

文章编号: 1000-5013(2009)03-0331-04

爆炸挤淤法处理软基扩腔过程数值模拟

蒋丽丽, 林从谋, 蔡丽光

(华侨大学 岩土工程研究所, 福建 泉州 362021)

摘要: 研究福建罗源湾淤泥做爆炸挤淤法处理软基扩腔过程数值模拟. 考虑淤泥自身重力及其上部水的影响, 用理想弹塑性模型模拟淤泥在爆炸压力作用下的力学性质, 建立爆炸挤淤中扩腔过程的三维分析模型. 通过对炸药挤淤的空腔扩展过程的数值模拟与扩腔过程的规律的分析, 得出空腔扩展过程中关键点的位移、质点速度及空腔压力的变化规律. 理论分析表明, 所建模型是合理的.

关键词: 爆炸挤淤; 淤泥; 数值模拟; 理想弹塑性模型

中图分类号: U 656.2; TV 871

文献标识码: A

20世纪80年代, 国内研究成功一项旨在利用炸药爆破释放的能量, 达到改良软基的新技术——爆炸挤淤填石法. 它在抛石码头基床、防波堤、引堤、围堰、护岸和滑道等水工工程得到了很好的应用. 该技术与其他施工法相比, 具有施工简便、人力消耗少、投资省、工期短、见效快及地基后期沉降小等特点. 由于应用时间短、淤泥介质特殊的性质及爆破的瞬时性, 故对爆炸挤淤过程的认识尚不是很具体, 对其作用机理的了解和技术工艺的掌握仍停留在经验的基础上^[1-3]. 数值分析方法作为一种常用的理论分析方法, 在爆炸挤淤方面已经取得了一些进展. 文[4]对淤泥模型本构关系进行了较为系统的分析, 文[5]利用二维数值模拟方法对球形装药在淤泥场中爆炸的速度峰值问题进行了分析, 但对爆炸挤淤过程中扩腔的数值模拟及分析还较少. 本文以采用爆炸挤淤填石法处理软基的福建罗源湾华东船厂修造船项目护岸工程的淤泥^[6,7]为研究对象, 利用动力显式有限元软件 ANSYS/LS-DYNA^[8], 建立爆炸挤淤过程中扩腔过程的三维分析模型.

1 工程概况

该工程位于福建罗源湾梅花村附近, 驳岸总长约为 2.162 km, 堤身下部结构为爆炸挤淤筑堤. 其淤泥的特点: 深灰色、饱和、流塑; 成分为粘粒、粉粒, 含有机质和腐殖质及少量贝壳碎片, 刀切面光滑, 粘性感强, 局部相变为淤泥质土或淤泥混砂, 无摇震反应, 干强度中等. 防波堤区域海平面比较平坦, 淤泥层底板高程变化不大, 平均厚度 5~8 m, 最大厚度 16 m; 压缩系数 1.0~2.0, 具易触变、高压缩性和强度低等特点, 工程性能极差^[9]. 该区域的淤泥特性指标: 水的质量分数 w 为 69.4%, 压缩系数 e 为 1.927 MPa^{-1} , 塑性指数 I_p 为 26.5, 液性指数 I_L 为 1.55, 内摩擦角 φ 为 17.0°, 粘聚力 C 为 4.8 kPa.

2 数值计算模型

2.1 基本假设

为了简化计算并保证精度, 在建立数值模型模拟模型之前, 先对工程的模型进行如下 3 点假设. (1) 可不考虑淤泥上部空气的影响. (2) 炸药爆轰产物为理想气体. (3) 假定淤泥为均匀介质.

2.2 淤泥介质模型

淤泥介质的本构关系种类繁多, 因此淤泥介质本构关系的选择尤为重要. 结合工程的实际情况及淤

收稿日期: 2008-05-06

通信作者: 林从谋 (1957-), 男, 教授, 主要从事地下结构及控制爆破工程的研究. E-mail: cmlin@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2006J0445); 建设部科技计划项目(06-KF23)

泥介质自身所具特点,利用 Prandtl-Reuss 理想弹塑性模型来模拟炸药作用下淤泥扩腔的过程.该模型的屈服函数可以表达为

$$F(\sigma_j) = \sqrt{J_2} - k = 0. \tag{1}$$

式中, J_2 为应力偏量第二不变量, $k = 6C \cos \varphi / \sqrt{3}(3 - \sin \varphi)$, C 和 φ 分别为介质的内聚力和内摩擦角.

