

DOI: 10.11779/CJGE202010004

隧道掘进爆破诱发隧道后方开挖段地表振动效应分析

陈士海^{1,2}, 刘小鸣¹, 张子华¹, 林从谋¹

(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: 针对目前在隧道已开挖区段地表振动效应理论研究的不足, 从理论方面对隧道的地表振动效应进行了研究, 并利用现场实测数据加以验证和分析。首先, 对隧道掘进爆破模型进行简化, 将掏槽孔的爆破简化为一系列球形药包的爆破, 再利用保角映射将隧道已开挖段地表质点的振动问题转化为半空间内一系列球形药包的地表振动问题, 最终得出已开挖段地表质点的振动速度计算方法。通过实际工程, 对比了理论和实测的隧道轴线振速峰值分布曲线, 验证了理论计算方法的可行性, 同时利用理论计算方法探讨了隧道埋深对隧道轴线振速峰值的分布规律, 发现隧道埋深较浅时, 已开挖段振速峰值大于未开挖段的现象较明显, 随着埋深的增加, 该现象逐渐消失。

关键词: 隧道; 爆破; 振动效应; 已开挖段; 振速峰值分布

中图分类号: TU94; TD235 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)10-1800-07

作者简介: 陈士海(1964—), 男, 教授、博士生导师, 主要从事岩土工程防灾减灾方面的研究工作。E-mail: cshblast@163.com。

Analysis of surface vibration effect on tunnel excavation section induced by tunneling blasting

CHEN Shi-hai^{1,2}, LIU Xiao-ming¹, ZHANG Zi-hua¹, LIN Cong-mou¹

(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: In view of the shortage of theories on the surface vibration effect in the excavated section of the tunnel, the surface vibration effect of the tunnel is analyzed based on theoretical and field measured data. Firstly, the blasting model for a tunnel is simplified, and the blasting of cut holes is simplified to a series of spherical charge blasting. Then the surface vibration in the excavated section of the tunnel is transformed into the surface vibration of spherical charge by conformal mapping. Finally, the method for calculating the vibration velocity of surface particles in the excavated section is obtained. Through practical projects, The feasibility of the theoretical method is verified by comparing the theoretical and measured peak velocity distribution curves. The distribution laws of the tunnel depth on the peak velocity of the tunnel axis are discussed by using the theoretical method. It is found that when the tunnel depth is shallow, the peak velocity of the excavated section larger than that of the unexcavated section is obvious. With the increase of the depth, the phenomenon gradually disappears.

Key words: tunnel; blasting; vibration effect; excavation section; distribution of peak vibration velocity

0 引言

随着城市化建设的加快, 土地资源越来越匮乏, 从而地下工程的建设项目越来越多, 特别是城市地下交通项目。钻爆法因其对地质条件适应性强, 开挖成本低等优点, 目前仍然是隧道建设的主要施工方法之一。然而, 随着爆破环境越发复杂, 居民对爆破引起的建筑物损伤越发重视, 爆破引起的地表振动波形预测方法也应与时俱进, 预测结果需更加全面、精确。故需要对隧道爆破掘进引起的地表振动进行研究, 特别是已开挖区上方的地表振动。

随着隧道工程项目的增加, 工程中遇到的问题也

越来越多, 故相应的研究成果也越来越多。张自光等^[1]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; 张震等^[2]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^[3]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

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672112, 51974136); 华侨大学科研基金项目(13BS402)

