

起爆方式对条形药包爆炸应力场的影响分析

向文飞, 舒大强, 朱传云

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 爆炸应力场分析是条形药包爆破作用机理研究的一个基本问题。爆轰波沿装药轴线方向的传播是影响条形药包爆炸应力场特征的重要因素。综合采用 Starfield 迭加法与动力有限元法, 建立条形药包爆炸应力场数值分析模型。该模型利用 Starfield 迭加原理实现爆轰波沿装药轴线的传播, 并采用动力有限元方法分析条形药包爆炸在介质中激发的应力场。结果表明: 起爆点数量与起爆点位置对条形药包爆炸应力场有重要影响; 在实际工程中, 合理安排起爆点的数量及位置、缩小条形药包完成爆轰的时间有利于改善爆破效果。

关键词: 爆炸力学; 条形药包; 爆炸应力场; 起爆点

中图分类号: TV 542

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)09-1624-05

IMPACTS OF DETONATING MODE ON BLAST STRESS FIELD OF LINEAR EXPLOSIVE CHARGE

XIANG Wen-fei, SHU Da-qiang, ZHU Chuan-yun

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Analysis of blast stress field is a basic problem of blasting theory research about linear explosive charge. The propagation of blast wave through the linear explosive charge is an important factor which influences the characteristics of the blast stress field induced by the linear explosive charge. Combining the Starfield superposition method with dynamic finite element method, a numerical model of blast stress field research of linear explosive charge is proposed. In this model, principles of Starfield superposition are adopted to realize the propagation of blast wave through the linear explosive charge, and the dynamic finite element method is used to analyze the evolution and formation of blast stress field induced by linear explosive charge in the medium. It can be concluded that the number and position of detonating point play an important role in forming the blast stress field of linear explosive charge, and in engineering practice, it is very useful for improving the blasting effect to reduce the blast time of linear explosive charge by arranging the number and position of detonating points correctly.

Key words: mechanics of explosion; linear explosive charge; blast stress field; detonating point

1 引言

条形药包爆破具有岩石破碎质量好、爆破方量大、地震效应较小以及施工简单等优点, 但由于对其爆破作用机理认识不全面, 使得条形药包在工程实践中的进一步推广与应用面临巨大困难。实践表明, 条形药包爆炸激发的应力场特征是影响其爆破

效果的关键因素。过去, 人们主要从理论研究^[1]与模拟试验^[2-10]两个方面对条形药包爆炸应力场进行过研究, 通常认为条形药包爆炸如能激发类似柱面分布的应力场, 将有利于获得满意的爆破效果。

事实上, 在实际爆破工程中, 条形药包在起爆点起爆之后, 爆轰波将沿药包轴线方向传播, 经过一定的时间后, 整个药包才能完成爆轰。由于炸药爆速与岩体中应力波的传播速度一般比较接近, 爆

收稿日期: 2003-11-28; **修回日期:** 2004-03-04

作者简介: 向文飞(1977-), 男, 1999年毕业于武汉水利电力大学, 现为武汉大学水利水电学院博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。
E-mail: wuheafei@sohu.com.

轰波沿药包轴线方向传播的时间效应对条形药包爆炸应力场特征的影响是十分明显的。因此,在分析条形药包爆炸应力场时,不能简单地以柱面波来描述,而应该充分研究起爆点对条形药包爆炸应力场的影响规律,从而在工程实践中采用合理的起爆方式,以获得理想的爆炸应力场,实现满意的爆破效果。本文结合 Starfield 提出的等效单元球药包迭加法与动力有限元法,建立条形药包爆炸应力场的数值分析模型,详细分析起爆方式对条形药包爆炸应力场特征的影响。

2 条形药包爆炸应力场分析模型

在以往关于条形药包的研究中,对起爆点这一影响条形药包爆炸应力场特征的主要因素往往缺乏足够重视。近年来,少数学者在进行试验研究时注意到了起爆方式对条形药包爆炸应力场的影响^[6]。但由于试验中各起爆点的起爆时间很难精确控制,起爆时间的微小误差会对模拟结果产生很大的影响。因此,试验只能采用小尺寸的条形装药结构为研究对象。此外,由于整个装药完成爆轰的时间很短,故试验结果往往不能充分反映爆轰波沿装药轴线方向的传播时间对爆炸应力场的影响。鉴于试验条件的限制,目前试验手段还不能全面地反应实际条形药包爆炸应力场的发展变化规律。所以,要取得更进一步的研究,必须采用新的思路和方法。

