

土中爆扩及其挤密效应的研究

黄承贤

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

摘要 对爆扩挤密机理进行了分析,给出了条形药包药管直径、线装药量、振动速度、振动频率和持续时间的计算式,提出了土中爆扩破坏分区的模式与尺寸,对软基处理及爆沉工艺具有实用价值和研究意义。

关键词 爆扩 挤密 条形药包

中图法分类号 O382.2

1 前言

炸药爆炸使介质产生破坏、变形与振动,有可利用的一面,也有需防范的一面。这种双重性受许多因素如介质的物理力学特性、现场工程地质条件、爆破参数、距离远近和被防护对象特性等的制约。因此,对爆破工程需精心设计,精心施工,从充分利用爆破能量和有效地控制爆破能量两方面来解决工程问题。近年来人们将爆破技术引入岩土工程软基处理和爆沉工艺中,除了研究爆扩成孔规律外,还着重探讨爆扩作用对介质物理力学性质的影响^[1~2]。这对研究土中爆破的力学效应、破坏效应及确定相邻爆扩桩的间距,对软基处理和爆沉工艺等有重要研究意义。我们结合软基处理工程,获得小药量条形药包在土中爆炸的一些有益的试验结果。

2 土的构成及其三相指标

土壤是由矿物颗粒组成的,含有孔隙,孔隙中充满液体或气体,是包括固相、液相和气相的多相介质。矿物颗粒有粗颗粒和细颗粒之分,由它们构成土体骨架。粗颗粒往往是岩石物理风化的产物,保持着原来母岩的矿物成分和性质(如石英),而细颗粒主要是化学风化作用形成的次生矿物(如高岭土)以及生成过程中混入的有机物质。液体通常为存在于土骨架孔隙中的自由水和颗粒表面吸附的结合水;气体存在于孔隙中未被液体所占据的部位。土的固体颗粒大小、形状、矿物成份及液体、气体赋存情况是决定土的物理力学性质的重要因素。通常用三相指标来描述三者的比例关系,常用其中的密度、含水量、孔隙比来描述爆扩前后土的物理力学性质的变化。压实程度与土的可压缩性有关,土的可压缩性大小主要决定于颗粒级配、孔隙比、含水量、爆炸压力及作用时间。常用爆后土密度与爆前土密度之比表示可压缩性,其数值可达1.2~1.34。颗粒级配好、孔隙比大的土容易被压实;爆炸压力荷载大,作用时间长,压实效果更好,从而可以得到较高的密实度和强度,砂性土

和粗颗粒土在这一点上表现非常敏感。含水量的影响主要表现在润滑作用促使颗粒移动和孔隙中自由水阻止压实两方面的作用。

3 爆扩破坏分区及其特征

在爆轰波作用下土体发生剧烈变形,物理力学性质发生变化,从而导致其容重、孔隙比、比贯入阻力、孔隙水压力和含水量发生变化。应力波在破坏土体和向周围传播过程中不断衰减,其峰值及波形特征不断发生变化,因而它对土体的破坏程度也随着距爆源距离的增加而减轻。因此,可以根据这些痕迹的变化来确定土体中破坏分区。直接开挖爆炸后的场区,进行测量和统计,确定其破坏分区是目前许多学者常采用的测量方法,但将此方法应用于现场是十分困难的,有时甚至是完全不可能的。而现场测量又能最好地反映客观实际,因此除进行宏观调查外,还在现场沿不同水平距离和不同深度取土样,进行室内土工试验,测定同一位置爆前爆后密度、孔隙比、含水量的变化。在现场采用触探仪、旁压仪、十字板和板荷载法进行爆前爆后试验,测量其比贯入阻力、土强度及地基承载力的变化;爆扩瞬间用孔隙水压力仪测定地下水位以下土层中孔隙水动态压力随距爆源距离的衰减。综合分析所获资料划分破坏分区。据其力学效应与爆扩痕迹可划分五个区:空腔区、压碎压密区、压密胀裂区、挤密区和完整区(振动区)。根据波形特征,波场可划分为三个区:冲击波区、应力波区和地震波区。空腔区和压碎压密区对应冲击波区,压密胀裂区和挤密区对应应力波区,振动区对应地震波区,如图 1 所示。冲击波和应力波属塑性波类,地震波属弹性波类。根据波动理论,在半无限介质中,每一种波又是以压缩波、剪切波和表面波

