = 2k(\sqrt[3]{Q}/\lg R)^{\alpha-1}$ ； k ， α 为与爆破点地形、地质条件有关的系数和衰减指数，一般地，取 $\alpha = 1 \sim 2$ ，岩石中取 $k = 30 \sim 70$ ，土壤中取 $k = 150 \sim 250$ ，岩体越坚硬 k 和 α 取值越小。

表 2 各级岩石的 β 取值

Table 2 Values of rock β at each level

岩体类别	I	II	III	IV	V
RMR	81~100	61~80	41~60	21~40	0~20
β	0~20	21~40	41~60	61~80	81~100

以泰山观光大道岩体开挖爆破为背景，利用在微

风化花岗岩中进行的现场爆破试验对上述的构造函数进行验证。

一个装药半径 d 为 0.045 m 的球形药包在地下 2 m 处的风化花岗岩中爆炸。爆心距为 10.2 m, 花岗岩属于硬岩, 故取 $k=35$, $\alpha=1.3$, 岩石的品质因子 β 取 25, 将参数取值代入构造函数 (13) 得到实际介质中地表质点振速波形函数式

$$v(t) = 1.15e^{-50t} \sin(400t) \quad (14)$$

将振动波形与实测波形进行对比, 见图 3。并进行频谱分析, 绘出两者的频谱对比图, 见图 4。

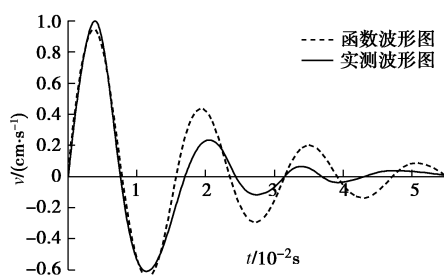


图3 速度波形对比图

Fig. 3 Comparison of speed waveforms

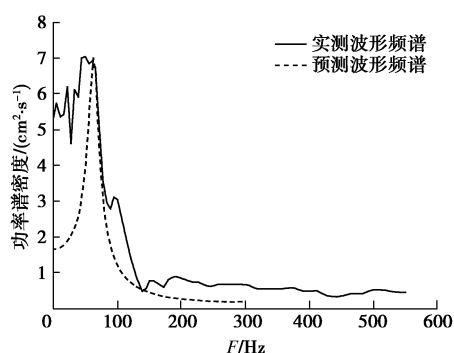


图4 频谱对比图

Fig. 4 Comparison of spectra

由图3, 4可知, 构造函数的波形形状、峰值、频谱和持续时间与实测波形都较为吻合, 故该构造的地表振速波形函数的合理性得到了验证。

3 隧道掏槽孔爆破地表振速波形函数

根据大量的实际工程可知, 隧道掘进爆破时地表振速最大值往往出现在掏槽孔爆破时, 故选择隧道掘进中药量最大的一段掏槽孔爆破引起的地表振动波形进行研究。

虽然药量最大的一段掏槽孔由多个炮孔组成, 但掏槽孔间距较小, 且远小于到地表振动预测点 B 的距离。故本文借鉴傅洪贤等^[18]利用简化药包研究隧道中导洞爆破引起的周围岩体质点的振动速度的方法, 利用简化药包研究药量最大的一段掏槽孔爆破引起的地表振动波形。在药包长度和总药量不变的条件下, 将

掏槽孔简化为单孔柱状药包, 即为简化药包, 继而将掏槽孔爆破引起的地表振动转化为单孔柱状药包爆破引起的地表振动。

对于柱状药包, 大多数文献都是研究垂直于地表的柱状药包, 将其视为平面问题。而在钻爆法隧道掘进中, 掏槽孔简化得到的柱状药包是平行于自由面呈水平状态的, 是一个三维问题。

Starfield 等^[3]通过将柱状药包划分为若干段短柱叠加来分析垂直柱状药包爆炸造成的应变。本文同样采用叠加理论, 将柱状药包划分为若干段短柱药包, 再将短柱药包等效为球形药包, 最终通过叠加球形药包来分析水平放置的简化柱状药包爆炸引起的地表质点振动波形。

在研究隧道掘进中掏槽孔爆破引起的地表振动响应时, 可将地表上质点的振动分为两种情况。第一种是掌子面前方未开挖段上方地表质点的振动, 第二种是隧道已开挖区段上方地表质点的振动。如图5所示。

