DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0093-08

城市隧道穿越复合地层的合理微差时间间隔*

李 铮,何 川,汪 波,杨赛舟,郭新新
(西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室,四川 成都 610031)

摘要: 以莞惠城际项目的"上软下硬"复合地层条件为依托,结合现场测试数据,采用理论与数值分析相结合的手段,开展城市隧道穿越复合地层中合理微差时间间隔的研究。研究结果表明:复合地层中微差爆破效果较好,第 1、2 炮适宜的微差时间间隔为 50~70 ms;围岩条件相同,振动波形和主震相的持续时间均随着爆心距的增加而变长;而围岩条件变差时,振动波形更易出现波形叠加现象;随着微差时间间隔增加,第 1、2 炮产生的主震相逐渐分离,在 0~35ms 间降震率波动明显且整体上小于稳定降震率;在复合地层中,两测点爆心距相同时,成洞区上方测点受空洞效应影响显著,振速明显偏大。

关键词: 爆炸力学;微差时间间隔;振动波形;复合地层;降震效果;城市隧道
中图分类号: O383.1;U455 **国标学科代码**: 1303520;56045 **文献标志码**: A

在下穿各种构筑物的市政地下工程中,钻爆法由于成本低、专用设备少、不影响地面交通等特点被广泛采用[1-2]。爆破施工对地表既有建(构)筑物产生的振动影响,受到普遍重视,将振速作为控制爆破的重要指标。目前,能够有效控制振速大小的抗减震措施主要有掏槽(位置与结构形式)设置、微差爆破、预裂爆破及水压爆破等,其中微差是一种可控的"主观条件",对爆破过程中振速的影响至关重要[3-4]。然而,由于隧道爆破开挖过程中炸药性能、装药结构、地质情况等因素影响,对微差爆破在介质内部产生的物理力学现象还没有准确的认识和严密的理论。确定微差时间间隔常用新自由面假说、残余应力假说、最小抵抗线假说等,其依据均存在局限性[5-7]。考虑降震效果选取合理微差时间间隔,用以下两种观点可以解释:(1)不同微差时间起爆的炮孔产生的地震波相互干扰以降低振动影响;(2)不同微差时间起爆的炮孔产生的地震波主震相错开,从而达到理想减震效果。前者由于各段炮孔位置不同,即使对相同测点,各段地震波也存在不同的传播距离和时间,加上地质条件影响,相邻段位地震波相互干扰情况复杂,若盲目采用此观点选取合理微差间隔,可能导致振速出现随机增大;采用相邻炮孔产生的振速波形主震相在时间轴上无相互影响的方式,进行微差爆破降震较理想[8]。

在复杂地质条件下,微差产生的地震波主震相及波形变化规律、不同微差时间间隔的降震效果等均会对合理微差时间取值范围产生重大影响。但目前尚未见对上述问题的深入探讨。基于此,本文中,以在建的莞惠城际穿越复合地层段作为工程背景,结合现场测试数据,采用理论与数值分析相结合的手段,开展城市隧道穿越复合地层中合理微差时间间隔的研究,拟为类似工程爆破设计和施工提供参考。

1 工程概况

莞惠城际轨道交通项目线路全长约 97 km,区间结构形式复杂,隧道总长超过 80%,以中隔墙法微差爆破施工为主。覆土表层为第四系冲洪积的软塑至硬塑状黏性土,其下为稍密至中密的饱和砂类土,下伏基岩为强至弱风化混合片麻岩,岩体较破碎,节理裂隙发育。洞身上部主要穿越透水性强、无自稳能力、易坍塌的富水饱和砂土地层,下部多为整体性较差的全风化混合片麻岩,隧道区间围岩总体呈现出复杂、特殊的"上软下硬"复合地层特征。

* **收稿日期**: 2014-06-10; **修回日期**: 2014-07-25
基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金项目(U1134208);国家自然科学基金项目(51378434,51578456);国家科技支撑计划项目(2012BAG05B03);广东省交通运输厅科技项目(2012-02-032)
第一作者: 李 铮(1987—),男,博士研究生; **通讯作者**: 汪 波,ahbowang@163.com。

围岩分布包含Ⅲ～Ⅵ级，隧道最小埋深不足 9 m，多数区间属于浅埋，施工将不可避免的对上部既有构筑物产生影响。地表交通繁忙，建筑物耸立，隧道下穿地段房屋基础多为天然基础及人工挖孔桩基础，房屋多为中～低层框架结构及砖混结构，且部分房屋修建年代久远，已出现开裂、倾斜等病害，尽管采取了注浆加固措施，但爆破施工时仍需降低对地表的振动影响，严格控制房屋沉降，避免既有病害继续扩展或造成新的破坏。