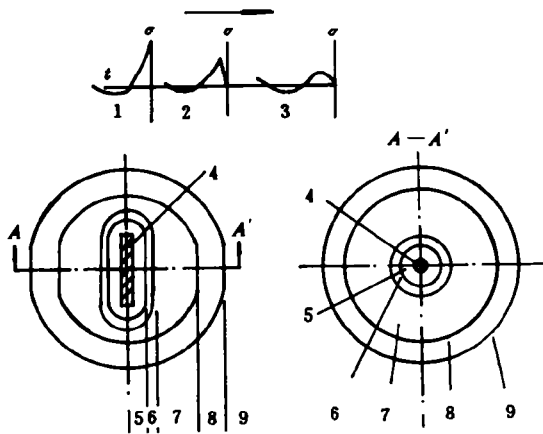


图 1 土中柱形药包爆破破坏分区示意图

- 1. 冲击波区; 2. 应力波区; 3. 地震波区; 4. 药包; 5. 空腔区;
- 6. 压碎压密区; 7. 压密胀裂区; 8. 挤密区; 9. 完整区

Fig. 1 Sketch of failure zone in soil

- 1. Shock wave; 2. Stress wave; 3. Seismic wave; 4. Explosive charge;
- 5. Cavity zone; 6. Crushing and dense zone; 7. Dense and distended split zone;
- 8. Compact zone; 9. Intact zone of original state

的波列形式传播。波列中首先到达的是压缩波,随后到达的是剪切波,在自由面处,在剪切波之后还出现瑞利波。压缩波弹性波速为剪切波弹性波速的 $\sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$ 倍(ν 为介质泊松比),瑞利波弹性波速为剪切波弹性波速的0.91倍。因此在炮孔附近出现剪切波和瑞利波“盲区”,在“盲区”以外,瑞利波仅使表层内的土体产生振动,对土体没有压密作用,且随距爆源距离的衰减比体波慢得多,而压缩波和剪切波向孔周土体各个方向传播且随距离迅速衰减,因此每个区主要是这两种波联合的作用的结果。冲击波区主要是压缩波作用,应力波区主要也是压缩波作用。应力波区近区属于横波“盲区”,远区属于这两种波联合作用区,但其强度较弱,不足以产生严重的剪切破坏,只能横向挤密土体。由于腔壁的“拱效应”和压碎压密区的约束,压缩波的负压致使环向裂缝不发育,再加上准静态应力作用空腔中爆炸产物继续扩张造成环向裂缝完全不发育,主要是压密和挤密。

用下列简单的关系式来评价土体中爆扩破坏范围^[2]

$$R = K_1 R_0 \quad (1)$$

式中: R 为距爆源距离(m); K_1 为与地形地质、爆源有关的试验系数; R_0 为装药半径(m)。也可用各区厚度表示

$$T = K_2 D \quad (2)$$

式中: T 为各区厚度(mm); K_2 为试验系数; D 为爆扩孔直径(mm)。各区厚度及破坏特征见表1和图2。综上所述,条形药包爆炸影响有效半径为 $3.0D$,土强度增加了20%~25%,地基承载力提高了20~45%,如图3(实线为爆扩前,虚线为爆扩后)。上述 R, T 均为垂直药包延长方向面上的尺寸。

表1 破坏分区尺寸及其破坏特征

Table 1 Characteristics and size of failure zone

破坏分区	波场分布	K_1		K_2		主要破坏方式	爆扩后30分钟土特征参数变化百分比, %		
		变化范围	平均值	变化范围	平均值		w	e	ρ
空腔区	冲击波区	10~20	15	0.33~0.67	0.50	土体被强烈压缩形成空腔	无水	—	—
压碎压密区	冲击波区	11~23	17	0.04~0.10	0.07	土体矿物颗粒完全被冲压粉碎、压密;孔壁有烧焦现象	<-15	<-38	>10
压密胀裂区	应力波区	53~69	61	1.40~1.56	1.48	胀裂、劈裂、尾裂	-15~-6	-38~-10	5~10
挤密区	应力波区	82~99	91	0.96~1.00	0.98	挤密	3~15	>10	<5
振动区 (完整区)	地震波区	>99	—	>1.00	—	完整	基本上无变化		

