

# 浅埋隧道超前注浆导致地表隆起规律现场试验研究

徐继光, 翁贤杰, 张龙生

(江西交通咨询有限公司, 江西 南昌 330008)

**摘要:** 在城市浅埋隧道超前注浆加固工程中, 注浆会导致地表隆起变形, 严重威胁市政管线安全。为揭示注浆导致地表隆起规律, 依托青岛地铁2号线啤~苗区间隧道超前注浆加固工程, 开展注浆导致地表隆起规律现场试验, 研究地表隆起值的空间分布特征与随注浆进程的发展规律, 进而分析注浆量、注浆材料类型等因素对地表最大隆起值的影响, 在此基础上提出了隧道超前注浆过程中地表隆起变形控制方法。研究表明: 在垂直隧道轴线方向上, 地表隆起值呈大致对称的山峰状分布; 在隧道轴线方向上, 地表隆起值最大的位置位于距掌子面较近区域; 重复注浆会显著提高地表最大隆起值; 地表最大隆起值与注浆量正相关, C—S浆液由于具有速凝特性, 其地表隆起值要显著高于水泥单液浆。将所提出的地表隆起变形控制方法应用于依托工程中, 最终隆起值为2~2.5 cm, 实现了地表隆起值控制目标。

**关键词:** 岩土力学; 浅埋隧道; 超前注浆; 地表隆起; 现场试验

在城市地铁隧道工程中, 经常采用超前注浆工法加固隧道掌子面前方软弱地层以保证隧道安全开挖。然而, 城市地铁隧道通常埋深较浅, 超前注浆会引起目标注浆区域上方地表隆起变形, 当隧道上方分布有道路、建筑物或市政管线时, 超前注浆有可能会影响隧道上方路面行车安全、建筑物稳定及市政管线安全。因此, 研究隧道超前注浆导致地表隆起变形规律对于实现城市环境下隧道超前注浆安全控制具有重要意义。

对于注浆导致注浆区域上方地表变形问题, 国内外学者开展了相关研究, Sagaseta、Gollegger、唐志伟、Zhang等分别基于解析理论或数值方法获得了注浆导致地表隆起变形的定量计算公式或求解模型; 张世杰等开展了隧道砂土层注浆导致地表变形的模拟试验, 分析了地表隆起过程中地层压力及位移的变化规律。然而, 以上研究大多集中在理论及室内模拟试验方面, 研究中对注浆抬升地表过程进行了诸多简化, 目前尚缺乏现场试验方面的研究。

该文为揭示隧道超前注浆导致地表隆起变形规律, 依托青岛地铁2号线啤~苗区间隧道超前注浆加固工程, 开展注浆导致地表隆起规律现场试验, 研究地表隆起值的空间分布特征及其随注浆进程的发展规律, 进而分析注浆量、注浆材料类型等因素对地表最大隆起值的影响, 在此基础上提出隧道超前注浆过程中

地表隆起变形控制方法并应用于实际工程中。

## 1 依托工程概况

### 1.1 工程地质条件与溃砂灾害概况

青岛地铁2号线啤~苗区间隧道为左右分修的两条并行的单线单洞地下隧道, 线路间距为15~17 m, 隧道开挖断面宽度为7 m, 高度为7.43 m, 区间隧道埋深为11~16 m。隧道穿越地层地质情况如图1所示, 部分区段隧道揭露厚度不一的富含黏性土砂层, 揭露厚度一般为0.5~2 m, 该地层处于饱水状态、胶结能力差、不具有自稳能力, 在开挖扰动影响下极易诱发涌水溃砂灾害, 施工风险极高。

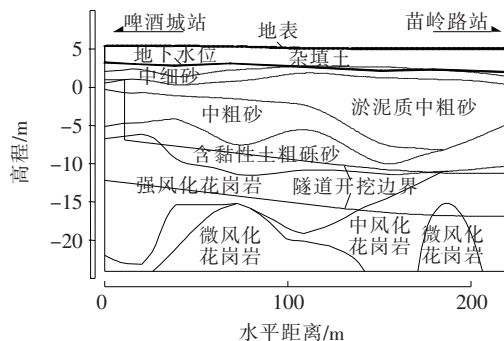


图1 隧道工程地质条件

收稿日期:2020—10—20(修改稿)

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2017MEE070);江西省交通厅重点科技项目(编号:2019C0001)

作者简介:徐继光,男,大学本科,高级工程师。E-mail:597793525@qq.com



2 现场试验方案

(1) 地表隆起监测点布置

现场试验中通过监测注浆区域上方地表变形情况来直接获得地表隆起值,地表隆起监测点布置如图 3 所示,地表监测区域位于隧道掌子面正前方,监测区域沿隧道轴线方向的长度为 12 m,与每循环注浆加固长度一致,监测区域沿垂直隧道轴线方向的宽度也为 12 m,与注浆加固圈的横向宽度基本一致,监测点纵向与横向间距均为 3 m,共设置 25 个监测点。

