

地下爆炸成腔注浆支护的小型实验研究

冯长根, 韩宝成, 王丽琼
(北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081)

摘 要: 针对爆扩成腔稳定性差 渗水率高及遇水坍塌等问题, 采用注浆抽浆法对爆炸空腔进行了支护, 并进行防渗小型实验研究 确定了注浆临界水灰比为 0.8:1, 分别对重力注浆 压力注浆以及压力注浆加防水剂和无支护的 4 个空腔进行了支护对比实验 实验表明: 重力注浆不足以达到要求, 压力注浆是一种解决支护和防渗较为可行的方法, 加入防水剂后效果更好

关 键 词: 注浆法; 防水剂; 爆炸; 空腔; 黄土

中图分类号: TU 454 文献标识码: A

Study on grouting shoring of blasted cavity in soils

FENG Chang-gen, HAN Bao-cheng, WANG Li-qiong

(School of Mechano-Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Grouting method was used for shoring and preventing seepage in blasted cavity soils, in order to solve the blasted cavity soils question of stability and seepage rate and collapse. Comparison tests of the gravity grouting method, pressure grouting method the pressure grouting method with the waterproofing agent and without any support were done by using the critical water-cement ratio of 0.8:1. It is proved that the gravity grouting method can not meet the need the pressure grouting method is feasible for shoring and preventing seepage in blasted cavity soils and it is better with the waterproofing agent added.

Key words: grouting method; waterproofing agent; blasting; cavity; loess

1 引 言

爆扩成腔是在粘土、亚粘土、黄土等容易压缩的孔隙度较大的土壤中, 开掘钻孔, 装填炸药后封闭爆炸, 利用爆炸气体能量将四周的土体压缩成腔形成地下空间。我国爆扩成腔方面的应用研究还不够深入, 有关土中爆扩成腔的科技文献主要集中在理论研究和实验室研究方面^[1,2]。

近年来, 笔者以雨水集蓄和节水灌溉为应用背景, 先后进行了土中爆扩形成空腔的应用研究。针对爆扩成腔稳定性差、承载力低、渗水率高及遇水坍塌等问题, 提出了爆炸过程支护、爆炸成腔后期支护的技术方案。本文采用后者进行室外现场模型研究, 选定容易成腔的黄土作为实验对象, 分别对重力注浆、压力注浆以及压力注浆加防水剂和无任何支护的 4 个空腔进行了支护对比实验。

2 实验方案与条件

2.1 实验过程与方案

实验过程为: 选定较为平坦的黄土地作为实验场地, 用洛阳铲垂直地表面向下钻一定深度的孔, 埋入一定药量的炸药, 封闭爆炸挤压成腔。制备一定配比的纯水泥浆, 在爆炸形成的 3 个空腔中分别进行重力注浆、压力注浆以及压力注浆加防水剂支护后抽浆处理, 然后与无支护的空腔一起蓄水, 观察支护后的蓄水效果。具体实验流程见图 1。

支护实验的具体对比方案为:

- (1) 1# 空腔采用重力注浆方式注浆支护, 经一段时间后用泵抽出多余的水泥浆。
- (2) 2# 采用压力注浆方式, 在一定的压力注浆支护, 经一段时间后抽出多余的水泥浆。
- (3) 3# 空腔过程与 2# 相同, 不同之处是在水泥浆中加入防渗剂提高空腔的蓄水能力。

收稿日期: 2001-08-16

基金项目: 河北省自然科学基金资助(编号: 501279)