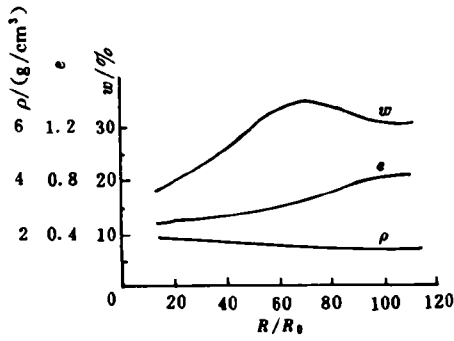


图 2 爆扩后 30 分钟内土的 w, e, ρ 随距离的变化
 w : 含水量; e : 孔隙比; ρ : 密度
 Fig. 2 Dry density, void ratio and water content changed with depth after explosion

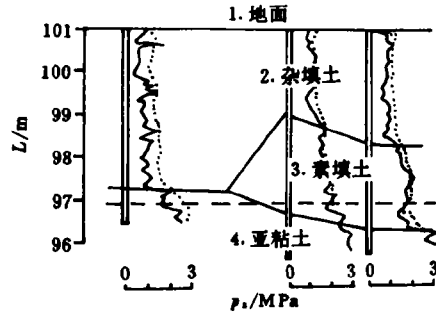


图 3 爆扩前、后比贯入阻力 p_1 随深度 L 变化
 Fig. 3 Penetration changed with depth
 1. Ground; 2. Mixed fill;
 3. Vegetarian fill; 4. Mild clay

4 药管内径及线装药量

条形药包在土中爆炸,爆扩成圆柱形空腔,先按照土质类型和所要爆扩的洞径选择药管内径,在一定范围内,药管内径与成孔直径成正比,也可按下式估算药管内径

$$d = 0.7D^{0.5}N^{0.2} \quad 4 \leq N \leq 35 \tag{3}$$

式中: d 为药管内径(mm); N 为爆扩前场地的触探锤击数 N_{10} ;相关系数 $r=0.9881$ 。

根据下式估算药管内装药量

$$\rho = 0.7D^{0.88}N^{0.35} \quad 4 \leq N \leq 35 \tag{4}$$

式中: ρ 为线装药量(g/m); $r=0.9899$ 。

球形药包在土中爆炸形成类球形空腔,装药量按下式计算

$$Q = 1.46D^{4.09}N^{0.12} \quad 4 \leq N \leq 35 \tag{5}$$

式中: Q 为装药量(kg); $r=0.9974$ 。

5 应力波的衰减规律

炸药爆炸产生振动,振动以波的形式传播,波的强度、振动频率、作用时间和持续时间均与药量、距离和工程地质条件(如土质、构造、含水量、孔隙率)等有关。并且波不论以什么形式(球形波或柱形波)在介质中传播,均将作几何扩散,其能量亦随距离增加而衰减,常用应力、应变、速度、位移等力学参数来描述波形强弱特征。爆破近区:球形波位移、速度与 $(1/R)^2$ 成正比,而应变和径向应力则与 $(1/R)^3$ 成正比;柱形波位移、速度与 $1/R$ 成正比,而应变和径向应力则与 $(1/R)^2$ 成正比。爆破远区:球形波波阵面径向应力、质点速度与 $1/R$ 成正比,而柱形波相应量与 $1/\sqrt{R}$ 成正比。当距离大于 2~3 倍药包长度时,可视柱形波为球形波传播。国内外学者在总结大量爆破振动测量资料的基础上,用下列形式拟合应力波测量的试验数据

$$\begin{aligned} \sigma &= K\bar{R}^{-\alpha} \\ v &= K'\bar{R}^{-\alpha'} \end{aligned} \tag{6}$$