Starfield 提出的等效单元球药包迭加法^[1]把条形装药的爆破作用分解为有限多个具有等效半径的单元球药包的迭加,然后利用等效球药包的应力波参数来获得一定爆轰波传播速度下,整个条形装药激发的应力波参数。这种方法考虑了爆轰波沿装药轴线方向的传播,因而能够灵活处理起爆方式对爆炸应力场的影响。但是该方法的缺陷是没有考虑岩石介质在冲击荷载作用下的复杂本构关系。而动力有限元法在处理介质本构关系方面十分灵活,如果将其与 Starfield 迭加法联合起来使用,就可以弥补 Starfield 迭加法的不足。同时,动力有限元法可以处理各种复杂的边界条件,准确控制不同的加载过程,而且可以处理任意尺度的问题,并准确控制起爆点的起爆时间,因而能从根本上解决试验手段所不能解决的问题。

考虑到研究重点是起爆点对条形药包爆炸应力场的影响,为了计算上处理方便,在建立有限元模型时,作了一定的简化假定:

(1) 假定条形药包在连续、均匀、各向同性的弹性介质中爆炸,不考虑介质的塑性变形和药包近区的介质破碎。

事实上,实际工程总是面临着错综复杂的地质条件。由于节理、裂隙、断层等软弱结构面的存在,岩体性质必定是非均匀、各向异性和非弹性的,而且在药包近区必定存在粉碎及破碎区域,爆炸应力波在岩体中的传播过程以及周围介质的动态响应都是十分复杂的。文中作此假定,用经典的弹性动力有限元法对问题进行求解,虽与爆破实际情况有出入,但有利于定性研究起爆点对条形药包爆炸应力场的影响规律。

(2) 假定条形药包在无限介质中爆炸。

这样就可以不考虑应力波在边界处的反射。但是,在进行有限元分析时,只能建立有限区域的有限元模型。为了解决这个问题,本文采用了一种比较常用的方法,即根据介质纵波波速选择足够大的区域,确保应力波传播至边界所需时间大于有限元计算分析的时间。

在上述假设基础上,建立条形药包爆炸的动力有限元分析模型,利用 Starfield 迭加原理将条形药包分解为一定数量的单元球药包的迭加,当起爆点确定后,与其相邻的单元球药包的起爆时间就可以由下式确定:

$$\Delta t = \frac{d}{D} \quad (1)$$

式中: Δt 为相邻单元球药包之间的起爆时差, d 为等效单元球药包直径, D 为炸药爆轰速度。

由式(1)可以确定每个单元球药包发生爆轰的时间。在进行有限元分析时,在不同的时刻分别将各单元球药包爆炸荷载施加于有限元模型上,就可以得出条形药包爆炸在介质中激发应力场的变化发展规律。单元球药包的爆炸荷载可采用简化的三角形分布,如图 1 所示。

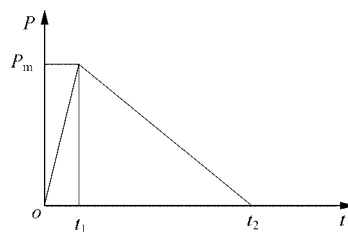


图 1 单元球药包爆炸荷载曲线

Fig.1 Blast loading distribution curve of element spherical charge

本文的有限元分析采用 ANSYS 软件的动力分析程序进行。该软件数值计算功能强大，尤其是前后处理简单方便，是目前世界上最完善、应用最广的大型有限元商业软件。其动力分析程序能够对爆炸、碰撞等动力学问题进行解答，并给出令人满意的结果。所建立的有限元模型见图 2，各种参数取值为：弹性介质的密度为 $2\ 600\text{ kg/m}^3$ ，泊松比为 0.25，弹性模量为 25 GPa，药室半径为 1.5 m，药室长为 31.5 m，长径比为 21，炸药爆速为 3 000 m/s。单元球药包爆炸的峰值荷载 $P_m = 2.5\text{ GPa}$ ，加载时间 $t_1 = 80\text{ us}$ ，卸载时刻 $t_2 = 300\text{ us}$ 。为了模拟条形药包在无限介质中爆炸，计算区域取为 $120\text{ m} \times 90\text{ m}$ (长 \times 宽)，爆炸应力波传播至边界的时间远远大于动力有限元计算分析时间，从而可不考虑应力波在边界的反射。