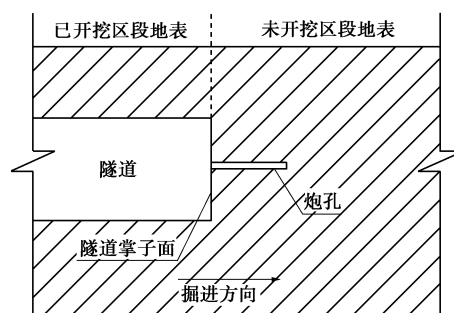


图5 隧道掘进状态图

Fig. 5 Diagram of tunneling state

由于已开挖段存在一个隧道空洞, 会对波的传播路径产生影响, 而前文中的球形药包构造函数是针对半无限空间介质的, 传播路径为直线, 故本文只研究未开挖区段地表质点的振动波形函数。

隧道与振动预测点 B 的相对位置见图6, 7, 柱状药包叠加细节见图8。图中的变量: h 为柱状药包的埋深; y 为振动预测点 B 到简化柱状药包正上方地表所在直线的水平距离; R_i 为第 i 个球状药包中心到预测点 B 处的距离; x 为预测点 B 到掌子面所在平面的距离; x_i 为第 i 段药包中心到起爆点的距离; δ 为每段药包的长度; l_1 为炮泥的长度; d 为简化柱状药包直径。

由图 8 可知, 第 i 段药包中心点到预测点 B 的距离为

$$R_i = \sqrt{y^2 + (x - l_1 - x_i)^2 + h^2} \quad (15)$$

从引爆开始到第 i 段药包爆炸的时间为 x_i / c_D , c_D 为炸药爆轰速度 (VOD); 第 i 段产生的爆破波到达预测点 B 点的时间为 R_i / c_p , c_p 为 p 波在介质中的传播速度。故从起爆点开始引爆到第 i 段产生的冲击波传到地表 B 点的总时间为

$$t_i = \frac{x_i}{c_D} + \frac{R_i}{c_p} \quad (16)$$

设 $t=0$ 时刻引爆药包, 那么柱状药包第 i 段引起的振速相关的公式都是 $(t-t_i)$ 的函数。

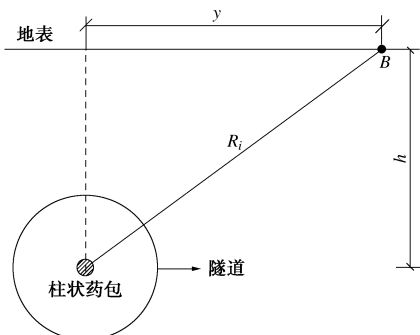


图 6 隧道及柱状药包断面图
Fig. 6 Sectional view of tunnel and column charge

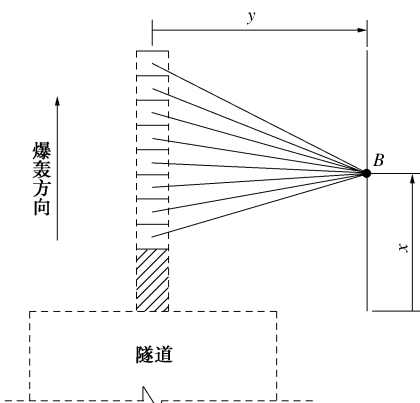


图 7 隧道及炮孔俯视图
Fig. 7 Top view of tunnel and blasthole

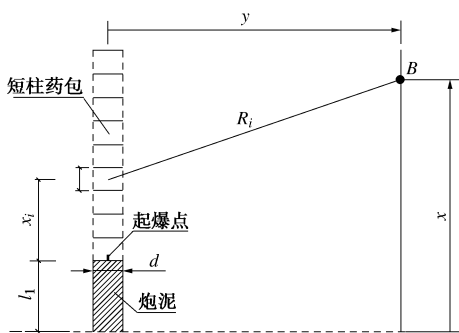


图 8 球形药包叠加图
Fig. 8 Superposition of spherical pack

由前文可知, 实际介质中球形药包爆破引起的地表振动波形函数为

$$v(t) = k(\sqrt[3]{Q}/R)^\alpha e^{-2\beta t} \sin(\omega t) \quad (17)$$

故第 i 段药包爆破引起的地表质点振速波形函数为

$$v_i(t) = k(\sqrt[3]{Q}/R_i)^\alpha e^{-2\beta(t-t_i)} \sin[4\pi k(\sqrt[3]{Q}/\lg R_i)^{\alpha-1}(t-t_i)], \quad (18)$$

