

爆炸法加固黄土地基数值模拟

陈涛^{1,2}, 郭院成¹, 顾强康³

(1. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450002; 2. 中国人民解放军 94353 部队, 河南商丘 476100; 3. 空军工程大学, 西安 710038)

摘要:爆炸加固法是一种快速有效的地基处理方法。应用 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序对条形装药黄土地基中爆炸过程进行了三维数值模拟,发现在 6 000 μs 爆炸空腔已基本稳定,条形装药爆炸产生的压力波以水平方向传播为主,装药中垂线方向爆炸产生的峰值压力与离中垂线距离呈负对数关系,土的有效影响范围半径大约为爆炸后形成的空腔半径的 4 倍。条形装药黄土地基中爆炸的试验表明,爆炸加固法处理效果较好,试验结果与数值模拟结果基本吻合。

关键词:地基处理;爆炸加固法;条形装药;空腔半径;峰值压力;有效影响范围

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7329(2007)06-0080-04

Numerical Simulation of Explosion Method in Loess Ground Treatment

CHEN Tao^{1,2}, GUO Yuan-cheng¹, GU Qiang-kang³

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, P. R. China; 2. The 94353 Army of the PLA, Shangqiu, Henan 476100, P. R. China; 3. Airforce Engineering University, Xi'an, Shanxi 710038 P. R. China)

Abstract: The explosion reinforcement technique is very effective for soil ground treatment. A three-dimensional numerical simulation of explosion process with linear charges in loess soil is carried out using the ANSYS/LS-DYNA program. The results indicate that: the cavity radius becomes stable at approximately 6000 μs ; the blasting pressure waves mainly are transmitted horizontally; the peak pressure has a negative logarithm relationship with distance perpendicular to the charging bisector; and the valid influence area radius is about four times the blasting cavity radius. The numerical simulation results coincide well with the experimental ones.

Keywords: ground treatment; explosion reinforcement method; linear charges; cavity radius; peak pressure; valid influence scope

早在 1940 年,国外就已开始对天然沉积的砂土采用爆炸法密实进行研究^[1]。国内最早的纪录是在 1959 年,我国分别在安徽华凉亭水库和横排水库、河南鸭河口水库、内蒙红山水库等土坝地基处理中采用过爆炸密实法。随着经济和技术的发展,土中爆炸地基处理技术近年来在我国国防和民用工程中的应用已越来越多^{[2]-[5]},与其它地基处理方法相比,爆炸法具有经济、方便、快捷、应用广泛的优势^[5]。爆炸法属于动力固结加固技术,它是利用炸药爆炸瞬间产生的强大冲击波以及高温、高压的爆生气体来挤密周围土体,形成爆炸空腔,同时能激发很高的孔隙水压力。由于在土基中钻凿深孔容易实现,炸药可以放置于所需加固深度,而且爆炸作用过程很快,所以对于工期紧、处理

深度较深的工程,爆炸加固法具有很好的适用性。

爆炸加固法虽然在我国岩土工程中的应用越来越多,但由于种种原因,理论研究落后于实践^[6]。计算机数值模拟虽然有其局限性,但对爆炸问题的研究却是一种经济有效的研究手段。顾文彬等对球形装药在半无限土介质中的爆炸问题,用非线性动力学算法进行了二维数值研究^[7]。顾强康对条形药包土中爆破的空腔发展过程进行了数值模拟计算^[8]。王清洁利用 LS-DYNA3D 程序,针对集团药包半无限土介质中爆炸时空腔的形成和发展规律以及鼓包运动规律进行了研究^[9]。目前在岩土爆炸的数值模拟方面,多是涉及爆炸空腔形成及冲击波与介质的相互作用问题,对球形药包研究较多,而对条形药包爆破机理研究很少;对岩

* 收稿日期:2007-06-21

基金项目:空军后勤部科研资助项目(KH040086)

作者简介:陈涛(1979-),男,博士研究生,主要从事机场、道路岩土工程研究。

体研究的多,而对土中爆炸作用研究较少。因此,在问题的广度和深度上还有待于进一步提高。本文结合黄土区某国防工程的试验研究,运用有限元程序,对黄土地基中单孔条形药包的爆炸加固进行数值模拟分析。