2 岩体弹性波传播规律

岩体中传播的波分为体波和面波两类，面波在传播方向上衰减比体波慢，传播距离更大，在岩体表面（地表、节理裂隙等）波形中占主导地位，主震相往往由面波产生[9]。在莞惠城际项目中设计合理微差间隔时，主要考虑：(1)相邻炮孔爆破产生的主震相不叠加，此时得到微差最小时间间隔，为 τ_{min}；(2)对于振动控制，最理想情况是相邻爆破间完全无振速叠加，但由于所需微差时间间隔长，导致各炮间不存在相互作用，与微差爆破理念不符，由此得到微差最大时间间隔，为 τ_{max}；(3)相邻炮孔爆破后，后爆孔产生的初震相不与先爆孔产生的主震相叠加，此时微差时间间隔较合理，为 τ。由此可知，微差合理时间间隔的研究涉及的主要参数有爆心距（监测点到爆源的距离 R）和弹性波波速（纵波波速 v_P、横波波速 v_S、面波波速 v_R）。

根据莞惠城际区间复合地层条件，结合实际隧道围岩分级情况，利用岩石超声波参数测定仪及纵横波换能器测定，各级围岩波速判定见表 1。

表 1 不同围岩等级的波速

Table 1 Wave velocities of different levels surrounding rock

围岩等级	v_P/(km·s^{-1})	v_S/(km·s^{-1})	v_R/(km·s^{-1})
Ⅲ	2.5	1.47	1.35
Ⅳ	2.0	1.18	1.08
Ⅴ	1.5	0.88	0.81
Ⅵ	1.0	0.59	0.54

3 合理微差时间间隔研究

3.1 不同围岩段现场测试结果

为探明在不同围岩等级的复合地层中进行微差爆破时弹性波的特点及传播规律，并确定合理微差间隔，选取莞惠城际典型Ⅲ级和Ⅵ级围岩段微差爆破监测结果进行分析。依据爆破设计参数，雷管段位 1、3、5、7、9 的名义延时分别为 0、50、110、200、310 ms。典型Ⅲ级围岩段（见图 1(a)）隧道埋深 40 m，主频 62～111.1 Hz，最大段药量均为 12.0 kg；典型Ⅵ级围岩段（见图 1(b)）隧道埋深 18 m，主频 65.0～81.6 Hz，最大段药量为 7.2 kg。

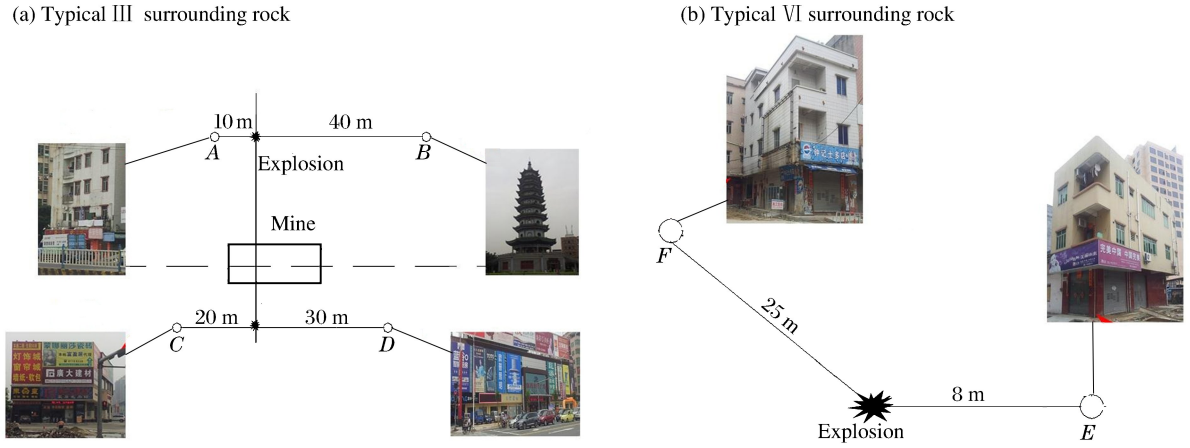

图 1 现场测点布置示意图

Fig. 1 Diagrammatic arrangement of measuring point on site

各监测点微差爆破前 300 ms 的振动波形，如图 2 所示。限于篇幅，仅列出测点 A、B、E、F 的波形，R 表示爆心距。由图 2 可见：(1)在围岩等级和微差爆破间隔时间相同时，随着测点爆心距增加，振动波形更易叠加，且爆心距增加幅度越大，波形主震相持续时间越长。(2)测点 F 出现了较明显波形叠加效应，而测点 A 各段位波形基本分离，结合前述爆心距的影响，当围岩条件变差时，振动波形更易出现叠加。(3)Ⅲ级围岩测点爆心距 R=45～60 m，波形持续时间 t_w≈100 ms(7 区基本能够反应一个完整的波形振动过程)，主震相持续时间 t_s=30～50 ms；Ⅵ级围岩测点爆心距 R=25～33 m，波形持续时间 t_w≥100 ms，主震相持续时间 t_s=25～40 ms。