2.3 炸药的状态方程

LS-DYNA 程序描述高能炸药爆轰产物压力-体积采用 JWL(Jones-Wilkins-Lee) 状态方程^[10], 高能炸药爆轰产物的单元压力 p' 由状态方程求得, 有

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V}) \exp(-R_1 V) + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V}) \exp(-R_2 V) + \frac{Q E_0}{V}. \tag{2}$$

式(2)中, V 为爆轰产物的相对体积, E_0 为初始内能密度, 参数 A, B, R_1, R_2, ω 为试验确定的常数.

2.4 模型尺寸

根据罗源湾的工程概况及爆炸挤淤机理, 考虑到爆炸挤淤的布药间距和淤泥的埋深等情况, 本模型采用了 1/4 的计算模型. 取计算区域为 150 cm × 150 cm × 800 cm, 炸药中心在埋深在淤泥介质 400 cm 处, 由于单包炸药重 20 kg, 炸药密度为 1.2 g · cm⁻³, 炸药包尺寸为 10 cm × 10 cm × 80 cm, 地表另建立了一厚度为 200 cm 的水层. 为更好地接近实际工程情况, 应考虑淤泥介质和水的重力影响. 水、淤泥介质和炸药采用多物质流耦耦合方法进行分析, 建立的数值计算模型如图 1 所示.

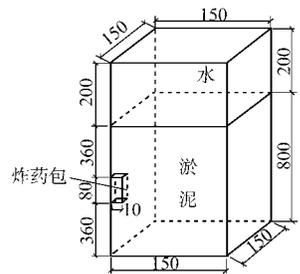


图 1 数值计算模型(单位: cm)

Fig. 1 The model of numerical simulation(unit: cm)

在有限元计算模型中, 在对称边界上施加相应的对称边界条件, 为了模拟半无限介质, 在除自由面和对称面外的 3 个面上施加无反射边界条件. 水、药包和淤泥介质均采用八节点的六面体单元进行网格划分, 整个模型的节点总数以及单元总数分别为 193 161 和 180 000.

2.5 计算参数

炸药的起爆点定为柱形装药的几何中心, 起爆时刻 $t = 0$, 起爆点至自由面的距离为 6 m. 炸药的密度为 1.2 g · cm⁻³, 爆炸波阵面压力为 $p_{CJ} = 18.5$ GPa. 淤泥介质参数: ρ 为 1.6 g · cm⁻³, E 为 5.0 MPa, k 为 400 Pa, B 为 3.6 GPa; 炸药的 JWL 状态方程参数: A 为 540 GPa, B 为 9.4 GPa, R_1 为 4.5, R_2 为 1.1, ω 为 0.35, E_0 为 8.0 GPa, V_0 为 1.0; 而水的状态方程参数: C 为 1.48, S_1 为 1.90, S_2 为 -0.096, S_3 为 0, γ_0 为 0.035, A 为 0, E_0 为 0, V_0 为 1.0.

3 结果与讨论

3.1 爆炸挤淤扩腔过程

图 2 为炸药在淤泥中爆炸的扩腔过程. 炸药爆炸后, 药室内充满了高温、高压的爆炸气体. 数值模拟结果显示, 大约经历 20~30 μs, 柱形装药爆轰完成. 该气体在爆轰结束时, 爆轰产物压力高达 11 GPa, 该结果与文[11]的结果基本一致. 由于高温、高压气体的作用, 药室开始扩张, 传播出一个近似于球形压力波, 同时, 爆炸空腔开始以椭球对称的形式向外扩散, 可得到淤泥在炸药作用下的扩腔过程.

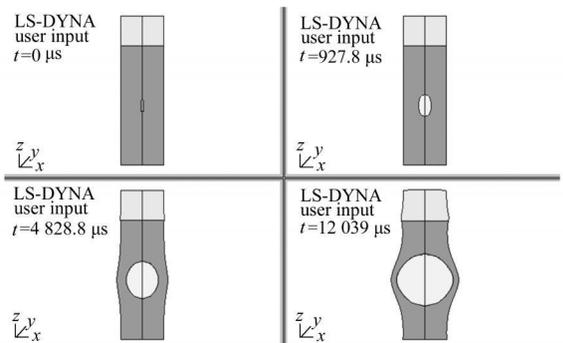


图 2 爆炸挤淤的扩腔过程

Fig. 2 The process of expanding cavity by blasting silt removal method

在扩腔过程中, 虽然椭球形空腔最右侧节点的位移总大于上顶点位移, 但由于炸药是呈柱状布药, 故刚开始椭球的长轴在 z 轴方向; 随着时间推移, 在时间(t) 到达 500 μs 时, 空腔近似呈椭球形, 而后右侧节点位移增大较快, 椭球长轴转为在 x, y 坐标轴平面上. 图 2 所示的扩腔过程也证实了这一现象.