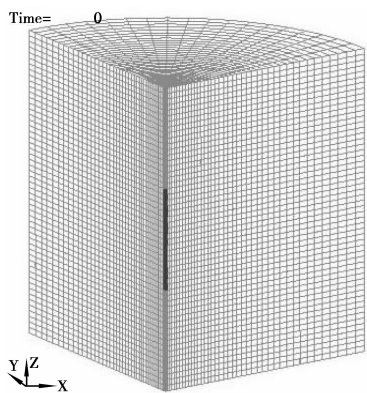


图 1 计算模型与网格划分

1 数值模拟程序简介

本文采用 ANSYS 软件中的 LS-DYNA 模块进行数值模拟分析。LS-DYNA 程序主要用于求解三维非弹性结构在高速碰撞、爆炸冲击下的非线性动力响应,目前在国防和民用领域里被广泛应用。

LS-DYNA 程序采用 Lagrange 坐标描述。其非线性分析连续性介质力学方程为:

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \\ \rho V = \rho_0 \\ \dot{E} = VS_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - (p+q)\dot{V} \end{cases}$$

上式三个独立方程分别代表动量、质量和能量守恒方程。

式中 σ_{ij} 、 f_i 、 \ddot{x}_i 分别为柯西应力张量、介质当前密度、单位质量体积力、质点加速度; ρ_0 为初始密度, V 为变形梯度; $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为应变率张量, S_{ij} 为偏应力张量, q 为体积粘性力, p 是静水压力。

2 数值模拟计算模型与参数选取

2.1 计算模型与网格划分

计算模型与三维有限元网格划分如图 1 所示,炸药采用 TNT 条形药包,耦合装药,装药中心起爆。装药半径 0.025 m,高度 1 m,药柱上部为填塞高度 1 m 的土体,下部设置 1 m 厚的土体,计算模型高度为 3 m,模型半径为 2.5 m。考虑到整个系统为三维轴对称问题,仅对实际模型的 1/4 进行分析。

炸药和土体采用八节点六面体 SOLID164 实体单元,共划分 26 880 个单元,32 000 个节点。边界条件为:模型上表面为自由边界,下表面与圆周面以外无限长土体采用无透射边界。

2.2 计算参数

TNT 条形炸药采用高能炸药燃烧材料模型

(HIGH_EXPLOSIVE_BURN)。其 JWL 状态方程形式为:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$

式中: V 为爆轰产物相对体积; E 为爆轰产物的内能; A, B, R_1, R_2, ω 为 JWL 状态方程参数。

TNT 条形炸药的物理参数^[10]如下表 1 所示。

黄土介质采用土体和可压扁泡沫模型(MAT_SOIL_AND_FORM)。此材料模型没有应变硬化,屈服极限 $\sigma_i = \sqrt{3(a_0 + a_1 p + a_2 p^2)}$,仅与压力有关。

黄土介质的物理参数^[11]如下表 2 所示。

表 1 TNT 物理参数

爆速/ m · s ⁻¹	初始比内 能 E0/ GJ · kg ⁻¹	爆轰压力 p _{c-j} / GPa	常数 A/ GPa	常数 B/ GPa	常数 R ₁	常数 R ₂	常数 ω
6 930	4.27	21.0	371.2	3.23	4.15	0.95	0.3

表 2 黄土介质物理参数

密度/ kg · m ⁻³	泊松 比 μ	弹性 模量 E/MPa	剪切 模量 G/MPa	体积卸 载模量 /K · (GPa) ⁻¹	屈服 常数 α ₀ / Pa ²	屈服 常数 α ₁ /Pa	屈服 常数 α ₂
1 800	0.48	47.38	16.01	0.394 8	2.4 × 10 ⁶	1.36 × 10 ⁴	0.123 2

3 数值模拟结果分析

3.1 土介质爆炸成腔过程

当 TNT 条形药包中心起爆后,药包网格的变形过程如图 2 所示。爆轰波从药包中心向二端扩散

不到 150 μs,炸药爆轰完毕。炸药爆炸产生的高温、高压气体冲击药室孔壁,同时产生向外传播进入土介质的强爆炸冲击波,在它们的联合作用下,药包周围土介质发生剧烈的塑性变形,形成空腔破碎区。

条形药包的爆炸空腔形状最终为椭球“纺锤体”,端头为球冠形。初期爆炸空腔发展很快,1 200 μs 后爆炸空腔已比较均匀,3 000 μs 后爆炸空腔运动变的比较缓慢,6 000 μs 爆炸空腔已基本稳定。