式中: σ 为应力峰值(MPa); v 为振动速度峰值(cm/s); \bar{R} 为比例距离, $\bar{R}=R/R_0$; α, α' 为衰

减指数, K, K' 为与爆源、地形地质有关的试验系数。不同土壤中 σ 随 \bar{R} 衰减式中 K 和 α 值见表 2^[3~4]。其中衰减指数与声阻抗的关系为

$$\alpha = -9.266 \times 10^{-7} \rho c + 2.987 \quad (7)$$

式中: ρc 为土壤声阻抗 ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。

表 2 不同土壤中的 K 和 α 值

Table 2 Values of K and α in different soils

土类名称	土体物性			\bar{R}	K/MPa	α
	容重/ (g/cm^3)	纵波波速/ (m/s)	$w/\%$			
砂 土 ^[4]	1.50~1.55	—	10~12	15~45	5373.6	3
非饱和砂土 ^[3]	1.60~1.70	—	—	15~132	5720.0	2.8
饱和砂土 ^[4]	1.88~2.00	—	—	20~200	6900.0	2.5
亚粘土 ^[4]	1.60~1.65	—	天然含水量	15~45	5373.6	3
亚粘土 ^[3]	1.70~1.80	150~300	—	16.5~112	5940.0	3
粘 土 ^[4]	1.70~1.75	—	15	15~45	6718.9	2.8
黄 土 ^[4]	1.34~1.38	—	天然含水量	15~45	1679.7	2.8

空腔比为 2~2.5 的条形药包在亚粘土中爆炸时速度实测数据进行回归分析, 得其衰减规律。振动速度垂直分量

$$v_p = 13750 \bar{R}^{-1.24} \quad (8)$$

振动速度水平径向分量

$$v_r = 8295 \bar{R}^{-1.14} \quad (9)$$

振动速度水平切向分量

$$v_t = 1977 \bar{R}^{-1.12} \quad (10)$$

振动合速度

$$v = 15665 \bar{R}^{-1.19} \quad (11)$$

球形药包振动速度垂直分量

$$v_p = 64692 \bar{R}^{-1.37} \quad (12)$$

球形药包径向应力

$$\sigma = 16339 \bar{R}^{-1.3} \quad (13)$$

式中: $30 \leq \bar{R} \leq 300, r = -0.9$ 。

6 单位面积配重与爆破振动频率

6.1 单位面积配重

大多数爆扩工程要求控制爆破破坏范围, 并将飞石、地震波、空气冲击波、噪声、瓦斯泄漏量控制在一定范围内, 甚至杜绝飞石产生, 因此只有放闷炮才能达此目的。放闷炮成洞形状好, 爆炸能量利用充分, 成本费用少, 但引爆后, 揭露爆扩孔口位置比较难, 土方开挖量大。因此, 药包重量与其最小埋深的关系引起人们关注。研究表明: 竖向柱状孔爆扩

时,最小埋深达 1m 以上,球形药包重量与最小埋深的关系为^[1]

$$h_{\min} \geq 2 \sqrt[3]{Q} \quad (14)$$

式中： h_{\min} 为炸药最小埋深(m)； Q 为装药量(kg)。若埋深小于 h_{\min} 则会发生土向地面方向抛掷现象,就是将药包埋深控制在最小复盖层厚度,土方开挖量也是大的。因此采用人造复盖层与其配重,放准闷炮予以解决,即在炮孔上方挖一坑,长宽大于或等于 2~3 倍爆扩孔直径,深 1D,压一块相同面积的钢板(厚 $\geq 3\text{cm}$),在其上全一定重量的砂(或土)袋,炮孔用炮泥堵塞 10~20 cm 即可,如图 4。引爆后揭去砂袋和盖板,便可见到爆扩孔。