3.2 空腔关键点位移

爆炸中气体空腔的最上节点、最下节点, 以及最

右侧节点的位移 (u) 曲线, 如图 3 所示. 由图 3 可知, 椭球形空腔最上面节点的位移与下侧节点的位移数值基本相等, 其位移时间的关系曲线基本重合. 但是, 最右侧节点的位移总大于这两个节点的位移, 并随着时间的延续, 这个差距越来越大. 在计算时间达 15 ms 时, 最右侧节点的位移为上、下节点位移的 1.5 倍, 即椭球形空腔长轴长度为短轴长度的 1.5 倍.

这说明在炸药爆炸时, 形成的高温、高压气体在向外扩张的过程中, 受到淤泥介质自身重力的作用, 右侧的淤泥对它的作用小, 并且具有最好的流动性, 故其位移最大. 在上、下节点处, 气体要同时受到水和淤泥共同的作用, 其向外扩张的行为明显要受到限制, 空腔上、下侧的淤泥在气体的作用下被挤密, 在经过 5 ms 后, 其位移增长也明显地变慢. 由图 3 可看出, 位移曲线的斜率逐渐变小, 这也与实际工程中爆炸挤淤的机理完全符合.

3.3 空腔关键点质点速度

爆炸中气体空腔的最上节点、最下节点, 以及最右侧节点的速度-时程曲线, 如图 4 所示. 从图 4 可知, 柱状药包决定了空腔右侧的节点达到最大值, 而在波传到上、下节点时, 质点波速 (v) 已经衰减为右侧节点的 50%. 说明高温、高压气体在传播过程中, 能量衰减得很快, 在 250 μ s 以后, 右侧节点的波速总大于上、下节点的波速, 故空腔在水平面上长轴的发展很快. 波速在衰减到一定程度的波动, 是因为气体在膨胀过程中受到淤泥的压缩作用; 当气体速度衰减到一定程度, 气体受挤压, 能量增加, 速度又开始增大, 但增大范围很小. 于是, 速度就出现了波动, 但总趋势是减小的.

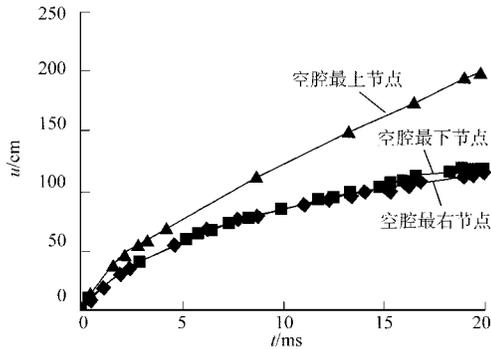


图 3 爆炸空腔节点位移 时程曲线

Fig. 3 Displacement time curve of nodes of explosion cavity

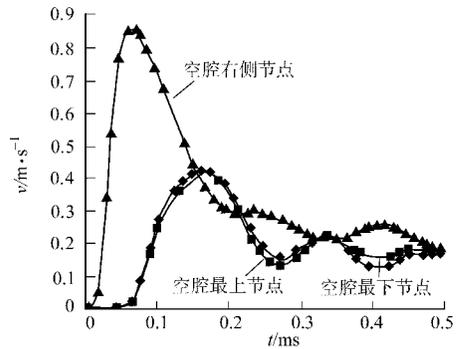


图 4 爆炸空腔质点速度 时程曲线

Fig. 4 Velocity time curve of nodes of explosion cavity

3.4 空腔的压力曲线

空腔中气体的最大压力为空腔中心点的压力. 最大压力与空腔边缘压力的压力-时程曲线, 如图 5, 6 所示. 爆炸在很短时间内, 压力呈直线型瞬间增大到最大值, 冲击波开始向外传播, 气体能量开始扩散, 中心点的压力很快衰减下来. 图 5 中所示的曲线光滑, 没有波动, 与理想气体压力衰减曲线一致, 说明计算结果较为理想.