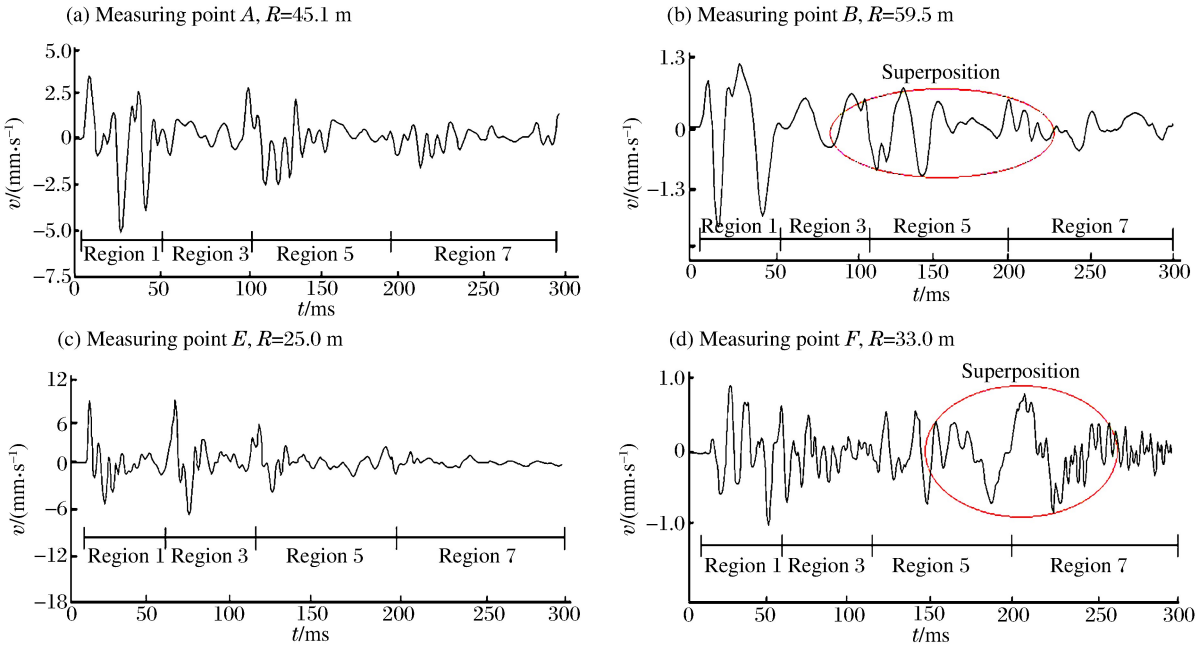

图 2　现场测点振动波形

Fig. 2　Vibration waveforms of measuring point on site

表 2　弹性波在不同围岩等级传播属性

Table 2　Transport properties of elastic waves of different levels of surrounding rock

围岩等级	R/m	v_P/(km·s^{-1})	v_S/(km·s^{-1})	v_R/(km·s^{-1})	t_P/ms	t_S/ms	t_R/ms	(t_R-t_P)/ms	t_s/ms	t_w/ms
Ⅲ	45	2.5	1.47	1.35	18	30.6	33.3	15.3	30	≈100
Ⅲ	60	2.5	1.47	1.35	24	40.8	44.4	20.0	50	≈100
Ⅵ	25	1.0	0.59	0.54	25	42.4	46.3	21.3	25	≈100
Ⅵ	33	1.0	0.59	0.54	35	59.3	64.8	29.8	40	＞100

由莞惠城际围岩波速和微差取值方案，不同围岩等级中弹性波的波形属性如表 2，微差时间间隔取值如表 3，其结果均符合波的传播及衰减规律。表中，$\tau_{min}=t_s$，$\tau=t_s+t_R-t_P$，$\tau_{max}=t_w$。参照微差爆破施工过程中振速不出现明显叠加(主震相在时间轴上分离)的原则，表 3 中的适宜时间差 τ=50 ms，即初步判定微差设计方案(雷管段位设计)较合理，能够使爆心距 R≈25 m 的监测点(据现场测试最大振速出现在此爆心距范围内)的主震相不出现明显的叠加效应。