收稿日期: 2020-01-06

律进行研究。樊浩博等^[4]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。

虽然这些研究成果对隧道爆破工程具有一定的指导作用, 但都是针对隧道未开挖区段的, 而对已开挖区段上方地表质点的振动研究较少。

张继春等^[5]、郭建群等^[6]是最早发现已开挖段与未开挖段地表质点振速存在不同, 他们根据现场爆破试验数据, 发现已开挖区形成的空洞会导致其上部地表的振动速度大于未开挖部分振动速度的现象, 并将其定义为“空洞效应”, 并得出隧道已开挖区不符合萨道夫斯基公式的结论; 许海亮^[7]也通过现场试验发现成形隧道会对地表振动速度存在不同程度的放大作用, 且其放大倍数在1.3~3倍之间; 曹孝君^[8]提出振速放大系数和振速差值两个指标定量描述空洞效应特点的方法, 并研究了空洞效应的几个影响因素; 冯阳阳^[9]根据现场试验发现无论掌子面前方未开挖区还是掌子面后方已开挖区, 随着测点到掌子面水平距离的增加, 其振速都呈减小的趋势, 但开挖区地表测点的振速大于未开挖区的振动速度; 邹新宽等^[10]采用等效荷载施加方法对浅埋隧道的地表振动进行数值模拟, 得出已开挖的隧道空洞对地表振动强度有一定的放大作用; 刘光汉等^[11]根据现场试验发现浅埋隧道掘进爆破产生的爆破振动存在“空洞效应”, 且随着爆心距的变化, 测点振动速度放大系数呈先增大后减小的趋势; 肖文芳等^[12]在现场监测数据中发现已开挖区的振速放大效应, 再利用数值模拟对隧道掘进过程中的地表振动效应进行研究, 也得出已开挖区形成的空洞对地表振动速度产生放大现象的模拟结果。王海亮等^[13]通过现场试验发现掌子面后方存在空洞放大效应, 且受装药量、自由面、空顶距等因素影响, 掏槽区放大系数1.1~1.6, 辅助2区放大系数1.2~1.8, 而辅助1区掌子面前方振速大于后方振速。由此可知, 隧道已开挖区段的放大效应大多是通过现场试验监测到的, 少部分学者通过数值模拟也得到了这种放大效应, 但总体来说已开挖区的放大效应研究较少, 且研究方法单一, 还需在理论方面进一步研究。

综上所述, 目前已开挖区段的地表振动研究相对较少, 且主要是通过分析现场实测数据进行的, 少数也利用数值模拟进行了相应的研究, 但始终没有在理论方面进行分析, 没有提出对应的计算方法, 得不到已开挖区段地表质点的振速。故本文从理论出发, 对隧道掘进中爆破引起的已开挖区段地表质点振动速度进行预测, 提出已开挖区段地表质点振速计算方法, 并根据实际工程案例, 探讨“空洞效应”产生的振速

放大现象。

1 隧道理论模型

在研究隧道爆破掘进中引起的地表质点的振动响应时, 根据地表质点与掌子面的相对位置, 可将地表质点的振动分为两种情况, 第一种是掌子面前方未开挖区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1所示。

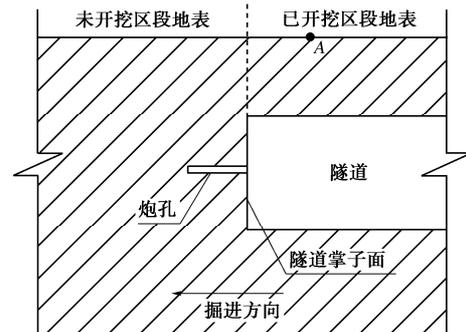


图1 隧道掘进状态图

Fig. 1 Diagram of tunneling state

不管是研究未开挖区段还是已开挖区段的地表质点振动, 对于理论模型而言, 掌子面处的炮孔相对较多且孔与孔的间距也相对较小, 导致理论模型太过复杂, 实现不了后续推导, 故需要根据本文的研究内容进行相应的模型简化。

由于掏槽孔需要为扩挖孔的爆破创造一个新的临空面, 其装药量一般较多, 同时由于其只有掌子面这一个临空面, 故爆破过程中地表振速最大值一般都出现在掏槽孔爆破时, 这与大量的工程监测数据得出的结论也一致, 同时本文的研究重点也是爆破引起的地表振动, 故选择隧道掘进中装药量最大的一段掏槽孔引起的地表振动进行研究。