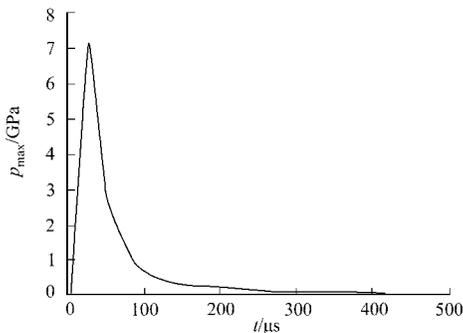


图 5 爆轰气体最大压力 时程曲线

Fig. 5 Maximum pressure time curve of detonation gas

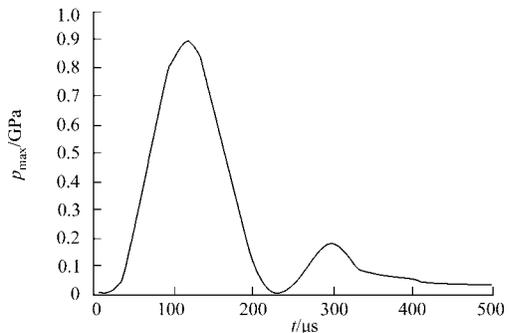


图 6 空腔边缘压力 时程曲线

Fig. 6 Pressure time curve on the edge of cavity

在图 6 中可以看到, 在 t 为 230~ 340 μ s 时, 压力最大峰值出现了波动. 这是由于随着空腔体积的扩大, 气体的压力和温度进一步降低. 由于惯性的原因, 淤泥的颗粒在一定时间内继续朝离开药包的方向

运动,结果爆炸气体出现负压.淤泥介质在达到最大位移时停止下来,此时由于势能积累,被压缩的淤泥向药包方向反弹回去.由于反弹作用,爆炸气体所占的空间减小,压力增大,压缩过程以后,气体重新膨胀.这样,由爆炸气体和淤泥组成的系统发生振荡,又产生新的波.图5中的波动反映了这一过程.由于阻尼效应和永久变形造成的能量损失,这个过程衰减得很快,比较可以得到由第二个波产生的压力峰值只是初始压力波峰值的20%.

计算结果表明,空腔的最终尺寸由淤泥介质的强度决定,并受到淤泥重力和上部水的影响.当腔内压力不大于介质的强度时,腔体膨胀立即停止,淤泥在重力和水的作用下开始向空腔内回流.按照爆炸理论,空腔运动过程中将出现的几次微小的波动,该现象在计算过程中也有较好的反应,说明所选计算模型较为合理.

4 结束语

本文对爆炸扩腔形成过程进行数值模拟,总结出爆炸挤淤扩腔过程的一系列特点,为今后的机理研究及工程应用提供参考.由于炸药在淤泥中爆炸的情况相当复杂,目前尚没有较成熟的淤泥介质模型和淤泥的破坏条件,需要对更为合理的淤泥介质模型和爆炸挤淤过程中相关因素的影响进一步研究.

参考文献:

- [1] 杨振声,金 缪. 爆炸排水固结的试验研究[C] // 工程爆破文集:第六辑. 深圳:海天出版社,1997: 541-548.
- [2] 张加华,王 峰,蔡建新. 工程爆破在软土地基处理中的应用[C] // 第七届工程爆破学术会议论文集. 成都:四川川投工程爆破有限公司和四川省工程爆破协会,2001: 398-403.
- [3] 林从谋,崔积弘. 爆炸排淤填石法处理软基新技术若干问题探讨[J]. 中国矿业,2005,14(S1): 88-91.
- [4] 乔继延,丁 桦. 爆炸排淤填石法中淤泥的本构模型[J]. 工程爆破,2003,9(3): 1-6.
- [5] 单海波,徐全军,陈国祥,等. 球形装药淤泥中爆炸场数值模拟及分析[J]. 工程爆破,2004,10(1): 13-15.
- [6] 王韶华,徐加耀. 淤泥堤基的堆石加载爆炸挤淤置换和震密处理[J]. 水利科技,2005,2: 24-27.
- [7] 崔广强,林从谋,耿 鹏. 控制加载爆炸挤淤法在护岸工程的应用[C] // 第一届全国岩石力学与工程实例学术会议论文集. 三亚:中国岩合力学与工程学会工程实例专业委员会,2007.
- [8] 张 奇,张若京. ALE方法在爆炸数值模拟中的应用[J]. 力学季刊,2005,26(4): 639-642.
- [9] 郭力群. 有限侧限软基堆载与真空堆载预压效果比较[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2004,25(3): 280-283.
- [10] 钱七虎,赵跃堂. 爆炸荷载作用下三相饱和土介质的试验研究评述[C] // 第三届华东地区岩石力学学会与工程学术年会论文集. 江苏:江苏省岩石与工程协会,1995: 112-118.
- [11] 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.

Numerical Simulation of the Process of Expanding Cavity by Blasting Silt Removal Method for Soft Soil Treatment

JIANG Li-li, LIN Cong-mou, CAI Li-guang

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The numerical simulation of the process of expanding cavity by blasting silt removal method for soft soil treatment in Fujian Luoyuan Bay is conducted. Considering the silt weight and water pressure, using elastic ideal plastic model to simulate silt under explosion, the three dimensional model to analyze the process of expanding cavity is established. The displacement, velocity and pressure of key points, are obtained. The simulation results indicate the model is reasonable.

Keywords: blasting silt removal method; silt; numerical simulation; elastic ideal plastic model

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 郑亚青)