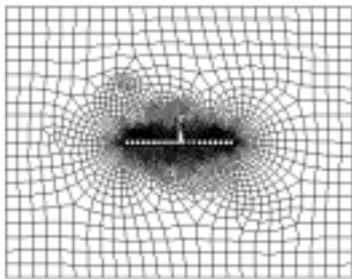


图 2 有限元模型
Fig.2 FEM model

3 起爆点数量对条形药包爆炸应力场特征的影响

为了研究起爆点数量对条形药包爆炸应力场特征的影响，采用了 5 种起爆方式：中心单点起爆、两端同时起爆、3 个点同时起爆、5 个点同时起爆以及 6 个点同时起爆。起爆点的布置示意图见图 3。

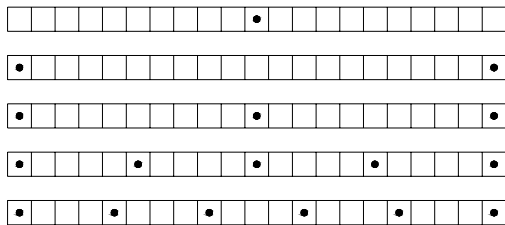


图 3 起爆点布置示意图
Fig.3 Sketch map of detonating points

中心起爆点起爆后，随着爆轰波从中心向两端传播，介质中的应力场以“球形”向周围扩展。在整个药包完成爆轰后的任一时刻，介质中的应力场

也呈现出明显的球形特征。图 4 为中心单点起爆等效应力分布特征图($t = 4.5\text{ ms}$)。从图 4 可以看出，条形药包在中心单点起爆的爆破作用类似于集中装药爆破。

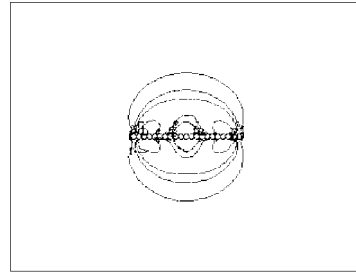


图 4 中心单点起爆等效应力分布特征图($t = 4.5\text{ ms}$)
Fig.4 Equivalent stress distribution by detonating at midpoint ($t = 4.5\text{ ms}$)

图 5 为两端同时起爆等效应力分布特征图($t = 4.0\text{ ms}$)。从图 5 可以看出，条形药包两端同时起爆后，爆轰波从两端向中心传播，介质中的应力场以“心形”分布从两端同时向中心移动。当整个药包完成爆轰后，由于迭加作用，在条形药包中部，出现短暂柱状应力分布特征。上述现象表明，对于两端同时起爆的条形药包，其应力分布仍然很不均匀。但是可以推测，在除两端起爆点之外的药包中间部分增加适量的起爆点，并使它们同时起爆，可能会获得理想的应力场分布。

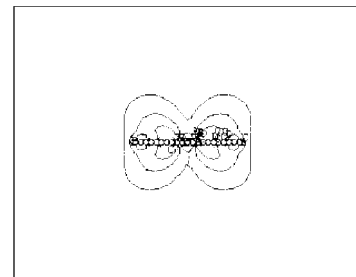


图 5 两端同时起爆等效应力分布特征图($t = 4.0\text{ ms}$)
Fig.5 Equivalent stress distribution by detonating at two sides ($t = 4.0\text{ ms}$)

图 6 为 3 个点同时起爆等效应力分布特征图($t = 2.6\text{ ms}$)。从图 6 可以看出，3 个点同时起爆后，从中心点向两端传播“球形”应力分布，与此同时，从两端同时向中心传播“心形”应力分布，当其相遇后，由于迭加作用，整个介质中的应力分布逐渐呈现柱状应力分布特征。

从上面的分析可知，尽管中心单点起爆和两端起爆均不能获得理想应力分布场，但二者迭加的共

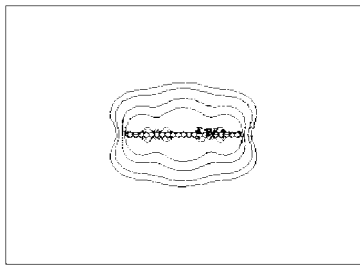


图 6 3 个点同时起爆等效应力分布特征图($t = 2.6 \text{ ms}$)

Fig.6 Equivalent stress distribution by detonating at three points ($t = 2.6 \text{ ms}$)

