

爆炸排淤填石法中岩土介质的本构模型^{*}

乔继延, 丁 桦, 郑哲敏

(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080)

摘要: 以爆炸排淤填石法为背景, 对相关岩土介质的本构模型进行了探讨。分析认为, 在以 LS(DYNA 动态有限元分析程序对爆炸排淤填石法的数值模拟中, 岩土介质不适于采用 Mohr-Coulomb 模型, 堆石体宜采用 Drucker-Prager 模型, 淤泥宜采用 Prandtl-Reuss 模型, 利用 LS-DYNA 程序对淤泥的本构模型进行了验证和确认, 计算表明: 在形成爆炸空腔的高应变率阶段, 淤泥表现为理想不可压缩流体的性质; 在小药量小抵抗条件下, 在淤泥自重作用下的低应变率变形阶段, 其粘性效应可以忽略不计。

关键词: 爆炸排淤填石法; 本构模型; 堆石体; 淤泥

1 引言

爆炸排淤填石法^[1]是我国从 20 世纪 80 年代中期开始发展起来的软基处理新技术。

爆炸排淤填石法从时间上可以分为两个阶段: (1) 起爆后, 爆轰产物推动爆源周围的介质向四周运动, 在淤泥中形成爆炸空腔, 爆源近区的淤泥由于受冲击载荷作用强度降低; (2) 爆炸产物压力卸载后, 堆石体连同底部的淤泥在重力作用下向爆坑方向塌落, 形成石舌, 从而达到泥石置换的效果。为了定量地描述两个阶段的过程, 我们拟以 LS-DYNA 动态有限元分析程序为工具, 对爆炸-排淤-填石的全过程进行数值模拟。在这个背景下, 为数值计算做了一些前期工作, 探讨了爆炸排淤填石法中涉及到的两种岩土介质, 即堆石体和淤泥的本构模型。

2 堆石体的本构模型

对于岩土类介质, 最常用的模型是 Mohr-Coulomb 模型^[2], 它用于岩土材料远早于 Tresca 和 von Mises 准则用于金属材料。Mohr-Coulomb 模型之所以被广泛用于描述岩土材料, 是因为它考虑到了流体静水压力(实际上是有效正应力)对材料强度的影响, 符合岩土介质的特点。

不过, Mohr-Coulomb 模型的屈服面在主应力空间中是一个不规则的六角形截面的角锥体表面, 在 π 平面上的投影是一个不规则的六边形。由于屈服面的棱角奇异性, 当应用于大变形数值计算时, 特别是在 LS-DYNA 程序中, 很容易产生不稳定现象, 给计算带来很大的困难。

在这种情况下, 我们不妨做些简化。如果在 Mohr-Coulomb 模型的屈服准则中忽略 J_3 的影响, 或令 Lode 角等于 $\pi/3$, 那么 Mohr-Coulomb 模型就演化为 Drucker-Prager 模型^[3], 其屈服准则为 $\sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k = 0$, α 和 k 可以由介质的内聚力和内摩擦角来确定。

Drucker-Prager 模型的屈服面在主应力空间中是一个圆锥面, 在 π 平面上的投影是圆, 在大变形计算中不会出现奇异或不稳定现象, 符合我们的需要。

3 淤泥的本构模型

目前, 淤泥质软粘土的本构关系数以百计, 不过, 都可以归结为弹性、塑性和粘性三种性质。因此, 我们遇到的问题是, 选择什么样的屈服准则来描述淤泥的弹塑性性质以及如何考虑淤泥的率相关效应, 即粘性。

3.1 淤泥的弹塑性变形

对淤泥类软粘土而言, 其渗透系数低于 10^{-9} m/s, 在排淤填石的过程中淤泥的运动时间很短, 来不

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(10072070)