$$Q = \frac{\pi d^2 \delta}{4} \rho_0 \quad (19)$$

式中, ρ_0 为炸药密度, 其余变量与前文相同。

最后, 将柱状药包所分的 N 个短柱中的每一个短

柱引起的振速进行叠加, 即可得到任意时刻垂直于隧道掌子面的单一柱状药包爆炸引起的地表质点振动速度函数为

$$v = \sum_{i=1}^N v_i(t) \quad (20)$$

4 隧道围岩等级对地表振动影响分析

影响隧道爆破地表振动的因素有很多, 但大多数因素对隧道爆破引起的地表振动影响都较小, 例如炸药爆速, 爆速只影响柱状药包分段后每段药包爆炸形成的波到达地表的时间, 而在常规孔深下每段药包间的时间差很小, 对地表的振动波形影响较小, 故本文没有分析爆速的影响。而隧道的围岩等级对波的传播影响很大, 继而对爆破引起的地表振动影响很大, 故本文根据前文建立的隧道掘进中掏槽孔爆破引起的地表振动波形的预测方法, 对不同围岩等级下隧道掏槽孔爆破引起的地表振动波形进行分析。

以城市地铁小断面隧道爆破掘进为背景。其中, 掏槽孔的总装药量为 $Q=7.8 \text{ kg}$, 炮泥长度 $l_1=0.5 \text{ m}$, 柱状药包长度 $l=1 \text{ m}$, 隧道埋深 $h=15 \text{ m}$, 测点距柱状药包中心线距离 $y=10 \text{ m}$, 测点到掌子面所在直线的距离 $x=5 \text{ m}$, 炸药采用乳化炸药, 爆速取 4000 m/s 。通过上节的方法, 将掏槽孔的爆破简化为一个柱状药包的爆破, 可得简化药包的直径 $d=0.1 \text{ m}$, 再将柱状药包划分为五个球形药包的叠加。

根据球形药包的构造公式可知, 围岩的等级对振速的峰值、衰减速率和频率都有影响。由于 V 类围岩的稳定性很差, 一般不采用爆破掘进, 故本文只讨论 I ~ IV 类围岩之间的差别。各级围岩的 k , α 和 β 取值列于表 3。

表 3 各级围岩 k , α 和 β 取值表

Table 3 Values of k , α and β of surrounding rock			
围岩等级	k	α	β
I	30	1.2	10
II	41	1.4	30
III	50	1.6	50
IV	60	1.8	70

由图 9 可知, 岩石的等级影响着振速的峰值、频率和持续时间。随着隧道围岩等级的提高, 地表质点振速的峰值和持续时间越来越小, 而频率越来越大。

5 工程实例

以泉厦高速公路扩建工程大坪山隧道掘进为背景, 利用实测的隧道掏槽孔爆破引起的地表振速数据, 检验振动波形预测方法的正确性。

本隧道表层多为残坡积土, 下覆燕山早期侵入花岗岩及其风化层, 其构造条件相对稳定, 未见断裂带通过, 岩体以整体结构为主, 局部为块状砌体结构,

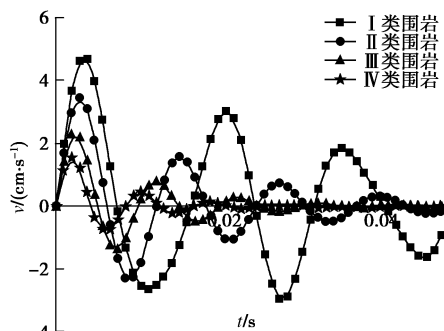


图9 各级围岩条件下地表振动波形图

Fig. 9 Surface vibration waveforms under various surrounding rock conditions

洞身有节理裂隙发育带。隧道围岩等级为Ⅱ级,埋深 $h=40$ m左右。隧道掏槽孔的总装药量 $Q=25.8$ kg,炮泥长度 $l_1=1.1$ m,柱状药包长度 $l=2.4$ m,所使用的炸药为乳化炸药,爆速为3500 m/s。岩石的泊松比为0.24,弹性模量 E 为18 GPa,密度为2300 kg/m³。故根据前文规定, $k=40$, $\alpha=1.4$, $\beta=30$ 。

分别选择距掌子面距离为5 m、且偏离隧道轴线距离 y 为5, 100 m处的两个地表质点进行验证,根据总装药量,可将掏槽孔等效为一个直径为0.12 m的简化药包,并将其分为4段短柱药包,每段短柱药包的装药量为6.45 kg,再将4段短柱药包等效为球形药包,最后将4个球形药包叠加得到柱状药包爆破引起的地表振动波形。并将得到的理论预测波形与实测波形进行对比,对比图见图10, 11。