虽然装药量最大的一段掏槽孔是由多个炮孔组成的, 但掏槽孔之间的间距较小, 且远小于到其到地表振动预测点的距离。故本文借鉴傅洪贤等^[14]利用简化药包研究隧道中导洞爆破的方法, 利用简化药包研究装药量最大的一段掏槽孔爆破引起的地表振动波形。即, 在装药长度和总药量不变的条件下, 将同时起爆的一组掏槽孔简化为单孔柱状药包, 即为简化药包, 继而将一组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。

在此基础上, 再将单孔柱状药包转化为 m 个等效球形药包的叠加进行分析, 转化原则为: 在总装药量不变的情况下, 等效球形药包的叠加后的总长度仍等于柱状药包长度, 故有 $r_c = \sqrt{6}r_c / 2$, r_c 为等效球形药包半径, r_c 为柱状药包半径, 等效球形药包的质量为

q_e ，堵塞长度为 l_1 ， x_i 为起爆点到第 i 个等效球形药包中心的距离， i 为 $1\sim m$ 的自然数，如图2所示。

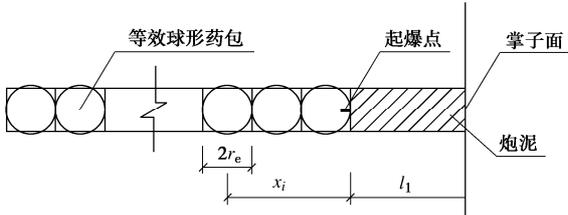


图2 柱状药包叠加图

Fig. 2 Overlay chart of column charge

再分别将图2中的每一个等效球形药包单独放在隧道模型中进行分析，如图3所示，等效球形药包 i 是指第 i 个起爆的等效球形药包，等效球形药包之间的相互作用通过等效球形药包的振速函数来体现。等效球形药包 i 爆炸会引起未开挖区段地表质点 A' 和已开挖区段地表质点 A 的振动，再将所有等效球形药包引起的振速进行叠加，即可得到单孔柱状药包爆破引起的地表质点 A' 和 A 处的振动波形，最终得到隧道掘进爆破引起的地表振动波形。

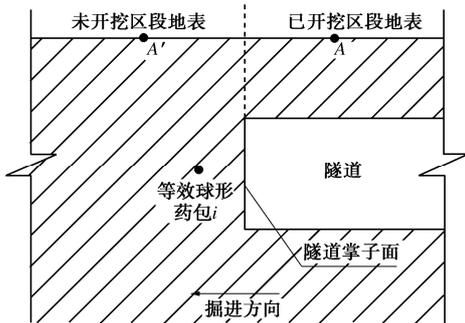


图3 隧道掘进中的等效球形药包

Fig. 3 Equivalent spherical charge in tunnelling

2 未开挖区段地表振速

对于未开挖区段的地表质点 A' 而言，隧道掘进爆破产生的振动波的传播不受隧道空洞的影响，振动波的传播过程与半空间介质内相似，而对于半空间内球形药包而言，根据笔者的前期研究可知，半空间内实际岩石介质中球形药包的地表振速波形函数^[15]为

$$v(t) = k(\sqrt[3]{Q}/R)^\alpha e^{-2\beta t} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中 Q 为装药量 (kg); R 为爆心距 (m); 衰减指数 $\beta = 100 - \text{RMR}$ ， β 值与岩体类别的关系见表1; 频率 $f = 2k(\sqrt[3]{Q}/\lg R)^{\alpha-1}$; k ， α 为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数，岩石中： $k = 30\sim 70$ ，土壤中： $k = 150\sim 250$ ，对于风化岩石， $k = 70\sim 150$ ，其中风化越严重 k 取值越大，而对于 α 值，不论岩石还是土壤， $\alpha = 1\sim 2$ ，其中，岩体越坚

硬 k 和 α 取值越小。

表1 各级岩石的 β 取值

Table 1 Values of β of rock at each level

参数	岩体类别				
	I	II	III	IV	V
RMR	81~100	61~80	41~60	21~40	0~20
β	0~19	20~39	40~59	60~79	80~100

