

临近隧道爆破研究的现行问题分析

冯 义¹ 赵先鹏² 马菖林² 陈寿根¹

(1 西南交通大学土木工程学院 成都 610031; 2 长安大学地质工程与测绘学院 西安 710000)

摘 要 随着国内交通运输的迅猛发展,各种隧道工程大量上马,不可避免地出现两条或多条隧道临近施工。而爆破在隧道建设中具有重要的地位,它是隧道开挖过程中的首要工序,直接影响隧道的工程质量,造价和工期。文章论述了国内临近隧道爆破研究现状,临近隧道爆破振动特性,减振措施和装药量的选择,爆破安全监测,数值模拟及装药机械的现状和发展。总结了现行一些典型的临近隧道爆破振动特性,分析了临近隧道所采取的控制爆破措施。

关键词 隧道 爆破 研究现状 控制要点 装药机械

1 研究现状

我国在隧道建设中主要采用单洞双车道、3 车道型式,随着交通量的进一步加大,单洞已不能满足交通需要,双洞临近隧道不断增多。另外,伴随高速铁路的大量上马,双线隧道和复线的修建势在必行,此类隧道断面较大,多远离城市,对周围建筑物的扰动较小,通常采用爆破进行开挖。

按力学性质,将临近隧道的关系分为 4 组,如图 1 所示:隧道左右并列,隧道上下重叠,隧道斜向交错,隧道空间交叉或扭转。

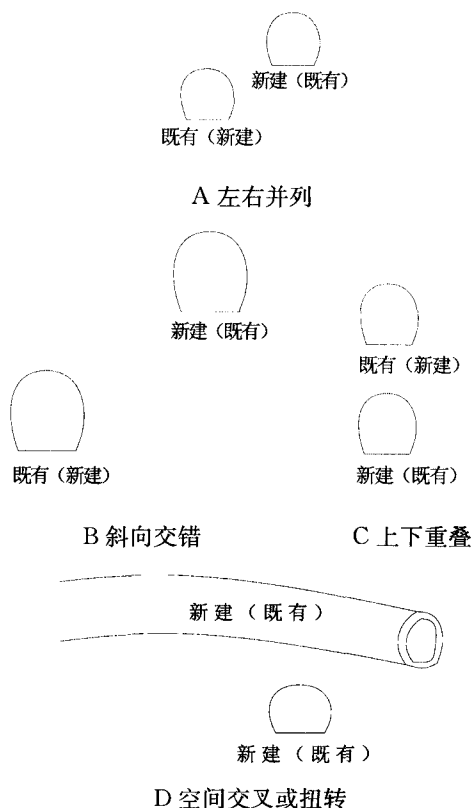


图 1 临近隧道的 4 种位置关系

临近隧道爆破的主要研究方向有临近隧道爆破振动监测研究,爆破装药量的确定,爆破数值模拟及控制爆破等。爆破振动控制是小净距隧道施工面临的关键问题之一,也是现在研究的重点。目前,爆破振动控制标准并未统一,现行各类小净距隧道爆破开挖震动标准过于保守,导致超挖现象严重,此类问题需要进一步研究确定。以下是各科研机构和研究人员进行各项代表性研究成果:

(1)国内对隧道爆破进行了大量的振动监测。林从谋、陈礼彪等^[3]以国内罕见的大帽山隧道为工程背景,研究了新建隧道爆破施工时确保既有运营隧道安全稳定的控制技术。以现代信息化施工理论为依据,充分运用现场监控量测,将既有隧道质点振动速度的临界值确定为 20 cm/s;龚建伍、夏才初等^[8]结合福州国际机场高速公路鹤上 3 车道小净距隧道工程实践,对小净距隧道中间岩柱在爆破荷载作用下的振动响应进行相关监测,分析振动波在不同级别围岩、不同监测位置的传播及分布规律,最大振动速度出现在迎爆侧边墙测点的径向方向,可将其作为爆破振动的控制速度;王成、刘礼标^[7]以重庆寸滩小净距隧道开挖为工程依托,在隧道施工爆破过程中对邻近隧道进行爆破振动监测,应用萨道夫斯基经验公式对现场监控量测数据进行回归分析,确定爆破应力波在泥质砂岩中的传播衰减规律;陈连进^[6]为研究小净距隧道爆破对工作面前后中间岩柱的影响规律,结合泉厦高速公路扩建工程大坪山隧道振动监测,对小净距隧道中间岩柱的振动响应及累积损伤进行测试研究,得出爆破地震波在小净距隧道中间岩柱衰减公式,分析了距离掌子面不同位置爆破地震波特性规律。