表 3　微差时间间隔取值

Table 3　Values of microsecond time interval

围岩等级	R/m	τ_{min}/ms	τ/ms	τ_{max}/ms
Ⅲ	45	30	45.3	≈100
Ⅲ	60	50	70.0	≈100
Ⅵ	25	25	46.3	≈100
Ⅵ	33	40	69.8	＞100

3.2 计算模型

为验证现场分析所得微差时间间隔的合理性，研究穿越复合地层条件下的微差降震效果，选择工程中振速重点控制的Ⅵ级围岩段进行模拟分析，该区域地表房屋密集、埋深较浅、开挖影响大。为了详细描述不同微差时间间隔下爆破的叠加效应，选取掌子面上方地表侧向 20 m 范围为重点研究对象[10]，并考虑振速最大值的位置(位于已开挖区距掌子面 5～10 m 处地表，爆心距约 24 m)布置控制点(见图 3(a))。模型(见图 3(b))中，通过设置无反射条件(除地表为自由面外)，避免边界处波的反射对求解域的影响，并以此模拟无限大空间。模拟掏槽爆破及相邻段位掘进孔爆破，即实际爆破涉及的段位 1、3，设置两次微差时间间隔差为 0、2、5、8、10、15、20、30、40、50、70、100、150、200 ms，共 14 种工况。计算参数参考莞惠城际地勘资料、现场材料实验、规范，并结合岩体的动力学性质进行选取，见表 4。表中，E 为动弹性模量，ν 为泊松比，ρ 为密度。

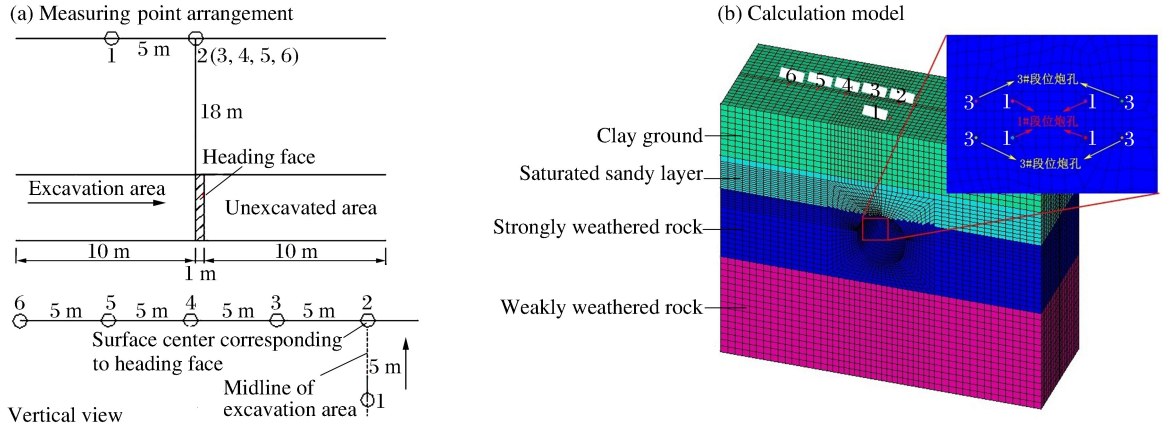

图 3 计算简图

Fig. 3 Calculation diagram

计算中，采用 Lagrange 法模拟炸药与岩体共用节点，通过 JWL 状态方程描述炸药[11]；不同段位药量按现场实际取值；考虑围岩失效情况，本构模型采用塑性动力学模型；为实现炸药作用时间及计算完整性，单孔爆破作用时间(三角荷载)为 112 ms[12]；模拟时对应耦合装药结构，但实际爆破设计为不耦合装药[13]。因此，依据两种装药结构在炮孔壁上产生的荷载值相等的原则，对炸药爆速进行折减，计算可知爆速为 1 200 m/s。

3.3 结果分析

根据现场对测点 F 的持续监测，该测点位于左线隧道开挖面后 5 m 左右时(对应图 3 中测点 1)出现最大振速，为 14.6 mm/s，如图 4 所示。

表 4 模型力学参数

Table 4 Mechanical parameters of the model

岩体类型	岩体名称	E/GPa	ν	ρ/(t·m^{-3})
软岩层	黏土类地层	0.3	0.35	1.950
软岩层	饱和砂土	0.5	0.33	2.095
硬岩层	全风化混合片麻岩	0.7	0.33	2.300
硬岩层	弱风化混合片麻岩	1.5	0.31	2.350