再根据笔者前期的研究成果^[16]可知，柱状药包的第 i 个等效球形药包引起的地表质点的振速函数为

$$v_i(t) = k \frac{[i^{\alpha/3} - (i-1)^{\alpha/3}] q_e^{\alpha/3}}{R_i^\alpha} e^{-2\beta(t-t_i+t_1)} \sin \left[\frac{1}{6} \times 4\pi k \left(\frac{\sqrt[3]{q_e}}{\lg R_i} \right)^{\alpha-1} (t-t_i+t_1) \right] \quad (2)$$

式中， $t_i = x_i/c_D + R_i/c_p$ ，为从起爆到第 i 个等效球形药包产生的冲击波传到地表质点的总时间， c_D 表示炸药爆轰速度； c_p 为P波在介质中的传播速度； R_i 为等效球形药包 i 至地表预测点的距离，式中其余变量与前文定义相同。

最后，将柱状药包所划分的 m 个等效球形药包在地表质点 A' 的速度波形进行叠加，即可得到任意时刻简化柱状药包爆炸引起的隧道未开挖区段地表质点 A' 的振动速度函数为

$$v_c(t) = \sum_{i=1}^m v_i(t) \quad (3)$$

3 已开挖区段地表振速

对于已开挖区段的地表质点 A 而言，由于地表质点下方隧道空洞的影响，无法直接根据上述方法直接得到质点 A 的振速。故本文通过先求出位于已开挖段隧道上顶面 B 点的振速，再根据 B 点的振速最终得出已开挖区段地表质点 A 的振速，如图4所示，图中， h 为地表至隧道上顶面的距离， y_i 为等效球形药包 i 至隧道掌子面的距离， r 为隧道开挖半径。

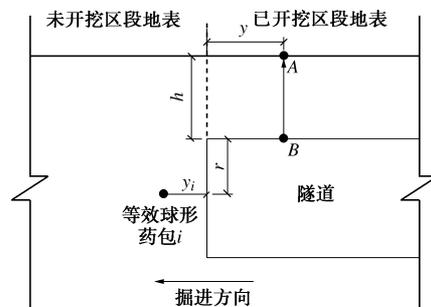


图4 已开挖区段振速模型

Fig. 4 Vibration speed model for excavated section

为了得到等效球形药包 i 到隧道上顶面 B 点的等效直线传播距离，对模型进一步简化，在分析 B 点的

振动效应时, 暂不考虑地表自由面和隧道空洞底部的影响, 建立如图 5 所示的模型和坐标系, 图中 y 为质点 B 到掌子面的距离。

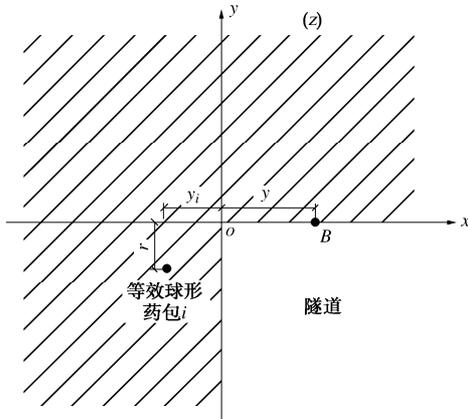


图 5 z 平面上的隧道简化模型

Fig. 5 Simplified model for tunnel on z plane

接着再利用复变函数中的保角映射将图 5 中等效球形药包 i 爆破引起的 B 点振动问题转化为半空间内等效球形药包 i 爆破引起的地表振动效应问题, 将复平面坐标系下具有复杂边界的 z 平面转化为具有简单边界的 w 平面, 如图 6 所示。