同作用却能对应力分布有很大的改善,即中心起爆点和两端起爆点对柱状应力场的形成都有着十分重要的贡献。

图 7, 8 分别为 5 个点同时起爆($t = 1.4 \text{ ms}$)和 6 个点同时起爆($t = 1.2 \text{ ms}$)等效应力分布特征图。从图 7, 8 可以看出, 5 个点和 6 个点同时起爆分别在 $t = 1.4 \text{ ms}$ 和 $t = 1.2 \text{ ms}$ 形成柱状应力分布(而计算结果表明, 3 个点起爆到 $t = 3.3 \text{ ms}$ 才基本形成柱状应力分布)。因此, 当起爆点达到一定数量后, 条形药包就能够获得比较均匀的应力场分布。

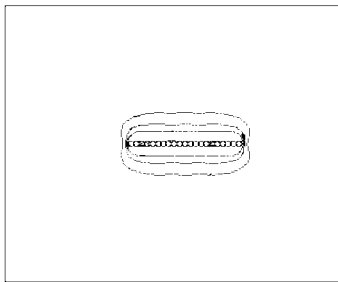


图 7 5 个点同时起爆等效应力分布特征图($t = 1.4 \text{ ms}$)

Fig.7 Equivalent stress distribution by detonating at five points ($t = 1.4 \text{ ms}$)

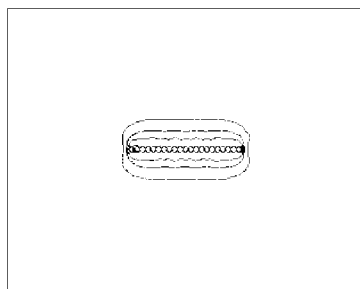


图 8 6 个点同时起爆等效应力分布特征图($t = 1.2 \text{ ms}$)

Fig.8 Equivalent stress distribution by detonating at six points ($t = 1.2 \text{ ms}$)

由以上分析可知, 随着起爆点数量的增加, 条形药包爆炸后在周围介质中形成的应力分布逐渐接近柱状应力分布。起爆点越多, 应力分布的柱状特

征越明显, 且形成柱状应力分布的时间越早。但是, 从 5 个点和 6 个点同时起爆的模拟结果可以发现, 对于一定长度的条形药包, 当起爆点增加到一定程度之后, 就能够获得很均匀的应力场分布, 继续增加起爆点对爆炸应力场的改善作用将不明显。

4 起爆点位置对条形药包应力场特征的影响

为了研究起爆点位置对条形药包爆炸应力场特征的影响, 采用了如图 9 所示的 3 个点和 5 个点同时起爆的布置方式进行有限元分析, 并将其结果(图 10, 11)与图 3 中的 3 个点和 5 个点同时起爆的结果(图 6, 7)进行对比。

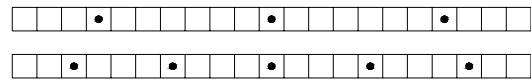


图 9 起爆点布置示意图

Fig.9 Sketch map of detonating points

从图 10, 11 可以看出, 图 9 所示的 3 个点和 5 个点同时起爆分别在 $t = 2.0 \text{ ms}$ 和 $t = 1.2 \text{ ms}$ 形成柱状应力分布。而从图 6, 7 可以看出, 图 3 所示的 3 个点和 5 个点同时起爆分别在 $t = 3.3 \text{ ms}$ 和 $t = 1.4 \text{ ms}$ 出现柱状应力分布。

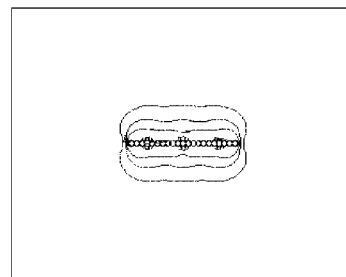


图 10 3 个点同时起爆等效应力分布特征图($t = 2.0 \text{ ms}$)

Fig.10 Equivalent stress distribution by detonating at three points ($t = 2.0 \text{ ms}$)

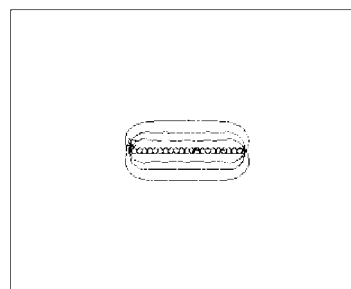


图 11 5 个点同时起爆等效应力分布特征图($t = 1.2 \text{ ms}$)

Fig.11 Equivalent stress distribution by detonating at five points($t = 1.2 \text{ ms}$)

由此可见,图9所示的起爆点布置位置更有助于形成柱状应力分布。这种布置方式减小了起爆点之间的距离,缩短了完成爆轰的时间,使药包更接近于瞬时爆轰,使得在周围介质中的应力分布更接近于柱面波。因此,在起爆点数量一定的情况下,应该使起爆点的相对位置达到最优。而确定最优起爆点位置应该遵循药包完成爆轰的时间最短的原则。