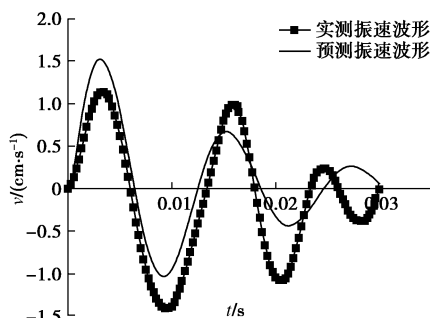
图10 $y=5$ m处实测波形与理论波形对比图

Fig. 10 Comparison between measured and theoretical waveforms

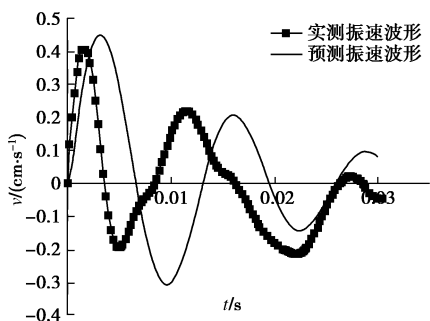
at $y=5$ m图11 $y=100$ m处实测波形与理论波形对比图

Fig. 11 Comparison between measured and theoretical waveforms

at $y=100$ m

从图10, 11中可以看出,预测波形与实测波形大致吻合,且两者的峰值、频率和持续时间大致相同,故可知隧道掘进爆破引起的地表质点振动波形理论预测方法的正确性。

6 结 论

(1) 根据点源理论解推导出球形药包爆炸引起的地表质点振动波形函数,再根据萨道夫斯基公式、围岩的分级评分RMR和频率计算经验公式,构造出一个适用于实际工程且更加简洁的球形药包地表振动波形函数。

(2) 通过将药量最大的一段掏槽孔简化为一个单孔柱状药包来分析掏槽孔爆破引起的地表振动波形,并利用叠加理论,将简化柱状药包划分为若干个球形药包的叠加,得出简化柱状药包的地表振动波形函数,从而得出掏槽孔爆破的地表振动波形函数。

(3) 研究了不同围岩等级条件下掏槽孔爆破引起的地表振动波形变化情况。并得出:随着隧道围岩等级的提高,地表质点振速的峰值和持续时间越来越小,而频率越来越大。

(4) 本文建立了隧道掏槽孔爆破未开挖段上方的地表振动预测方法,但是对于隧道掘进已开挖段地表质点振动波形没有进行分析,对于已开挖段地表振动效应还待进一步研究。

参考文献:

- [1] DE HOOP A T. Theoretical determination of the surface motion of a uniform elastic half-space produced by a dilatational, impulsive, point source[C]// La Propagation des Ebranlements dans les Milieux Hétérogènes. Marseille: Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, 1961(111): 21 - 30.
- [2] E. И. 舍米亚金. 弹塑性理论的动力学问题[M]. 戚承志,译. 北京: 科学出版社, 2009. (SHEMYAKIN E I. Dynamic problems of elasto-plastic theory[M]. QI Cheng-zhi, tran. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [3] STARFIELD A M, PUGLIESE J M. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: a comparison between a computer model and field measurements[C]// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 1968: 65 - 77.
- [4] 顾宏伟, 赵燕明, 金 文. 柱状药包岩石中爆炸的数值模拟[J]. 工程爆破, 2007, 13(1): 24 - 27. (GU Hong-wei, ZHAO Yan-ming, JIN Wen. Numerical simulation of