实际爆破振动测试中,由于测试动应力、动应变等参数较为困难,而测试爆破振动速度、加速度等参

数较为容易,建立速度与应力的关系,以测速度来控制应力状态,将大大增加现场监控的可行性,降低现场测试难度。

(2)为了人员和仪器的安全,一般不能进行爆破核心区域的现场测试,此时通过爆破数值模拟,可以方便、准确的解决这一问题。谭忠盛、杨小林、王梦恕^[11]分析了复线隧道施工爆破对既有隧道的影响因素,论述了采用有限元法分析爆破振动效应的原理及方法。何川等^[4]通过大量二维、三维数值模拟计算,分析了围岩、净距、埋深等条件对小净距隧道爆破振动特性的影响,研究了先行隧道不同支护体系、不同中岩墙加固措施及后行隧道不同施工方案等情况下,小净距隧道中后行隧道爆破开挖对先行隧道的影响;毕继红、钟建辉等^[5]运用有限元基本理论,采用 ANSYS 软件对既有隧道受邻近隧道爆破震动影响进行了研究。分别就不同围岩类型、不同隧道间距情况下既有隧道的振动进行了分析;余超、梁波等^[9]在分析国内外爆破振动理论的基础上,阐述根据具体工况,有针对性地引入振动速度、振动时间等多种参数进行分析,且以兰渝线关子岭特大断面隧道爆破为依托,应用数值分析方法,模拟特大断面隧道爆破振动对周边建筑物的影响。

(3)优化爆破参数。杨年华、张志毅等^[10]结合开元寺隧道和杭州引水隧洞钻爆掘进中的爆破振动测试和分析,发现这两个埋深 25 m 左右的隧道掘进中,掏槽爆破产生的地表振动最为强烈。证明了采用多级复式楔形掏槽可以有效降低爆破振动,同时利用高精度延时雷管或数码电子雷管调整掏槽爆破起爆时差,可以实现振动波错峰减振,并能改善掏槽效果,提高炮孔利用率。林从谋、陈礼彪等^[3]在对既有隧道爆破质点振动速度进行监测、回归分析后,进行爆破参数的优化,并且进行爆破监测,优化后的最大装药量等爆破参数设计合理,总装药量减少了 34%,炮眼个数和毫秒雷管数减少了 27%,节省了一次爆破材料,并且未对既有隧道安全产生较大影响。

2 爆破控制要点

2.1 爆破振动特性

国内对振动爆破特性研究较多,大多通过监控量测后得出相关规律,新建隧道开挖爆破产生的震动对既有隧道衬砌迎爆侧影响最大,其振动速度明显高于其他部位,是最危险的部位。影响爆破振动的主要原因有围岩级别、掘进进尺、装药量和开挖方

式,地质条件等。

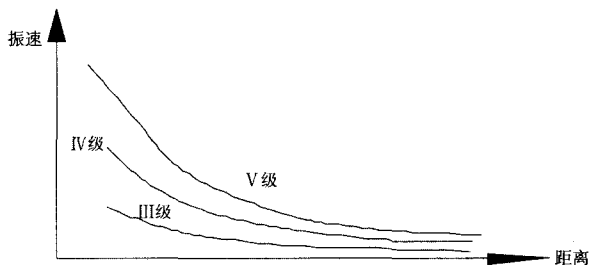


图2 围岩和距离与振速关系

一般来说,围岩状况越好,振速越小,衰减越快,而且距离爆源越远,不同级别下围岩的振速越小,围岩和距离与振速关系的一般示意图如图2所示。图中可以看出,当两临近距离比较大的时候,围岩振动速度已经不受距离的影响,不再发生变化。这个临界距离受到既有和在建隧道的开挖断面、地质条件和相应支护条件的制约,需要根据实际情况加以确定。掘进进尺控制工程进度,约束了投放炸药总量,也是施工中重要的一环,不同级别围岩振动随进尺的一般变化关系如图3所示。