作者简介: 冯长根, 男, 1953 年生, 教授, 从事爆炸力学、应用化学等方面的研究。

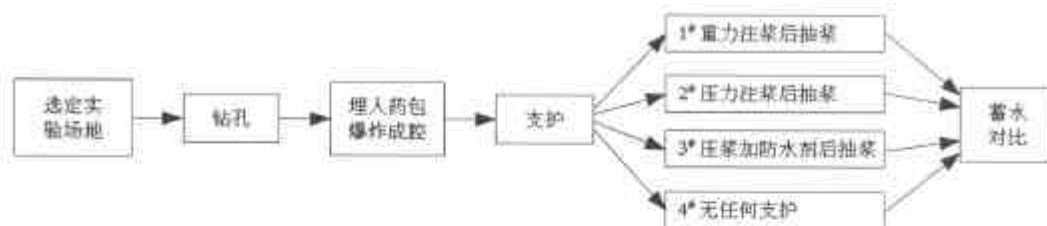


图1 实验工艺流程图

Fig.1 The flow chart of test operation program

(4) 4[#] 空腔在爆炸成腔后不作任何支护处理。

2.2 实验土质条件

实验选在具有代表性的洛阳黄土中进行实验。场地位于豫西洛阳南郊老虎山北坡带状阶地一角。实验场地全景图见图2。该场地地表比较平坦,场区土壤为第四系厚层黄土。第四纪以来,没有大的构造运动产生塌滑的迹象。实验区土工试验物理力学参数见表1。



图2 实验场地全景图

Fig.2 The test field

表1 实验区土工试验物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of test soils

土样距地面的距离 h/m	土样	天然含水量 $w/\%$	天然容重 $\gamma/kN \cdot m^{-3}$	天然孔隙比 e	压缩模量 E/MPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	粘聚力 c/kPa
1.0~2.3	粉质粘土	14.5	16.4	0.707	9.5	29	27.4
2.3~4.2	粉土	12.5	16.5	0.843	14.7	27.14	30.0
4.2~5.1	粉质粘土	19.1	18.2	0.778	23.9	19.57	50.5

2.3 其它实验条件

(1) 实验设备

实验的主要设备有 1.8 型 UBJ 挤压式灰浆泵系列注浆泵^[1], KGB55 型齿轮式输油泵。其设备外观见图3和4。

(2) 实验材料

实验所需的主要材料有 425[#] 普通硅酸盐水泥、BR 增强防水剂、2[#] 岩石铵磺粉末炸药以及 8[#] 铜皮电雷管。

(3) 实验条件

① 最佳水灰比 水灰比值与所支护的土壤的性质,例如湿度、粘性及孔隙比等有直接的关系,由于这



图3 UBJ 系列注浆泵

Fig.3 The UBJ grouting pump



图4 KGB55 齿轮式抽油泵

Fig.4 The KGB55 gear pump

些因素的影响,不同的土壤所用的水灰比值不同,甚至差别很大。实验中水灰比值直接影响支护空腔内壳的厚度。水灰比小,容易得到厚的水泥浆壁,但不容易被抽出。实验中对深度约为 1.2 m 的洛阳黄土进行支护研究。为确定临界水灰配比进行了如下实验,实验结果见表2。经过地面试验,初步确定为 0.6:1,但在实际试验中第一次支护全部失败。在实验土质条件下经过反复实验验证,得出注浆的最佳临界水灰比为 0.8:1。

② 注浆压力 当进行注浆时,从理论上注浆压力为

$$P = \frac{\gamma_s h_0}{100m} \quad (1)$$

式中 P 为注浆压力; γ_s 为空腔上岩土容重; h_0 为空腔的平均深度; m 为浆液沿岩土裂缝及孔隙流动的阻力系数,通常 m 取 0.4~0.5。

采用压力注浆时,一般注浆压力在 6 MPa 以下是安全的。实验中空腔上面覆盖土层约 1 m,最深平均深

表2 临界水灰比比实验结果
Table 2 The experiment result of critical
water-cement ratio

水灰比/重量比	地面实验	重力注浆	压力注浆	压力注浆加防水剂
0.45:1	成功	失败	失败	失败
0.6:1	成功	成功	失败	失败
0.8:1	失败	成功	成功	成功