作者简介: 乔继延(1969—), 男, 博士研究生。

及排水就结束了变形过程。由于渗透系数低,排水时间短,总应力的变化基本上由孔隙水来承担,淤泥中固体颗粒间的有效应力变化很小,因此也就不会影响到它的抗剪强度。根据这样一种认识,可以仍然采用广泛用于金属材料的 Von-Mises 屈服准则来描述淤泥的塑性变形。Prandtl-Reuss 模型^[4]正符合这个特点,而且它的屈服面在主应力空间中是一个圆柱面,在 π 平面上的投影是圆,符合大变形数值计算的要求。Prandtl-Reuss 模型的屈服函数可以表达为

$$F(\sigma_{ij}) = \sqrt{J_2} - k = 0$$

k 可以由介质的内聚力和内摩擦角来确定。

3.2 淤泥的粘塑性变形

在不同的应变率状态下,淤泥质软粘土具有三种不同的流变特性。因此,当涉及淤泥的粘塑性变形时,就必须依据不同的应变率状态来讨论。

在淤泥形成爆炸空腔的阶段,淤泥处于高应变率和大变形状态,此时淤泥的粘性力与应变速率大致成幂律关系^[5~7]。不过现有文献所提供的实验数据非常离散,难以成为参数估计的依据。从解决问题的角度,借鉴文献^[8],可以采取这样的办法:暂不考虑粘性力,假定淤泥为 Prandtl-Reuss 模型,通过计算结果与实验结果的对比来考察该模型是否可行。数值计算表明采用 Prandtl-Reuss 模型是可行的,而且强度和体变模量的变化对计算结果影响都很小,只有淤泥密度的变化影响显著。实际上,此时淤泥表现为理想不可压缩流体的性质。

在堆石体和淤泥向爆坑方向塌落的阶段,淤泥处于重力作用下的低应变率的大变形状态,此时淤泥呈现 Bingham 体特点^[5]。对于扰动淤泥,呼和敖德等^[5]给出了连云港西墅淤泥的宾汉体屈服应力和粘性系数。当含水量 ω 介于 60%~80% 之间时(爆炸排淤填石法多数遇到的地质条件),淤泥的粘性系数在 10~40 Pa·s 之间变化,屈服应力在 90~300 Pa 之间变化。在某些情况下,粘性力可以与强度,惯性力处于同一量级,因此单靠定性分析不能判断出粘性的影响到底有多大。我们做了一个数值试验,考察一个 10 m×10 m×10 m 的淤泥堆积体在自重作用下的变形过程,分别采用 Bingham 体模型和不考虑粘性的 Prandtl-Reuss 模型,根据计算结果对比淤泥堆积体脚点的位移-时间关系,发现两者的计算结果十分接近。因此可以得出结论,在尺度足够小的情况下,淤泥在重力作用下的变形过程中,粘性力是可以忽略不计的。

4 结 论

在以 LS-DYNA 动态有限元分析程序对爆炸排淤填石法的数值模拟中,岩土介质不适于采用 Mohr-Coulomb 模型,堆石体宜采用 Drucker-Prager 模型,淤泥宜采用 Prandtl-Reuss 模型;

在爆炸空腔的形成和鼓包运动过程中,淤泥表现出理想不可压缩流体的性质;

在小尺度条件下,在淤泥自重作用下的变形和流动过程中,粘性效应可以忽略不计。

参考文献:

- [1] ZHENG Zhe-min, YANG Zhen-sheng, JIN Liao. Underwater explosion treatment of marine soft foundation[J]. China Ocean Engineering, 1991, 5(2): 213—234.
- [2] 章根德. 土的本构模型及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [3] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 中国水利水电出版社, 1996.
- [5] 呼和敖德, 黄振华, 张震备, 等. 连云港淤泥流变特性研究[J]. 力学与实践, 1994, 16(1): 21—25.
- [6] 赵子丹, 张庆河. 规则波与淤泥质床的相互作用——波浪衰减[J]. 水利学报, 1997(4): 26—34.
- [7] 许连坡. 在爆炸载荷作用下连云港海淤的粘性特征[J]. 爆炸与冲击, 1990, 10(4): 297—300.
- [8] 龙源. 条形装药土中爆炸冲击波及空腔的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1990, 10(1): 41—48.