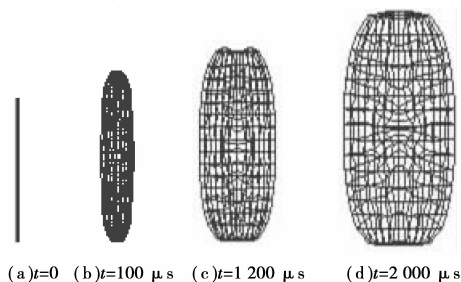


图 2 不同时刻条形药包网格爆炸变形

3.2 土介质压力变化过程

图 3 为 300 μs 时土介质爆炸应力云图。结果显示,条形装药爆炸产生的压力波以水平方向传播为主,在装药不同深度方向上波前应力较为接近,同时向上

下二端扩散;当压力波传播到自由和无反射边界时发生反射和透射,压力波叠加或抵消,形成复杂的应力场,但药包长度中垂线方向的压力波不受影响。

爆炸过程中 X 轴方向上土体单元压力变化规律如图 4 所示。各单元的压力变化特征相似,均在瞬间达到各自的峰值,随后迅速振荡衰减。X 轴方向上各土体单元的峰值压力随其与 X 轴距离的增加而迅速减小。在 $t=50 \mu\text{s}$ 时,在距药包最近,距离为 0.025 m 的单元 354 处,土体峰值压力达到 670 MPa,在稍远距离为 0.5 m 的单元 819 处峰值压力为 20 MPa,在最远的距离为 2 m 的单元 1 569 处峰值压力已经减小为几个 kPa。

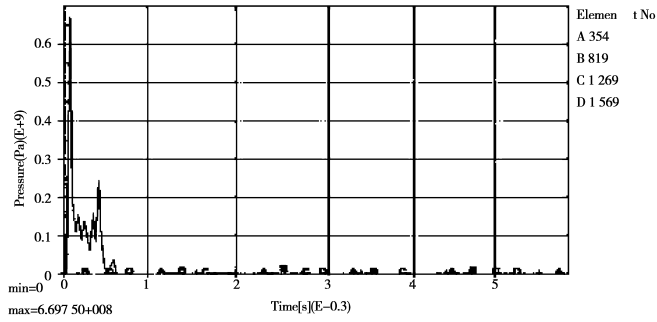


图 4 X 轴方向上的土体单元压力随着时间变化的关系

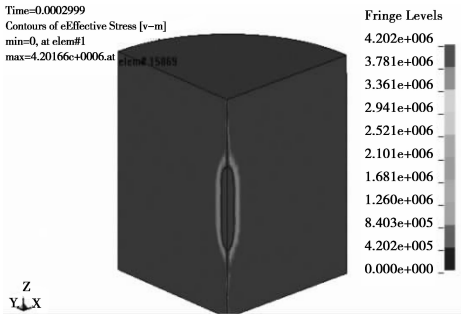


图 3 300 μs 时土介质爆炸应力云图

3.3 不同装药量下土的空腔半径和显著影响范围

不同的装药量,可用条形药包的装药高度恒定为 1 m,装药半径为变量来控制,装药半径分别取为 0.02 m、0.025 m、0.03 m、0.035 m。四种不同装药量下的计算模型相同。图 5 分别为装药量不同情况下,爆炸稳定后的爆炸空腔大小示意图(r 为装药半径, R 为空腔半径)。对四种不同药包半径的装药进行数值模拟分析后,总结药包长度中垂线沿线不同距离处的峰值压力变化规律见下图 6。