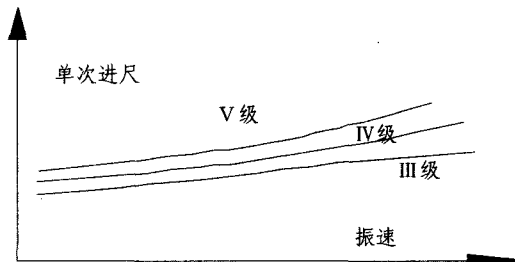


图3 不同级别围岩振动随进尺的变化

另外,爆破振动破坏程度还取决于结构物与围岩的刚度耦合程度,相对刚度过大不利于结构物的抗振动性能,围岩与衬砌连接柔性过渡带,会降低爆破振动对二次衬砌的损害。

2.2 减振措施和装药量选择

如何控制新建隧道的爆破开挖对相邻隧道或建筑物的影响,保证既有隧道运营安全是临近隧道施工的难点。实际施工中可以控制的关键参数就是爆破振动速度,这也是现在临近隧道爆破的研究重点。理论上,应坚持按照“短进尺、弱爆破、快支护、早衬砌”的施工原则,限制最大单段装药量,控制爆破振动速度,确保隧道围岩的稳定。

隧道爆破主要方式有光面爆破、预裂爆破、毫秒爆破法等,在穿越既有隧道、新建隧道或者进行复线施工时,可以通过改变或优化爆破参数,采用适当的爆破方法控制振动速度。比如增加临空面、缩小钻爆循环掘进进尺、减少单段爆破最大药量、及时进行

初期支护和仰拱闭合等都是降低爆破振动的重要措施,并且,新建隧道的不同开挖方式对既有隧道也会产生重要影响。国内部分临近隧道采取减少爆破振动的主要措施,见表1。

表1 国内部分临近隧道减少爆破振动主要措施

隧道名称	时间	临近状况	减振措施
沈海高速大帽山隧道	2008	3条隧道并列,最小净距5.89m	根据与建筑物距离,调整不同地段爆破单段最大装药量
福州鹤上隧道	2006	双向3车道,最小净距6m	控制爆破总药量和单段最大药量
济南开元寺隧道	2009	上部建筑物,最小距离20m	采用多级复式楔形掏槽,调整掏槽爆破起爆时差
渝长高速武隆隧道	2009	左右并列,最小净距6.0m	短进尺,弱爆破,控制爆破起爆时差
泉厦高速大坪山隧道	2009	四条隧道并列,最小净距5.28m	根据隧道净距,控制新建隧道爆破总药量和单段最大药量
甘肃陇南关子岭隧道	2009	上下临近,净距20m	采用楔形掏槽,分8部开挖爆破
青岛胶州湾海底隧道	2008	左右行车隧道并列,中铺服务隧道,最小净距15.9m	减小各掌子面纵向间距、控制掘进进尺和装药不耦合系数、施作中空孔
深圳市新屋隧道	2009	大跨度双向4车道并列,最小净距19m,高跨比0.63	控制单段最大药量,控制爆破时差

爆破振动速度与单段最大药量的关系是相对应的,趋势线表现出单段增加的特性,其基本关系是装药量越大,爆破振速相应也越大,如图4所示。为了减少炸药用量,在施工中应做好炮孔堵塞,控制炮孔深度及单段装药量,能有效地降低单位耗药量,从而减小了振动速度。

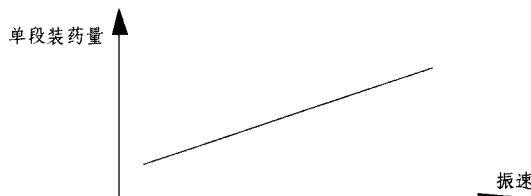


图4 单段装药量与爆破振速之间的关系

2.3 爆破监测和安全标准

爆破监测采用相应爆破测振仪进行监测,布点根据实际需要进行。目前,我国爆破振动测试所用仪器类型很多,数字式记录仪也比较多,振动数据的分析软件各不相同,所以震动测试并不规范,不能互相比较。对于此类情况,应该按照实际要求进行量测分析。在测点布置上,大量文献和资料显示,对于两临近隧道,既有隧道迎爆侧边墙振速最大,是爆破易受损区域,需要着重进行监控。另外,监控得到的各类爆破振动时程曲线对于重新优化爆破参数是很有用的,通常利用爆破时程曲线控制各段微差爆破的间隔时间,从而使爆破振动对临近隧道或建筑物

的振动影响最小。如图5、图6所示,为贵广线斗蓬山爆破监测里程为DK106+004.423~+045.25的振动波示意图,该工程监测仪器采用TC-3850振动记录仪仪器。