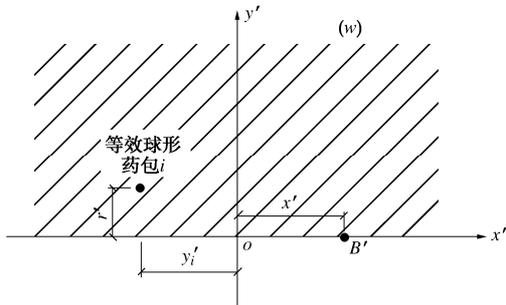


图 6 w 平面上的隧道简化模型

Fig. 6 Simplified model for tunnel on w plane

其中, 进行边界转化的保角映射为

$$w = z^{2/3} \quad (4)$$

z 平面下等效球形药包 i 坐标的指数形式为

$$z = \sqrt{y_i^2 + r^2} \exp \left[i \left(\arctan \frac{r}{y_i} + \pi \right) \right] \quad (5)$$

振动预测点 B 为 $z = y + 0i$ 。

经保角映射之后, w 平面中等效球形药包 i 的指数形式为

$$w = \sqrt[3]{y_i^2 + r^2} \exp \left[i \frac{2}{3} \left(\arctan \frac{r}{y_i} + \pi \right) \right] \quad (6)$$

振动预测点 B' 为 $w = y^{2/3} + 0i$ 。

故可知

$$y'_i = \sqrt[3]{y_i^2 + r^2} \cos \left(\frac{\pi}{3} - \frac{2}{3} \arctan \frac{r}{y_i} \right) \quad (7)$$

$$r' = \sqrt[3]{y_i^2 + r^2} \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{2}{3} \arctan \frac{r}{y_i} \right) \quad (8)$$

$$y' = y^{2/3} \quad (9)$$

则, w 平面中的等效球形药包 i 到振动预测点 B' 的距离, 也即等效球形药包 i 到隧道上顶面质点 B 的等效直线距离为

$$R'_i = \sqrt{\left[y^{2/3} + \sqrt[3]{y_i^2 + r^2} \cos \alpha \right]^2 + \left[\sqrt[3]{y_i^2 + r^2} \sin \alpha \right]^2} \quad (10)$$

式中, $\alpha = \frac{\pi}{3} - \frac{2}{3} \arctan \frac{r}{y_i}$ 。

虽然振动波由 B 传 A 之后, 在 A 和 B 之间还会继续发生反射, 但考虑隧道的埋深和反射时振动波的衰减, 振动波在地表发生叠加时对振速的影响已经较小了, 且振动波在自由面反射过程中的衰减较为复杂, 很难用具体的公式进行表达, 故本文不考虑波在地表与隧道上顶面的反射叠加作用。同时, 简化考虑 B 点到 A 点的距离 h , 直接将 h 与 R'_i 组合起来, 共同组成等效球形药包 i 到已开挖区段地表质点 A 的等效传播距离 R_i , 故第 i 个等效球形药包至已开挖区段地表质点 A 的等效直线传播距离为

$$R_i = R'_i + h \quad (11)$$

最后将等效直线传播距离 R_i 和爆破参数代入地表振速波形函数式 (2), (3) 中, 即可得到简化柱状药包引起的已开挖区段地表质点 A 的振动速度, 也即隧道掏槽孔爆破引起的已开挖区段地表质点 A 的振动速度。

4 工程案例计算与讨论

以厦门抽水蓄能电站进场通风兼安全洞钻爆法掘进工程为背景, 进行隧道轴线地表振速峰值分布规律的讨论。

厦门抽水蓄能电站通风兼安全洞的围岩类型为晶屑熔结凝灰岩, 地质构造简单, 断层不发育, 围岩呈弱—微风化, 岩体较完整为主, 围岩类别为 III 类。隧道断面采用 2 圆拱直墙的城门洞型, 开挖断面尺寸为 $7.2 \text{ m} \times 7 \text{ m}$, 隧道上顶面到地表的距离为 50 m 。采用的是 2 号岩石乳化炸药, 雷管采用的是半秒第 2 系列, 炸药采用的是乳化炸药, 密度为 1100 kg/m^3 , 爆速为 3500 m/s 。隧道围岩的泊松比为 0.24 , 弹性模量 E 为 62 GPa , 密度为 2700 kg/m^3 。钻孔深度 2.5 m , 装药长度为 1.5 m , 炮泥长度为 1 m , 掏槽孔最大装药量为 20 kg 。