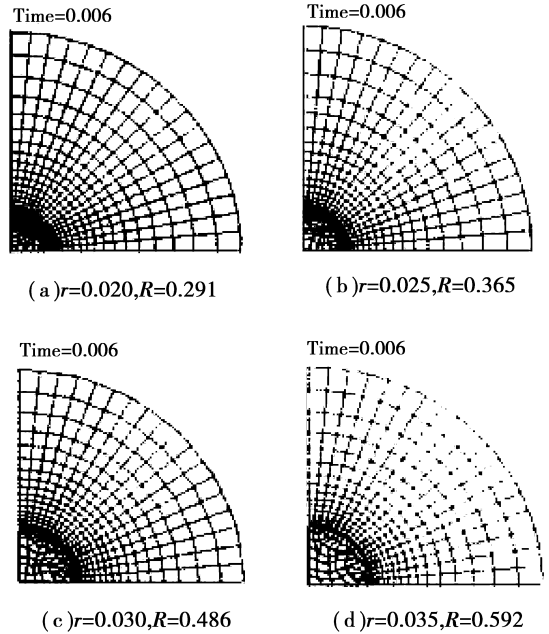


图 5 不同装药量下的爆炸空腔半径

由图 6 可知,峰值压力在药包中垂线沿线随着距装药中心距离的增大而迅速减小,进行回归分析发现呈负对数 $y=a-b\ln(x+c)$ 形式(见表 3)。爆炸引起的压力在土中传播过程中,在距离爆点 2~5 m 处峰值压力已减小至几个兆帕,可作为爆炸有效影响范围的划分界线,此时峰值压力在 1~10 MPa 之间,在这里取 5 MPa 为爆炸有效影响范围的界线进行分析。药包半径越大,有效影响范围越大。具体的范围见下表 3。

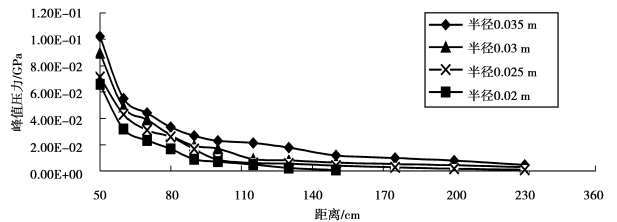


图 6 不同装药半径下的峰值压力沿装药中垂线方向变化曲线
取一部分区域进行爆炸法加固处理试验研究,该地区的黄土类型与文献[9]试验土样基本类似。选用 TNT 条形炸药,耦合装药,药包上部用原状土填塞,厚度为 1 m,药孔上方用 1.5 m 厚碎石覆盖,采用 0.020、0.025、0.030 三种装药半径,形成 6 个药孔,装药长度 1 m,起爆条件为中心起爆。

由于装药埋深合适,且上部填塞较好并用碎石加压,爆炸后没有形成爆破漏斗,地表基本无下陷和鼓包隆起现象,且爆炸的声音不大。爆后空腔成型较好,如图 7 所示。周围有很多径向劈拉裂缝和环状裂缝,腔壁面有一层强度很高的灰白色硬壳。

表 3 不同装药量下的模拟结果

装药半径 r_0 /m	爆腔半径 r /m	影响范围半径 R /m	峰值压力回归曲线		
			R/r	方程	R^2
0.020	0.291	1.20	4.12	$y=0.06681-0.01470\ln(x-48.9327)$	0.996
0.025	0.365	1.50	4.11	$y=0.07634-0.01542\ln(x-48.6576)$	0.992
0.030	0.486	2.05	4.22	$y=0.08507-0.01671\ln(x-49.2332)$	0.997
0.035	0.592	2.35	3.97	$y=0.09535-0.01773\ln(x-49.3162)$	0.996

4 试验研究

某国防工程大面积黄土地基进行加固处理时,选

由于装药埋深合适,且上部填塞较好并用碎石加压,爆炸后没有形成爆破漏斗,地表基本无下陷和鼓包隆起现象,且爆炸的声音不大。爆后空腔成型较好,如图 7 所示。周围有很多径向劈拉裂缝和环状裂缝,腔壁面有一层强度很高的灰白色硬壳。

试验后量测爆炸空腔直径,测定距装药中心及地面一定距离处土体的含水量、容重、干容重等三相比例



图7 土基爆炸后的空腔示意图

指标值,对爆前、爆后这些测量数据进行对比分析,试验结果如表4所示(表中为距装药中心1 m,距地面1.5 m处土体的量测数据)。结果显示,条形药包爆炸影响的有效范围半径大致为4倍的爆腔半径,这与数值模拟结果基本吻合。在此范围内,土的干容重可以增加20%~40%,可见爆炸加固法是一种有效的地基处理方法。

表4 试验结果

r_0/m	r/m	R/m	R/r	$\rho/(kN \cdot m^{-3})$	
				爆前	爆后
0.020	0.31	1.26	4.06	15.2	17.6
0.020	0.32	1.28	4.00	15.4	18.0
0.025	0.38	1.62	4.26	15.4	19.1
0.025	0.36	1.64	4.56	15.1	19.6
0.030	0.52	2.20	4.23	15.2	21.2
0.030	0.49	2.14	4.37	15.3	20.8