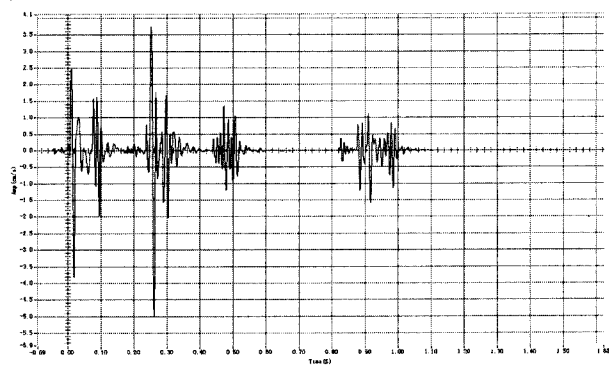


图5 垂直振动速度示意图

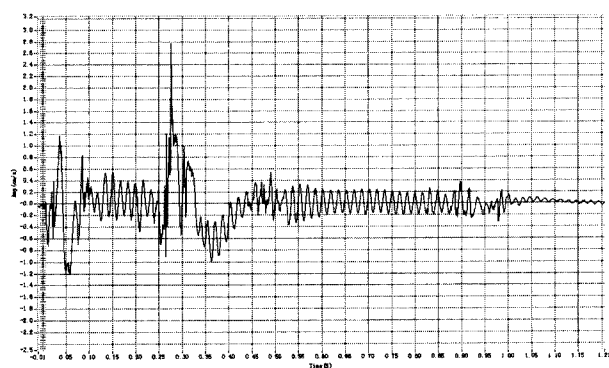


图6 水平振动速度示意图

我国现行的《GB6722—2003 爆破安全规程》^[2]中把保护对象所在地质点峰值震动速度作为爆破震动的安全标准。交通隧道安全允许标准为 10~20 cm/s,该标准给出了一个范围,但是没有说明适用于临近隧道的安全震动速度标准,应综合考虑构筑物的重要性、围岩状况、断面大小、深埋大小、爆源方向、地震振动频率等因素。因此修建具体的临近隧道工程中,应根据工程实际情况对国标安全允许标准具体量化。

2.4 数值分析

国内对临近隧道的数值模拟研究主要采用有限元方法来计算非线性结构材料的大变形动力响应,对一些很难在爆破时进行监控测量的参数:时程曲线、应力、应变、洞周位移等进行分析计算,比较最大振速是否符合规范要求,从而验证该次爆破设计是否合理的,或者对爆破参数重新优化处理,一般作为爆破掘进工程在理论上和施工方法上的参考。爆破产生的荷载以动压力形式均布作用在隧道洞壁上,方向垂直于壁面,所加荷载多采用三角形形式,如图 7 所示。

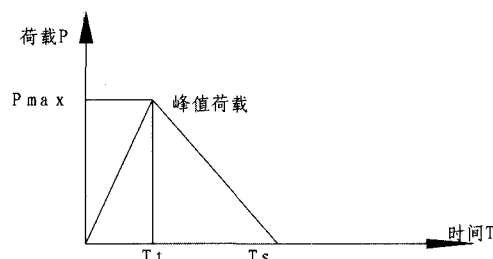


图 7 爆破加载的三角形荷载

表 2 是国内部分临近隧道数值分析结果对比。从表中可以看出,几乎所有研究过程中,振动速度都作为控制的基本要素加以考虑,爆破控制标准也以振速为基本要求。另外,由于两隧道有不同临近方式,所以振动出现的最不利位置是不同的,围岩越好,极限控制振速越大,围岩越低,应尽量减少爆破对围岩的扰动,多用机械或人工开挖。一般迎爆侧为振动最大区域,振动出现的附加拉应力、冲击波的破坏情况要视隧道的临近状况而定。重要工程在施工设计前进行必要的数值模拟分析,能提高决策者对工程安全、质量和造价的把握。