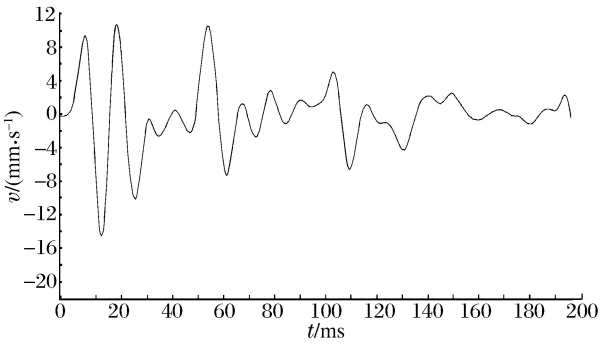

图 4 测点 1 现场实测振速波形

Fig. 4 Velocity waveforms of measuring point 1 on site

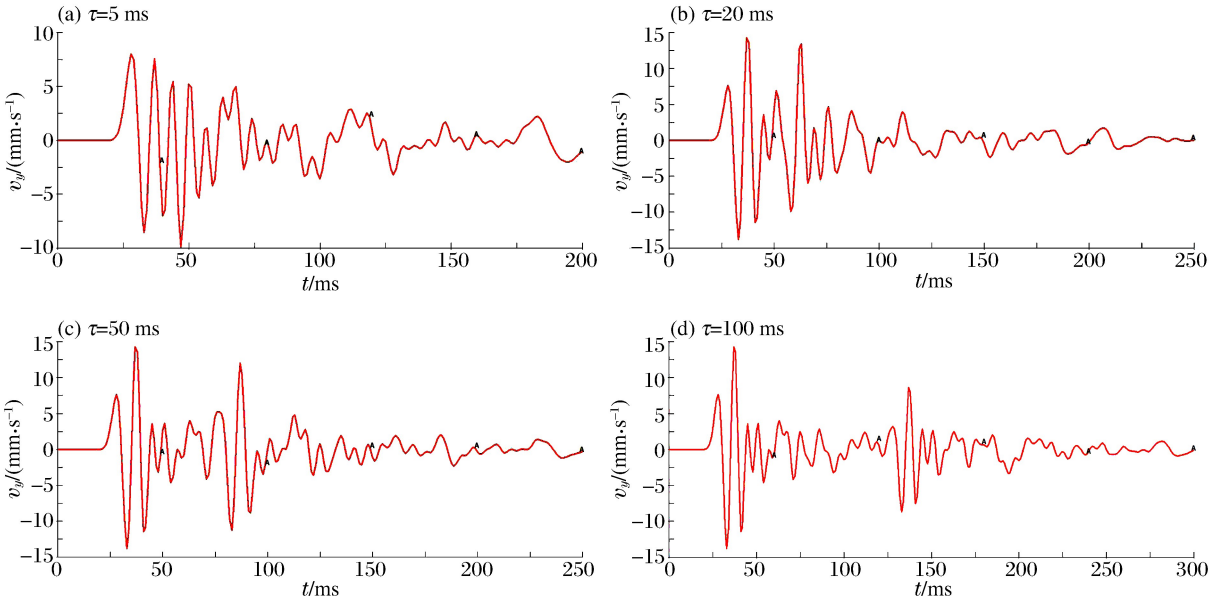

图 5　不同微差间隔下测点 1 的振速波形

Fig. 5　Velocity waveforms of measuring point 1 of different microsecond time interval