- explosion with cyl inder charge in rock[J]. Engineering Blasting, 2007, **13**(1): 24 - 27. (in Chinese))
- [5] BLAIR D P, JIANG J J. Surface vibrations due to a vertical column of explosive[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, **32**(2): 149 - 154.
- [6] 张继春, 曹孝君, 郑爽英, 等. 浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(22): 4158 - 4163. (ZHANG Ji-chun, CAO Xiao-jun, ZHEN Shuang-ying, et al. Experimental study on vibration effects of ground due to shallow tunnel blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(22): 4158 - 4163. (in Chinese))
- [7] 高文学, 颜鹏程, 李志星, 等. 浅埋隧道爆破开挖及其振动效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **32**(增刊 2): 4153 - 4157. (GAO Wen-xue, YAN Peng-cheng, LI Zhi-xing, et al. Blasting excavation and vibration effects of shallow tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **32**(S2): 4153 - 4157. (in Chinese))
- [8] 张自光, 仇文革, 陈瑜嘉. 花岗岩地层地铁隧道爆破施工地表振动效应随埋深变化规律研究[J]. 四川建筑科学研究, 2015, **41**(2): 115 - 119. (ZHANG Zi-guang, QIU Wen-ge, CHEN Yu-jia. Study on the law of vibration effects of ground resulted from blasting construction varying with buried depth of metro tunnels in granite stratum[J]. Sichuan Building Science, 2015, **41**(2): 115 - 119. (in Chinese))
- [9] 张超. 浅埋隧道爆破振动地表质点响应规律研究[J]. 公路, 2016, **61**(10): 246 - 250. (ZHANG Chao. Research on the response law of surface particle for shallow buried tunnel blasting vibration[J]. Highway, 2016, **61**(10): 246 - 250. (in Chinese))
- [10] 樊浩博, 邱军领, 谢永利, 等. 下穿村庄隧道爆破振动对地表建筑的影响[J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2016, **17**(3): 209 - 214. (FAN Hao-bo, QIU Jun-ling, XIE Yong-li, et al. Blast-induced ground vibration from tunnel under crossing a village[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Matural Science Edition), 2016, **17**(3): 209 - 214. (in Chinese))
- [11] 张震, 周传波, 路世伟, 等. 超浅埋地铁站通道爆破暗挖地表振动传播特征[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2017(8): 2119 - 2125. (ZHANG Zhen, ZHOU Chuan-bo, LU Shi-wei, et al. Propagation characteristics of ground vibration induced by subsurface blasting excavation in an ultra-shallow buried underpass[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017(8): 2119 - 2125. (in Chinese))
- [12] 王超, 周传波, 路世伟, 等. 城市暗挖隧道爆破地震波传播规律研究[J]. 科学技术与工程, 2017, **17**(6): 158 - 162. (WANG Chao, ZHOU Chuan-bo, LU Shi-wei, et al. Propagation pattern of blasting vibration in the surrounding rock of metro tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2017, **17**(6): 158 - 162. (in Chinese))
- [13] 王举. 隧道洞中爆破振动对地表影响的数值分析[J]. 土工基础, 2017, **31**(4): 443 - 448. (WANG Ju. Numerical analysis of the effect of blasting in tunnel on the vibration of the ground surface[J]. Soil Engineering and Foundation, 2017, **31**(4): 443 - 448. (in Chinese))
- [14] 费鸿禄, 曾翔宇, 杨智广. 隧道掘进爆破振动对地表影响的小波包分析[J]. 爆炸与冲击, 2017, **37**(1): 77 - 83. (FEI Hong-lu, ZENG Xiang-yu, YANG Zhi-guang. Influence of tunnel excavation blasting vibration on earth's surface based on wavelet packet ansysis[J]. Explosion and Waves, 2017, **37**(1): 77 - 83. (in Chinese))
- [15] 肖文芳, 李宇坤, 方凯明, 等. 地铁隧道钻爆施工地表振动速度特征研究[J]. 工程爆破, 2018, **24**(1): 72 - 77. (XIAO Wen-fang, LI Yu-sheng, FANG Kai-ming, et al. Study on vibration velocity effects of ground induced by metro tunnel drilling and blasting construction[J]. Engineering Blasting, 2018, **24**(1): 72 - 77. (in Chinese))
- [16] 焦永斌. 爆破地震安全评定标准初探[J]. 爆破, 1995, **12**(3): 45 - 47. (JIAO Yong-bin. Preliminary study on safety assessment criteria for blasting earthquake[J]. Blasting, 1995, **12**(3): 45 - 47. (in Chinese))
- [17] 唐春海, 于亚伦, 王建宙. 爆破地震安全判据的初步探讨[J]. 有色金属工程, 2001, **53**(1): 1 - 4. (TANG Chun-hai, YU Ya-lun, WANG Jiang-zhou. Elementary study of safety criterion for blasting vibration[J]. Nonferrous Metals, 2001, **53**(1): 1 - 4. (in Chinese))
- [18] 傅洪贤, 赵勇, 谢晋水, 等. 隧道爆破近区爆破振动测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(2): 335 - 340. (FU Hong-xian, ZHAO Yong, XIE Jin-shui, et al. Study of blasting vibration test of area near tunnel blasting source[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(2): 335 - 340. (in Chinese))