在隧道爆破掘进过程中，进行了多次爆破振动测试，每次布置 5~8 个测点，采用的都是成都中科测控有限公司生产的 TC-4850 爆破测振仪。所有的测振仪器都布置在隧道轴线上方的地表上，掌子面正上方布置一台，隧道已开挖段上方和未开挖段上方对称布置 2~4 台，图 7 为测振仪器现场布置图的部分测点。

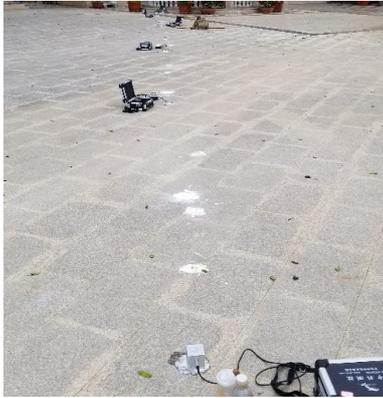


图 7 测振仪器部分测点布置图

Fig. 7 Layout of partial measuring points of vibration measuring instruments

根据第 1 节中模型的简化方法可知，本工程掏槽孔的爆破可简化为半径为 0.062 m，长度为 1.5 m 的简化柱状药包，并且，该简化柱状药包又可划分为 10 个半径为 0.076 m 的等效球形药包，单个等效球形药包质量为 2 kg。同时，根据该工程的岩石参数，可取 $k=120$ ， $\alpha=1.6$ ， $\beta=50$ 。

故，可知：

$$x_i = 0.152 \times (i - 0.5) \quad (12)$$

$$y_i = x_i + 1 \quad (13)$$

未开挖区地表质点的爆心距：

$$R_i = \sqrt{[x_i - (x_i + l)]^2 + (h + 3.55)^2} \quad (14)$$

已开挖区地表质点的爆心距：

$$R'_i = \sqrt{\left[y_i^{\frac{2}{3}} + \sqrt[3]{y_i^2 + 3.55^2} \cos \alpha' \right]^2 + \left[\sqrt[3]{y_i^2 + 3.55^2} \sin \alpha' \right]^2} + 50 \quad (15)$$

式中， $\alpha' = \frac{\pi}{3} - \frac{2}{3} \arctan \frac{3.55}{y_i}$ 。

$$t_i = x_i / 3500 + R_i / c_p \quad (16)$$

$$v_i(t) = 120 \times \frac{[i^{1.6/3} - (i-1)^{1.6/3}] 2^{1.6/3}}{R_i^\alpha} e^{-100 \times (t - t_i + t_1)} \cdot \sin \left[80\pi \left(\frac{\sqrt[3]{2}}{\lg R_i} \right)^{0.6} (t - t_i + t_1) \right] \quad (17)$$

根据上述公式即可得出已开挖区和未开挖区地表质点的振速，即可绘出其隧道轴线上地表振速峰值分布图，同时与实测的振速峰值进行对比，如图 8，图

中横坐标值为 0 时表示柱状药包中心所对应的地表质点，横坐标值为负时表示隧道未开挖段地表，横坐标值为正时则表示隧道已开挖段地表。

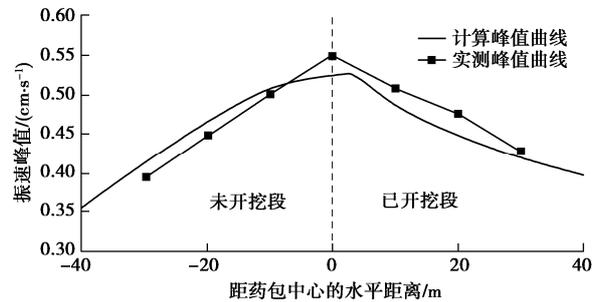


图 8 振速峰值分布对比图

Fig. 8 Comparison of distribution of peak velocity

从图 8 中可以看出，理论振速峰值与实测振速峰值较为吻合，验证了计算方法的正确性，同时图中理论和实测的已开挖段振速峰值都略大于未开挖段，与其他已开挖段隧道相关论文得出的结论相同。