表 2 国内部分临近隧道数值分析统计

	依托工程	时间	研究目的	所用软件	研究内容	研究结果
谭忠盛等 ^[3]	关寨 1 号隧道	2001	对既有隧道的影响分析	DYNA-2D	隧道速度,加速度场,应力场以及速度一时间变化关系	迎爆侧为最大振动区
王明年等 ^[12]	—	2002	对既有隧道衬砌的影响分析	—	迎爆侧振速,衬砌关键点应力分析	衬砌迎爆侧边墙影响最为显著,建议采用振速指标控制
毕继红等 ^[5]	—	2004	既有隧道受邻近隧道爆破震动影响	ANSYS	不同隧道间距,围岩级别的振速	迎爆面边墙的振速最大;间距小于 1 B,隧道衬砌的振速会超过允许值等
何川等 ^[4]	—	2008	后行隧道爆破开挖对先行隧道的影响	ANSYS	不同开挖方式,爆破进尺的影响,震动速度,附加拉应力与距离的关系	先行洞迎爆侧 1B 范围为监测重点等
吴超凡 ^[13]	大帽山	2009	确定合理的爆破震动速度标准	MIDAS	极限振动速度与二次衬砌强度的关系	V 级围岩地段控制在 15 cm/s 以内,II~IV 级围岩地段控制在 20 cm/s 以内
余超等 ^[3]	关子岭隧道	2010	模拟特大断面隧道爆破振动对上部既有隧道的影响	ANSYS	关键点振动速度,应力分析	上部既有隧道二次衬砌的仰拱迎爆侧及拱顶受爆破振动的影响较大

3 装药机械的发展

爆破水平的优劣取决于钻孔质量,装药是否充实到位,我国隧道钻爆法施工技术近年发展表明,从钻孔到装碴运输等道工序都基本实现了机械化作业,唯有装药工序仍然是人工炮棍装药和堵塞,从而使装药作业循环时间长,作业人员数量多,耽误工期和影响造价。我国机械化装药技术水平与国外相比差距甚远,必须在装备技术上创新,研制满足有恶劣环境下如水下隧道爆破作业要求的新型机械与机具。

近年来,重铵油炸药以其价格低廉、爆炸性能好、抗水性能优良等特点将取代铵油炸药,成为民用工业炸药的主流,所以,优选重铵油炸药作为装药设备的配套炸药将成为未来的发展方向。另外,在保证安全的条件下,使装药质量和装药效率得到提高是目前的首要任务,应逐步实现多功能自动化、智能化。研制小型装药设备和其配套的多功能辅助车辆,比如开发出隧道爆破多功能装药车。国产装药设备的研制应实行跨越式发展,站在一个国际高度,使国产装药设备在适合国情的同时追赶世界先进水平,从而服务于我国高速铁路发展和地下工程的建设。

4 结束语

临近隧道爆破是隧道掘进施工中的一项重要工序,现在临近隧道的安全爆破标准和行业规范并没有完善,新的工程需要参考其他工程的爆破参数,根据实际需要进行参数调整、优化、进行正确的数值模拟和计算、进行同步爆破监控,这一切都是为了保证临近隧道施工时不影响既有线路或在建隧道的正常运营和施工。文章提供了最近几年隧道项目建设中爆破的一些科研状况,目前的现状表明,数值模拟结合实况监测是爆破工程的重要研究方法,只要在工

程中多次优化爆破参数,提高钻孔水平,是能够在复杂地质条件下做好爆破工作的。

参考文献

- [1] 铁道第二勘察设计院. 铁路隧道设计规范 TB10003-2005, J449-2005[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [2] 中国工程爆破协会. 爆破安全规程 GB 6722-2003[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫局,2003.
- [3] 林从谋,陈礼彪,蒋丽丽,郑宏利. 高速公路扩建大断面特小净距隧道爆破稳定控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(7):1372-377.
- [4] 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):2816-2822.
- [5] 毕继红,钟建辉. 邻近隧道爆破震动对既有隧道影响的研究[J]. 工程爆破,2004,10(4):70-73.
- [6] 陈连进. 小净距隧道爆破振动对邻近隧道影响测试研究[J]. 爆破,2010,27(2):37-40.
- [7] 王成,刘礼标. 小净距隧道爆破振动监测与分析[J]. 南华大学学报,2009,23(1):25-30.
- [8] 龚建伍,夏才初,郑志东,唐颖. 鹤上三车道小净距隧道爆破振动测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(9):1883-1887.
- [9] 余超,梁波,欧阳天烽. 特大断面隧道爆破开挖对既有隧道振动影响分析[J]. 隧道建设,2010,30(2):152-156.
- [10] 杨年华,张志毅. 隧道爆破振动控制技术研究[J]. 铁道工程学报 2010,(1):83-86.
- [11] 谭忠盛,杨小林,王梦恕. 复线隧道施工爆破对既有隧道的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(2):281-285.
- [12] 王明年,潘晓马,张成满,温向东,王慨慷. 邻近隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土力学,2004,25(3):413-414.
- [13] 吴超凡. 特大断面小净距隧道爆破开挖震动标准的研究[J]. 现代隧道技术,2009,46(4):19-23.