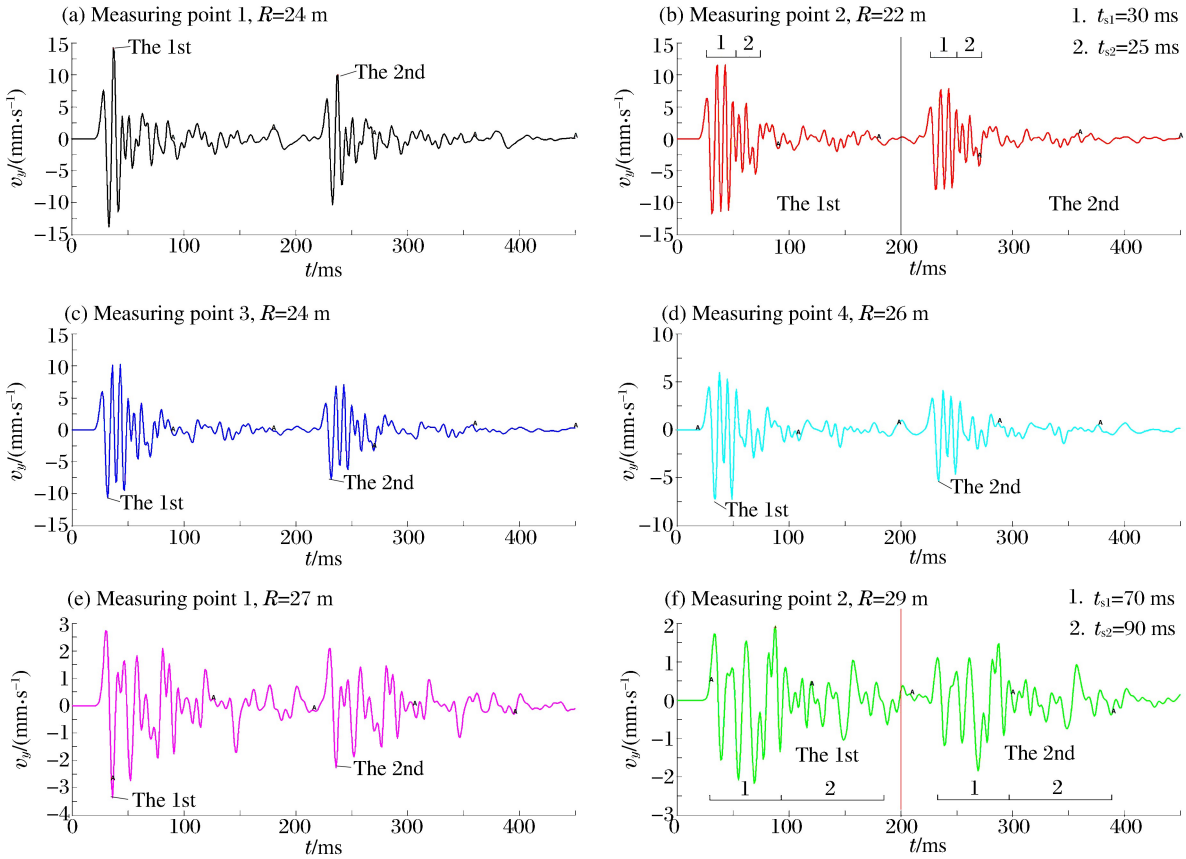

图 6　各测点振速波形(τ=200 ms)

Fig. 6　Velocity waveforms of measuring points

提取测点 1 在不同典型微差时间间隔下的垂向振速波形图，如图 5 所示。

对比图 4 与图 5(c)可知，现场实测与数值模拟获取的波形规律相似，最大振速、波峰波谷个数等均具有较好的耦合性。由图 5 可知：随着微差时间间隔增加，第 1、2 炮产生的主震相逐渐分离，波形叠加效应减弱；超过 20 ms 时，主震相已基本分离，此后时间对最大振速不会产生较大影响；20m s 时，第 2 炮产生的最大振速明显过大，表明主震相虽已分离，但与第 1 炮产生的余震相仍存在叠加；100 ms 时，波形已不存在明显叠加，两炮之间基本独立。

选取不发生振动波形叠加时(微差时间间隔 200 ms)的计算结果进行分析，各测点垂向振速波形见图 6，图中，t_{s1} 为主震相时间，t_{s2} 为余震相时间。第 1、2 炮各测点最大垂向振速见表 5。

表 5 各测点垂向最大振速(τ=200 ms)

Table 5 Maximum vibration velocities of measuring points

测点	v_y/(mm·s^{-1})	
	第 1 炮	第 2 炮
1	14.3	10.0
2	11.2	8.5
3	10.6	7.6
4	7.3	5.8
5	3.4	2.4
6	2.2	1.9

由图 6 和表 5 可知：在相同测点，第 1 炮产生的振速量值明显大于第 2 炮，即掏槽孔爆破对各质点振速影响最大，且各测点波形均未出现叠加，各炮产生的振动波形独立；穿越复合地层时，爆心距增大将导致主震相、余震相及波的持续时间增加，波形更易发生叠加，与现场实测波形分析结果相同；测点 1 和 3 爆心距相同，但其振速波形和量值均不同，已开挖土体上方的测点受空洞效应影响显著，振速明显大于测点 3，量值分别为 14.3 和 10.6 mm/s。

由图 7 可知，在复合地层中采用微差爆破效果明显好于普通爆破。当微差时间选择不当时，地表振速将超过工程安全控制标准 15 mm/s；合理间隔能使振速降低，但各测点适宜的微差时间间隔不同，如测点 5 在 40 ms 时振速变大，而测点 6 则降低；质点爆心距变大时(测点 5 和 6)，需更长微差时间间隔才能使振速“稳定”，主要原因是爆心距增大导致主震相持续时间变长，各炮之间更易叠加。