注: r_0 为装药半径, r 为爆腔半径, R 为有效影响范围半径, ρ 为干密度,影响范围半径为干密度显著变化范围。

5 结论

1)爆炸法具有加载速率快、处理深度深、经济、方便、快捷的优势,是一种很好的地基处理方法,可在一定范围内推广应用。

2)条形药包在本试验区黄土中爆炸,其有效影响范围半径为4倍的爆腔半径,此范围发生剧烈的塑性变形,爆炸产生的峰值压力与距装药中垂线距离呈负对数关系。

3)对多孔条形药包在地基中同时及微差起爆进行分析是下一步的研究方向。

4)数值模拟是研究爆炸问题的一种有效手段。它虽有其局限性,但随着数值计算的进一步完善它将起到实验无可替代的作用。

参考文献:

[1] A. K. B. Lyman. Compaction of Soils by Explosives[J].

Civil Engineering, 1940,(10)4:205-335.

- [2] Gohl W B, Jeferies M G, Howie JA. Explosive Compaction; Design, Umlplementation and Effectiveness [J]. Geotechnique, 2000,50(6):657-665.
- [3] 顾强康,刘伟.爆炸加固法在机场地基处理中的应用[J].空军工程大学学报(自然科学版),2004,5(2):20-22.
GU Qiang-kang, LIU Wei. Application of Explosion Compaction Technology to Ground Strengthening in Airfield[J]. Journal of Air force Engineering University (Natural Science Edition), 2004,5(2):20-22.
- [4] 邓志勇,张志毅.爆炸法加固软土地基的试验研究[J].铁道工程学报,2006,4(94):18-21.
DENG Zhi-yong, ZHANG Zhi-yi. Experimental Research on Reinforcing Subgrade in Soft Soil Zone by Blasting method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006,4(94):18-21.
- [5] 蔡德钧,叶阳升.爆炸法处理地基技术[J].铁道建筑技术,2005(1):63-67.
CHAI De-gou, YE Yang-sheng. Ground Treatment Techniqueby Blasting [J]. Railway Construction Technology, 2005(1):63-67.
- [6] 杨年华,条形药包爆破现状与展望[J].爆炸与冲击,1994,14(3):242-248.
YANG Nian-hua, Present Situations and Prospect of Blasting with Linear Explosive Charges [J]. Explosion and Shock Waves, 1994,14(3):242-248.
- [7] 顾文彬,叶序双,詹发民,等.球形装药半无限土介质中爆炸动力学分析[J].工程爆破,1999,5(1):5-10.
GU Wen-bin, YE Xu-shuang, ZHAN Fa-min, et al. Dynamic Analysis on Spherical Charges Exploding in Semi-Infinite Soil Medium [J]. Engineering Blasting, 1999,5(1):5-10.
- [8] 顾强康,陈涛,李宁.条形装药土中爆炸成腔的三维数值模拟[J].路基工程,2007,(1):24-26.
GU Qiang-kang, CHEN Tao, LI Ning. 3D Numerical Simulation of Cavity Expansion with Strip-shaped Explosive Charge [J]. Journal of Roadbed Engineering, 2007,(1):24-26.
- [9] 王清洁,顾文彬,时党勇,等.半无限土介质中集团装药爆炸空腔的数值模拟[J].爆破,2002,19(3):17-19.
WANG Qing-jie, GU Wen-bin, SHI Dang-yong, et al. Numerical Simulation of Cylindrical Charges Explosion in Semi-infinite Soil Medium [J]. Blasting, 2002,19(3):17-19.
- [10] 施鹏,邓国强,杨秀敏,等.土中爆炸地冲击能量分布研究[J].爆炸与冲击,2006,26(3):240-244.
SHI Peng, DENG Guo-qiang, YANG Xiu-min, et al. Study on Ground Shock Energy Distribution of Explosion in Soil [J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(3):240-244.
- [11] 陈涛.机场土基爆炸加固数值模拟[D].西安:空军工程大学,2006.
CHEN Tao. Numerical simulation of the blasting reinforcing technique applying in the airport foundation[D]. Xi'an: Airforce engineering university, 2006.