度为 1.3 m。根据实验条件,选用压力为 0.15 ~ 0.2 MPa,实验中注浆压力由注浆泵上的压力表来控制。

3 实验结果与讨论

3.1 爆炸成腔

表 3 为封闭爆炸成腔的实验数据,为了避免爆炸过程中各个空腔相互的影响,实验时各个空腔的相互间隔为 5 m。爆炸成腔后,4 个空腔的成腔直径约为 25 ~ 28 cm,空腔的形状似梨形,外观形状见图 5、6。

3.2 支护空腔的蓄水对比

为了便于对比,试验中采用相同的试验条件。全部采用 425# 普通水泥,注浆液的水灰比均为 0.8:1。重力注浆时,在注浆 30 min 以后抽出浆液,可确保抽出浆液,可以采用多次注浆抽浆的方式增加支护层的厚度。在压力注浆方式下,在浆液注完 20 min 后,抽出空腔内的浆液。纯水泥浆的初凝时间随着水灰比的增大而增长,在比值 0.45:1 时初凝时间为 7 h 41 min,在比值 2:1 时为 17 h 7 min^[4]。因此抽浆等待时间与初凝时

表3 爆炸成腔的主要数据
Table 3 The primary data of blasted cavity

序号	钻孔直径/cm	钻孔深度/cm	距地面深度/cm	装药量/g	雷管/发	空腔直径/cm
1#	8	120	130	50	1	28
2#	8	120	129	50	1	26
3#	8	120	130	50	1	25
4#	8	120	128	50	1	25

注:1#代表重力注浆的空腔;2#代表压力注浆的空腔;3#代表压力注浆加防水剂的空腔;4#代表无任何支护空腔(全文同)。



图5 无支护的空腔开挖图
Fig.5 Cavity excavation without support



图6 3#空腔底部外形图
Fig.6 Shape of the bottom of cavity 3#

间基本无关。

抽出的水泥浆液收集在一个盆状容器中,在其它空腔支护中直接反复使用。最后剩余的水泥浆可以在制作水泥制品方面而避免浪费。这样极大降低了空腔支护的成本,有利于该支护技术的推广应用。

支护完成后,经过大约 1 d 的时间,水泥达到初凝。此时在水泥壁上轻微洒水养护,防止水泥壁开裂。3 d 以后,支护水泥内壁基本达到终凝,开始在空腔中蓄水观察。

考虑到实验中蒸发量较小,并且是在相同的条件下蓄水观察,故忽略蒸发量的影响。

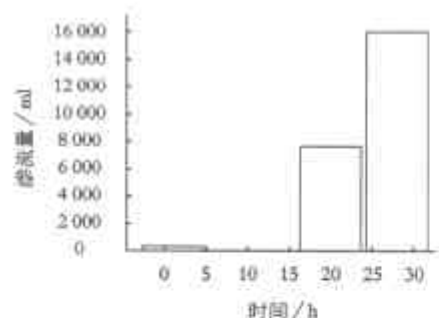
表 4 为 4 个空腔的蓄水对比结果。由上表可知,无任何支护的空腔蓄水能力最差,重力注浆效果稍好,压力注浆的空腔效果较好。由于在支护操作中出现问题,3#的空腔效果稍差,没有达到实际的效果。理论上讲,压力注浆加防水剂是最好的方法,可以用在以后实验。选 1#,2#空腔进行蓄水对比,其渗水量随时间的对比见图 7。由对比可知 2#空腔的蓄水能力明显强于 1#空腔,且随着周围土壤含水量饱和,2#空腔的渗水率趋于定值。