上述分析表明，每个测点均存在最适宜的爆破微差时间间隔。但实际工程中，在不同爆心距、地质条件、炮孔布置等因素影响下，相邻炮孔产生的振动波形不同，此时，理论的最适宜微差时间间隔无法应用。因此，针对隧道爆破开挖认为合理微差时间间隔的确定，以振速控制区内各炮振速稳定且波形不出现叠加效应为原则。为更好地描述微差时间间隔和降震之间的联系，引入“降震率”概念[14]：

$$\delta=\frac{v_0-v}{v} \tag{6}$$

式中：v_0 为齐发(微差时间间隔为零)爆破振动速度峰值；v 为不同微差时间间隔的速度峰值。

由图 8 可知：降震率在微差时间间隔 0～35 ms 间变化明显，但整体上小于稳定降震率；在振速较大且控制要求严格的测点 1～4，50 ms 时降震基本保持不变，超过 70 ms 时，各测点降震率均保持不变。因此，在本复合地层区间，微差时间间隔取 50～70 ms 较适宜，与现场测试结论基本吻合。

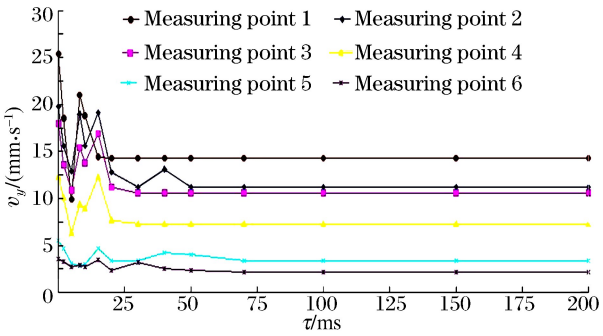

图 7 微差时间间隔与质点振动峰值速度关系曲线

Fig. 7 Curves of relation between microsecond time interval and peak particle velocity

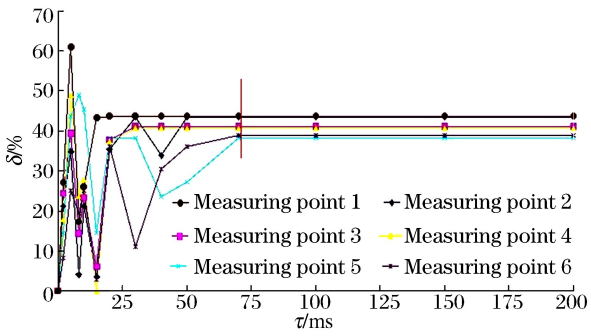

图 8 微差时间间隔与降震率关系曲线

Fig. 8 Curves of relation between microsecond time interval and reducing-vibration rate

4　结　论

(1)现场实测振动波形分析及数值模拟结论均表明，在莞惠城际项目“上软下硬”复合地层中微差爆破效果较好，第 1、2 炮适宜的微差时间间隔为 50～70 ms。

(2)围岩条件相同，振动波形和主震相的持续时间均随着爆心距的增加而变长；而围岩条件变差时，振动波形更易出现波形叠加现象。

(3)随着微差时间间隔增加，第 1、2 炮产生的主震相逐渐分离，20 ms 时波形仍与前炮余震相存在叠加，100 ms 时波形已基本独立。降震率在 0～35 ms 间变化明显，且整体上小于稳定降震率，70 ms 后各测点降震率均保持不变。

(4)在复合地层中，两侧点爆心距相同时，已开挖土体上方的测点受空洞效应影响显著，其振速明显偏大。

参考文献：

[1] 孟丹，朱崇钊. 地铁隧道钻爆法施工影响下混凝土结构损伤预测方法研究[J]. 振动与冲击，2014，33(4)：173-184.
Meng Dan, Zhu Chongzhao. Damage prediction method of a concrete structure due to tunnel blasting excavations [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(4):173-184.

[2] He Chuan, Wang Bo. Research progress and development trends of highway tunnels in China [J]. Journal of Modern Transportation, 2013,21(4) :209-223.

[3] 陈士海，燕永峰，戚桂峰，等. 微差爆破降震效果影响因素分析[J]. 岩土力学，2011，32(10)：3003-3008.
Chen Shihai, Yan Yongfeng, Qi Guifeng, et al. Analysis of influence factors of interference vibration reduction of millisecond blasting[J]. Rock and Soli Mechanics, 2011,32(10):3003-3008.