5 结 论

本文综合 Starfield 迭加法与动力有限元法,全面研究了起爆点数量与起爆点位置对条形药包爆炸应力场的影响规律,与前人的试验结论比较一致。主要结论如下:

(1) 中心单点起爆激发的应力场接近球形分布,其爆破作用类似于集中装药爆破;两端同时起爆也不能形成均布应力场。但是,中心起爆点和两端起爆点对柱状应力场的形成都有十分重要的贡献。

(2) 采用多点同时起爆,条形药包能够获得良好的应力场分布。起爆点越多,效果越好。但是起爆点增加到一定数量后,这种改善效果将不明显。在实际工程中,为了实现满意的爆破效果,采用多点起爆是切实可行的,但盲目增加起爆点并无必要。

(3) 对于多点起爆,在起爆点数相同的情况下,调整起爆点位置会影响条形药包爆炸应力场。

(4) 增加起爆点数量与调整起爆点位置的实质相同,即缩短整个条形药包完成爆轰的时间。在实际工程中,应该综合考虑起爆点的数量与位置,通过合理布置,使药包完成爆轰的时间达到最短。

需要说明的是,考虑到实际岩体结构的复杂性,在工程中不仅应该重视上述结论的定性指导作用,而且要把握具体工程的岩体性质,只有这样,才能达到满意的爆破效果。

参考文献(References):

[1] Starfield A M, Pugliese J M. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: a comparison between a computer model and field measurements[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sic. & Geomech. Abstr., 1968, 5(1): 65-77.

[2] 杨年华. 条形药包爆破破岩规律的试验研究[J]. 工程爆破, 1995, 1(1): 20-25.(Yang Nianhua. Experimental study on laws of fragmentation in rock blasting with linear charge[J]. Engineering Blasting, 1995, 1(1): 20-25.(in Chinese))

[3] 杨年华, 冯叔瑜. 条形药包爆破作用机理[J]. 中国铁道科学, 1995, 16(2): 66-80.(Yang Nianhua, Feng Shuyu. The mechanism of blasting with linear charge[J]. China Railway Science, 1995, 16(2): 66-80.(in Chinese))

[4] 杨年华. 条形药包端部效应的研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(3): 214-219.(Yang Nianhua. The blasting effect at the end of a linear charge[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(3): 214-219.(in Chinese))

[5] 邓志勇, 张志毅, 王中黔. 条形药包爆炸应力场试验研究[J]. 工程爆破, 1995, 1(2): 31-34.(Deng Zhiyong, Zhang Zhiyi, Wang Zhongqian. Experimental study on stress field of explosion of linear charge[J]. Engineering Blasting, 1995, 1(2): 31-34.(in Chinese))

[6] 龚敏, 黎剑华. 延长药包不同位置起爆时的应力场[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 248-253.(Gong Min, Li Jianhua. A research on stress field of column and strip-shaped charge in different detonated points[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24(3): 248-253.(in Chinese))

[7] 邓志勇, 张志毅, 王中黔. 条形药包端部爆炸应力场的动光弹试验研究[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(1): 86-90.(Deng Zhiyong, Zhang Zhiyi, Wang Zhongqian. Dynamic photo-elastic studies of explosive stress field at the end of a linear charge[J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(1): 86-90.(in Chinese))

[8] 颜事龙, 冯叔瑜, 金孝刚. 有机玻璃中条形药包爆炸破碎区发展过程的高速摄影研究[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(3): 262-267.(Yan Shilong, Feng Shuyu, Jin Xiaogang. Study on fracture region of cylindrical exploding in PMMA by high speed photograph[J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(3): 262-267.(in Chinese))

[9] 颜事龙, 金孝刚. 有机玻璃中条形药包爆炸质点速度的测量[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(3): 317-320.(Yan Shilong, Jin Xiaogang. Particle velocity measured of the cylindrical charge exploding in PMMA[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999, 21(3): 317-320.(in Chinese))

[10] 吉国栋, 陈叶青, 于亚伦等. 条形药包爆炸应力场的全息动光弹研究[J]. 工程爆破, 1999, 5(4): 20-24.(Ji Guodong, Chen Yeqing, Yu Yalun, et al. Study on stress field from linear charge explosion by dynamic holophotoelastic method[J]. Engineering Blasting, 1999, 5(4): 20-24.(in Chinese))