在此基础上，根据本工程的岩石和装药参数，调整隧道埋深，利用理论公式绘出了不同埋深下已开挖段和未开挖段的振速峰值分布情况，如图 9。

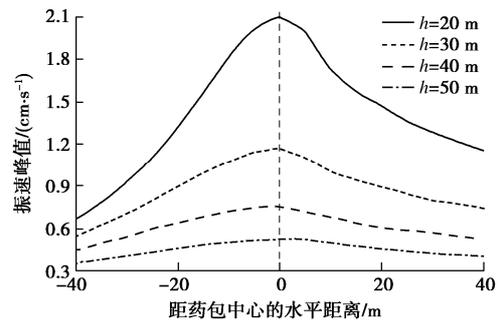


图 9 不同埋深下隧道轴线振速峰值分布图

Fig. 9 Distribution of peak vibration velocity along tunnel axis under different burial depths

从图9中可以看出，不同埋深下已开挖段地表质点振速峰值都略大于未开挖段，且随着隧道埋深的增加已开挖段的增大效果逐渐变小。

上述结果与大部分的实测振速峰值分布规律相同，随着爆心距的增加，已开挖段和未开挖段地表振速峰值都逐渐减小，且已开挖段地表振速峰值减小速率小于未开挖段，导致已开挖段地表振速峰值大于未开挖段，如图10中的第一组、第二组、第三组。该结论与冯阳阳^[9]根据现场实测得到的振速分布规律基本相同。由于本工程隧道埋深较大，已开挖段地表质点振速峰值仅仅略大于未开挖段。

但是，实测数据中还存在极少部分数据，如图10中的第四组振速峰值分布，随着爆心距的增加，未开挖段地表振速峰值逐渐减小，而已开挖段地表振速峰

值出现先增加后减小现象, 也致使已开挖段地表振速峰值大于未开挖段。

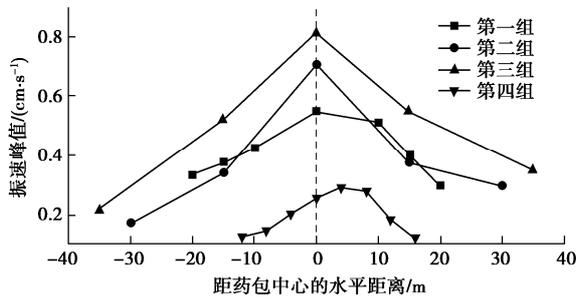


图 10 实测振速峰值分布图

Fig. 10 Distribution of measured peak velocity

对于本工程中偶尔出现的随爆心距增加已开挖段振速先增大后减小的现象, 可能是测点布置时在地表的测点定位不准或者未知的地质原因造成的。

5 结 论

(1) 本文通过实际岩石介质中球形药包的地表振速函数和复变函数的保角映射, 建立了隧道掘进中掏槽孔爆破引起的隧道未开挖段和已开挖段上方地表质点的振速计算方法。

(2) 通过对实际工程的分析, 对比了隧道轴线振速峰值分布的理论曲线, 验证了隧道已开挖段地表质点振速计算方法的正确性。

(3) 通过工程案例计算和实测数据, 分析了不同埋深情况下隧道轴线振速峰值的分布规律。

(4) 由于掌子面后方已开挖段存在隧道空洞, 影响了爆破振动波的传播路径, 同时增加了振动波在隧道上顶面和地表之间的相互叠加作用, 从而导致掌子面前、后方地表爆破振动速度不同。