配重的估算:土中应力值按式(6~7)计算,土作用于盖板(障碍物)上的最大压力为

$$p_m = 3\sigma \quad (15)$$

单位面积上配重

$$W \geq 2p_m \quad (16)$$

6.2 爆破振动频率

在爆破工程中,邻近建筑物是否可能遭到损坏,除考虑应力波强弱外,还应考虑爆破振动作用持续时间及爆破振动频率与建筑物固有频率的关系,是否会使建筑物产生疲劳和共振破坏。共振破坏往往易被人忽视,土中条形药包爆炸振动频率及持续振动时间为

$$f = 18R_0^{-0.5}R^{-0.6} \quad (17)$$

$$t = 46R_0^{0.3}R^{0.7} \quad (18)$$

式中： f 为爆破振动频率(Hz)； t 为振动持续时间(ms)； $r_f = -0.9802$, $r_t = 0.9719$, $30 \leq \bar{R} \leq 300$ 。

7 结 论

(1) 炸药爆炸时,土因受应力波作用程度不同可以分几个区。选用取土样、测定其容重、孔隙比和含水量的变化,触探仪和旁压仪测定其比贯入阻力和强度变化,和现场宏观调查等方法确定分区是有效的,给出土体自由场破坏分区尺寸具有实用价值,对研究爆破效应、软土地基加固处理及爆沉新工艺有现实意义。

(2) 根据触探锤击数和爆扩孔孔径计算药管直径和线装药量,实践证明是可行的。并且可根据现场土质情况的变异,随时调整爆破参数,有利于提高爆扩成孔质量,优于类似计算。

(3) 给出的药管直径、线装药量、振动速度、振动频率和持续时间的算式,对软土复合地基设计、爆扩桩间距的确定及施工与爆沉工艺有参考价值,提供了经验,积累了数据。提

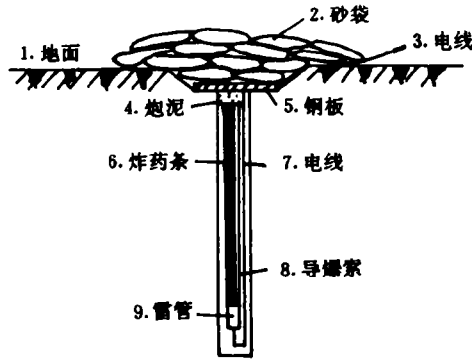


图 4 药包埋置示意图

Fig. 4 Sketch of buried explosive

- 1. Ground; 2. Sandy bag; 3. Electric wire;
- 4. Cannon mud; 5. Steel plate;
- 6. A strip of explosive; 7. Electric wire;
- 8. Blasting fuse; 9. Detonator

出土中爆扩破坏分区模式,较好地反映了土中破坏分区的客观规律。

(4) 由通常控制最小埋深变为控制单位面积压重(即人造最小复盖层厚度)放闷炮的成功,扩大了爆扩爆沉新工艺的使用范围,使它适用于市区或邻近建筑物处爆扩打孔和爆沉施工。

武汉岩土力学研究所唐洁工程师参加试验研究。在试验过程中曾获湖北二电器厂丰康龄高级工程师和施工单位习良建队长的大力支持与帮助。谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 刘祖德,等. 爆扩桩基础在输电线路工程中的应用. 北京:水利电力出版社,1989. 129~160
- 2 黄承贤. 土岩爆破中岩体和坑道爆破破坏分区的试验研究. 岩土力学,1986,7(1):36~38
- 3 Миронов Л С. Взрывы и Сейсмобезопасность. Сооружений. Москва;Издательство«Недра»,1973. 63~66
- 4 Ханукаев А Н. Физические Процессы при Отбойке Горных Пород Взрывом. М Госгортехиздат,1972. 58~60

STUDY OF BLAST-ENLARGMENT AND COMPACTION IN SOIL

Huang Chengxian

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430071)

ABSTRACT In this paper, the mechanism analysis for compaction of blast-enlargement, the expressions for explosive tube diameter, volume of thread-bound charges, vibrational velocity, frequency, and pulse time are given. A model and size of failure zone in soil is proposed. The results have practical values and research significance for reinforcement of soft foundation and blast engineering.

KEY WORDS blast-enlargement, compaction, strip-shaped explosive charge