3.3 开挖支护空腔的效果对比

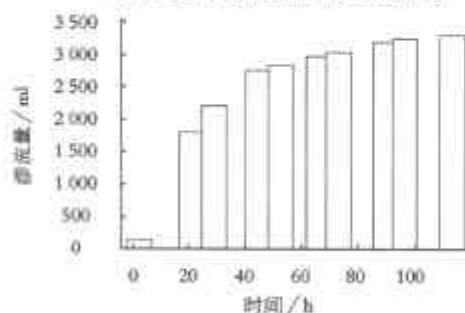
完成蓄水后,挖开支护的空腔,观察空腔的支护情况。图 5 为无任何支护开挖后的图片,空腔的直径约为 26 cm,高约为 20 cm,底部由于蓄水有较厚的淤泥堆积。图 6 为压力注浆并且加入 BR 防水剂后的

表4 实验蓄水后渗水数据
Table 4 The test seepage data

序号	支护方式	蓄水量/kg	蓄水情况
1#	重力注浆	18	蓄水能力较差,在蓄水 28h 后,全部渗漏。
2#	压力注浆	16	蓄水情况最好,连续蓄水 121h 后,剩余水量约为 5 000 ml。渗漏速度约为 30 ml/h。
3#	压力注浆加 BR 防水剂	18	在距离地面 80 cm 处有一个洞,影响蓄水。在蓄水 51h 后,全部渗漏。
4#	无任何支护	20	在蓄水 2.5 h 后,全部渗漏。初始渗漏速度为 150 ml/min。



(a) 1# 空腔的渗流量随时间的变化框图



(b) 2# 空腔的渗流量随时间的变化框图

图 7 1#, 2# 渗水量与时间的对比框图

Fig.7 The comparison of #1 and #2 seepage discharge with time

空腔外形, 由于在注浆的过程中有大约 0.2 MPa 压力的作用, 水泥浆渗透到爆炸作用形成的径向裂隙中, 形成如图 6 所示的外形。空腔的直径大约为 40 cm, 径向高度为 36 cm。图 8 为压力注浆空腔的全景图, 该空腔是本实验中最完整的空腔。图 9 为土壤与水泥浆的复合竖直管道, 由于压力的作用, 管道的内部基本光滑, 形成的水泥浆壁面厚度基本均匀, 厚度约在 3~5 mm, 局部的厚度在 10 mm 左右。管道的外径约为 15 cm, 内径为 8~9 cm, 有较好的支护作用和防渗效果。图 10 为重力注浆的空腔剖面, 水泥浆内壁比较均匀, 但只有约 1 mm 厚, 蓄水后空腔内壁受到破坏, 不宜用来长期蓄水。

4 结 论

从实验中可得到以下的结论:

(1) 无任何支护的空腔渗水率极高, 长期浸泡后会坍塌, 必须进行支护处理。重力注浆后的空腔水泥浆壁比较均匀, 但壁厚仅有 1 mm, 蓄水后易被破坏, 也不宜用来长期蓄水。

(2) 压力注浆后空腔水泥浆壁厚度整体较为均匀, 局部存在一些较厚的区域, 渗漏速度约为 30 ml/h。蓄水能力大大提高。压力注浆且加入防水剂



图 8 压力注浆空腔的全景图

Fig.8 Full view of the cavity for pressure grouting



图 9 3# 空腔管道剖面图

Fig.9 Pipeline profile of cavity #3



图 10 1# 空腔管道剖面图

Fig.10 Pipeline profile of cavity #1

的空腔在支护中存在问题, 蓄水效果一般。但理论上讲, 该方案的效果应该最好。

(3) 压力注浆技术可以在地下土层中形成具有一定承载和抗渗能力的复合衬砌。支护空腔成本较低, 操作工艺简单, 有利于该支护技术在缺水地区推广应用。对今后的实际应用提供实验依据。

(4) 实验中还存在一些不足之处, 例如, 水泥浆壁在凝固过程中的开裂, 支护空腔的承载和蓄水能力评价以及如何变为大型实验等, 都有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] 李翼谋, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [3] 曾宪明, 黄久松, 王作民等. 土钉墙支护设计与施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 252~253.
- [4] 岩土注浆理论协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.