(5) 虽然已经得到了隧道掘进爆破中地表振动效应的部分研究成果, 但本文在已开挖段地表振速理论解推导过程中进行了多次假设, 且没有考虑波在隧道上顶面和地表之间的相互叠加作用, 这些假设和简化都会对结果产生一定影响, 故要将其全面运用到实际工程中还需进行优化研究。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 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, **48**(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, **48**(8): 2119 - 2125. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 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 (Natural Science Edition), 2016, **17**(3): 209 - 214. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 郭建群, 张继春, 许海亮, 等. 人和场隧道掘进爆破的地震效应试验研究[J]. 中国铁道科学, 2003, **24**(4): 92 - 95. (GUO Jian-qun, ZHANG Ji-chun, XU Hai-liang, et al. Seismic effects on drive-blasting in renhechang tunnel[J]. China Railway Science, 2003, **24**(4): 92 - 95. (in Chinese))
- [7] 许海亮. 浅埋隧道掘进爆破地震效应试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003: 33 - 36. (XU Hai-liang. The Experimental Investigation on Seismic Effect of Shallow Tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003: 33 - 36. (in Chinese))
- [8] 曹孝君. 浅埋隧道爆破的地表震动效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006: 59 - 71. (CAO Xiao-jun. Study on Vibration Effects of Ground Resulted from Blasting in Shallow Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006: 59 - 71. (in Chinese))

- [9] 冯阳阳. 浅埋隧道爆破地表振动传播规律试验研究[D]. 成都: 西南科技大学, 2015: 21 - 27. (FENG Yang-yang. Experimental Study on Ground Vibration Propagation Law of Shallow Buried Tunnel[D]. Chengdu: Southwest University of Science and Technology, 2015: 21 - 27. (in Chinese))
- [10] 邹新宽, 张继春, 潘强, 等. 浅埋小净距隧道掘进爆破引起的地表振动特性模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(4): 646 - 651. (ZOU Xin-kuan, ZHANG Ji-chun, PAN Qiang, et al. Ground vibration analysis of shallow-buried and small-interval tunnel resulting from blasting by numerical simulation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(4): 646 - 651. (in Chinese))
- [11] 刘光汉, 周建敏, 余红兵. 浅埋隧道掘进爆破空洞效应研究[J]. 采矿技术, 2017, 17(5): 112 - 113. (LIU Guang-han, ZHOU Jian-min, YU Bing-hong. Study on cavity effect of blasting in shallow tunnel[J]. Mining Technology, 2017, 17(5): 112 - 113. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 王海亮, 陈吉辉. 隧道上台阶分区爆破振动规律[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 43 - 50. (WANG Hai-liang, CHEN Ji-hui. Vibration law of partition blasting in upper bench of tunnel[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(3): 43 - 50. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 刘小鸣, 陈士海. 隧道掘进中掏槽孔爆破引起的地表振动波形预测[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1731 - 1737. (LIU Xiao-ming, CHEN Shi-hai. Prediction of surface vibration waveform caused by cuthole blasting in tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1731 - 1737. (in Chinese))
- [16] 刘小鸣, 陈士海. 群孔微差爆破的地表振动波形预测及其效应分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 551 - 560. (LIU Xiao-ming, CHEN Shi-hai. Prediction and effect analysis of surface vibration waveform for group hole delay blasting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 551 - 560. (in Chinese))

2020年岩土工程西湖论坛一号通知

在广泛征求意见的基础上, 岩土工程西湖论坛(2020)的主题定为: 岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践, 并拟定于2020年10月24—25日(23日报到)在杭州花家山庄召开。建筑工程中基坑、地下工程中隧道和边坡工程中滑坡等工程事故, 大部分都涉及到地下水, 本次会议拟开展岩土工程地下水控制的新技术、新方法、新设备、新工艺等进行交流, 旨在促进我国岩土工程技术水平不断提升, 更好地为工程建设服务。会前将围绕该主题组织有关专家学者编写专著岩土工程西湖论坛系列丛书第4册《岩土工程地下水控制理论、技术及工程

实践》, 并在中国建工出版社出版。

会议主题: 岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践。

专题研讨会: 岩土工程西湖论坛(2020)。

出版专著: 将围绕该主题组织有关专家学者编写专著岩土工程西湖论坛系列丛书第4册《岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践》, 并在中国建工出版社出版。

联系人: 宋秀英电话: 0571-88208775; 邮箱: xysong2020@163.com; 网址: 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心http://www.zjdxyt.com。

(摘自《地基处理》)