[4] 高晓初，吴从师，宋新辉. 露天矿台阶爆破合理微差间隔时间的研究与应用[J]. 爆炸与冲击，1992，12(4)：350-356.
Gao Xiaochu, Wu Congshi, Song Xinhui. An approach to reasonably selecting the delay interval of bench blasting and its use[J]. Explosion and Shock Waves, 1992,12(4):350-356.

[5] 袁文华，马芹永，黄伟. 楔形掏槽微差爆破模型试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(增 1)：3352-3356.
Yuan Wenhua, Ma Qinyong, Huang Wei. Model experiment and analysis of wedge-shaped cutting millisecond blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(suppl 1):3352-3356.

[6] 孙军杰，秋仁东，徐舜华，等. 微差爆破引发黄土场地强地面运动特征研究[J]. 岩石力学与工程学报，2011，30(增 2)：3728-3738.
Sun Junjie, Qiu Rendong, Xu Shunhua, et al. Characteristics of ground motion induced by a short delay blasting in loess field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(suppl 2):3728-3738.

[7] Zheng Junjie, Lou Xiaoming, Luo Depi. Vibration superposition in tunnel blasting with millisecond delay[J]. Journal of Southwest Jiaotong University (English Edition), 2009,17(1):42-46.

[8] 吴腾芳，王凯. 微差爆破技术研究现状[J]. 爆破，1997，14(1)：53-57.
Wu Tengfang, Wang Kai. Summary of current studies on millisecond blasting technique[J]. Blasting, 1997,14(1):53-57.

[9] 陈炜昀，夏唐代，刘志军，等. 平面 S 波在非饱和土自由边界上的反射问题研究[J]. 振动与冲击，2013，32(1)：99-103.
Chen Weiyun, Xia Tangdai, Liu Zhijun, et al. Reflection of plane-S-waves at a free boundary of unsaturated soil [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(1):99-103.

[10] 李景龙，李术才，李廷春，等. 隧道下穿既有铁路爆破的稳定控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(增 1)：3596-3600.
Li Jinglong, Li Shucai, Li Tingchun, et al. Research on construction control technology for blast in tunnel crossing existing railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(suppl 1):3596-3600.

[11] 赵铮，陶钢，杜长星. 爆轰产物 JWL 状态方程应用研究[J]. 高压物理学报，2009，23(4)：277-282.
Zhao Zheng, Tao Gang, Du Changxing. Application research on JWL equation of state of detonation products[J].

Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009,23(4):277-282.

[12] 姚勇,何川.并设小净距隧道爆破振动响应分析及控爆措施研究[J].岩土力学,2009,30(9):2815-2822.
Yao Yong, He Chuan. Analysis of blasting vibration response of parallel set small clear-distance tunnels and blasting control measures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(9):2815-2822.

[13] 易长平,卢文波.开挖爆破对邻近隧洞的震动影响研究[J].工程爆破,2004,10(1):1-5.
Yi Changping, Lu Wenbo. A study of the effect of blasting vibration on adjacent tunnel[J]. Engineering Blasting, 2004,10(1):1-5.

[14] 张袁娟,黄金香,袁红.缓冲爆破减震效应研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):965-973.
Zhang Yuanjuan, Huang Jinxiang, Yuan Hong. Study of shock absorption effect of buffer blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(5): 965-973.

Optimal microsecond time interval of urban tunnel passing through complex strata

Li Zheng, He Chuan, Wang Bo, Yang Saizhou, Guo Xinxin

(*Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 610031, *Sichuan, China*)

Abstract: In view of seismic-wave detection, laws of waveform change, and the vibration-reducing effect that different millisecond time intervals have on millisecond blasting in underground engineering, we conducted research on optimal microsecond time interval in the underground blasting for the construction of an urban tunnel passing through complex strata through theoretical and numerical analysis based on the so-called "a soft layer on top of a hard layer" soil condition found with the Guan-Hui inter-city expressway project and the related field test data. Our results show that the effect of millisecond blasting in the complex strata is preferable, the optimal microsecond time interval of the first and second guns is 50—70 ms; under the same surrounding rock conditions, the duration of the vibration waveforms and the main shock phases increase with the distance from the center of the explosion; meanwhile under the unfavorable surrounding rock conditions, the vibration waveforms are more likely to appear superimposed; with the increase of the microsecond time interval, the main shock phases of the first and second guns gradually separate, the vibration-reducing rate fluctuates significantly between 0 and 35 ms and is less than stable; in the complex strata, with the same distances from the center of the explosion at the two measuring points, the points above the hole area have significant influences with relatively greater vibration velocity.

Key words: mechanics of explosion; microsecond time interval; vibration waveform; complex strata; reducing-vibration effect; urban tunnel

(责任编辑 丁 峰)