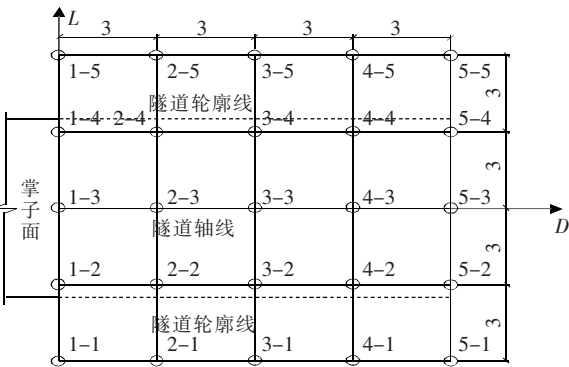


图 3 地表监测点平面布置(单位:m)

(2) 监测方案

采用水准仪进行监测点的高度测量。在每一循环注浆施工前,测量监测点的初始高度。当注浆开始后,在每次注浆结束后进行监测点的高度测量。在实际施工中为提高注浆效率,采用跳孔注浆工艺,一次可完成 2~3 个注浆孔的注浆。通过处理监测点的高度数据可获得每次注浆导致的地表隆起量以及整个循环注浆结束后的累计地表隆起量。

(3) 注浆方案

为分析不同注浆材料类型、注浆量等因素对地表隆起变形的影响,设计 4 组注浆方案,如表 1 所示。方案 1~3 注浆材料相同,都采用 C-S 浆液,而单孔单段注浆量不同,主要用于对比分析注浆量对地表隆起的影响。方案 2 与方案 4 单孔单段注浆量相同,而注浆材料不同,主要用于对比分析注浆材料类型对地表隆起的影响。由于依托工程采用定流量注浆方式,注浆压力为被动数值,故在注浆方案中没有将注浆压力作为自变量来考虑。

选择地质情况相近的 4 个注浆循环开展超前注浆导致地表隆起规律现场试验,分别实施表 1 中的 4 种注浆方案,注浆过程中监测地表隆起变形情况。

表 1 注浆方案

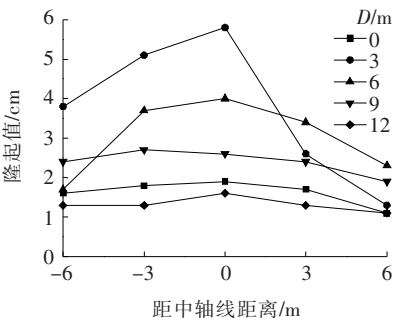
方案编号	注浆材料类型	单孔单段注浆量/m <sup>3</sup>
1	C-S 浆液	1.0
2	C-S 浆液	1.5
3	C-S 浆液	2.0
4	水泥单液浆	1.5

注浆结束后通过注浆检查孔观察渗漏水量并进行钻孔电视探查,以判定注浆加固效果是否满足要求,若注浆效果不能满足要求,则要进行补充钻孔注浆。

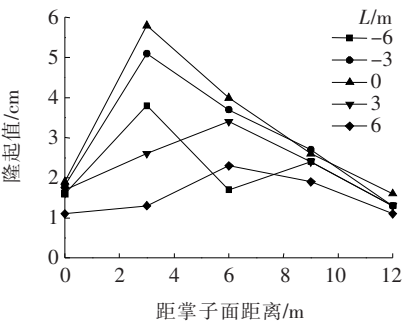
3 地表隆起结果分析

3.1 地表隆起值的空间分布规律

4 种注浆方案均顺利实施,方案 2、3 实施后地表出现由于隆起导致的裂缝,方案 1、4 实施后地表并未出现裂缝。地表监测点距掌子面的距离用  $D$  表示,距隧道轴线的距离用  $L$  表示。为分析注浆结束后地表隆起值的空间分布规律,选择方案 2 为特征工况进行分析,注浆结束后地表隆起值空间分布如图 4 所示。



(a) 垂直隧道轴线断面处



(b) 平行隧道轴线断面处

图 4 注浆结束后地表隆起值的空间分布(方案 2)

由图 4 可知:

(1) 在垂直隧道轴线断面上,地表隆起值均呈大致对称的山峰状分布,隧道轴线处的地表隆起值最大,最大值可达 5.8 cm,随着监测点距隧道轴线距离的增

加,地表隆起值逐渐降低,在注浆加固边界处( $L = \pm 6$  m 左右)地表隆起值最小,注浆加固边界处的地表隆起值为 1~2.5 cm。

其原因为:每个注浆孔所对应的注浆浆液大都呈水平浆脉的形式以注浆孔为中心分布在隧道上方区域,多个注浆孔对应的浆脉在隧道轴线附近区域重叠最多,注浆加固边界处的浆脉重叠数量最少(图 5),故地表隆起值隧道轴线附近最大,注浆加固边界处最小。

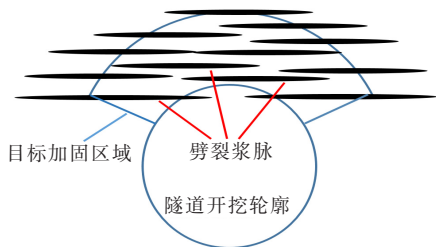


图 5 注浆结束后浆脉分布状态

(2) 在平行隧道轴线断面上,随着距掌子面距离的增加,地表隆起值呈现出先快速增加后缓慢减小的趋势。地表隆起值最大的断面并不是位于注浆加固范围的中间,而是位于距离掌子面较近的区域。在距离隧道掌子面 3 m 处地表隆起值最大,掌子面正上方断面与距离掌子面 12 m 处的断面所对应的地表隆起值处于同一水平,为 1~2 cm。地表隆起值最大的断面位于距离掌子面较近区域的原因为:依托工程采用三序钻孔注浆方式,且 2、3 序孔采用分段注浆,导致距离掌子面较近区域(1~4 m)存在重复注浆加固段[图 2(d)],重复注浆加固段上方的地表隆起值必然大于其他区域,因此地表隆起值最大的断面位于距掌子面较近区域。

### 3.2 地表最大隆起值影响因素分析

#### 3.2.1 注浆量的影响

选择注浆方案 1~3 分析注浆量对地表最大隆起值的影响,不同注浆量条件下地表最大隆起值随注浆进程的变化情况如图 6 所示。

由图 6 可知:

(1) 随着注浆进程的进行,地表最大隆起值的增长速度逐渐加快。1 序孔注浆导致的地表隆起值增长最慢,1 序孔注浆结束后不同工况的地表隆起最大值普遍不超过 1 cm。分析原因为:砂层超前注浆过程可分为“压密变形吸收→地层整体抬升”两个阶段,在砂层压密变形吸收阶段中,注浆产生的劈裂浆脉对浆脉两侧的砂层进行压密,然而压密变形被原有地层吸收,并不能引起地表的显著变形;在地层整体抬升阶段,砂

层压密变形吸收量达到极限,之后进入地层的注浆浆脉所产生的变形会传导到地表,造成地表的整体抬升,1 序孔注浆阶段属于压密变形吸收阶段,所以其引起地表抬升量很小。

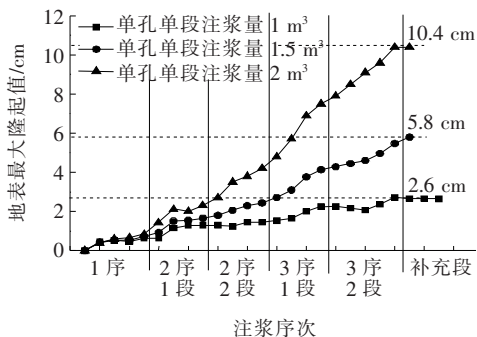


图 6 不同注浆量条件下地表最大隆起值变化曲线

(2) 对比 1 序、2 序 1 段与 3 序 1 段等 3 个注浆阶段,可发现上述 3 个阶段地表隆起值增加量依次增加,3 序 1 段对应的地表隆起值增加量为 1 序隆起值增加量的 2~4 倍,由图 2(d)可知,上述 3 个注浆阶段所对应的注浆区域为重复注浆区域,说明重复注浆对地表最大隆起值的增长速度影响很大,重复注浆会显著提高地表最大隆起值。

(3) 单孔单段注浆量对地表最大隆起值影响显著,地表最大隆起值与注浆量正相关,单孔单段注浆量 1、1.5、2 m³ 分别对应最终最大隆起值 2.6、5.8、10.4 cm,由此可见注浆量的线性增加会导致地表隆起值的非线性增加,地表隆起值的增长速度要快于注浆量的增长速度,这与砂层注浆过程的两阶段相对应,额外的注浆量会全部转化为地表隆起值。

#### 3.2.2 注浆材料的影响

选择注浆方案 2 与方案 4 分析注浆材料类型对地表最大隆起值的影响,不同注浆材料对应的地表最大隆起值随注浆进程的变化情况如图 7 所示。

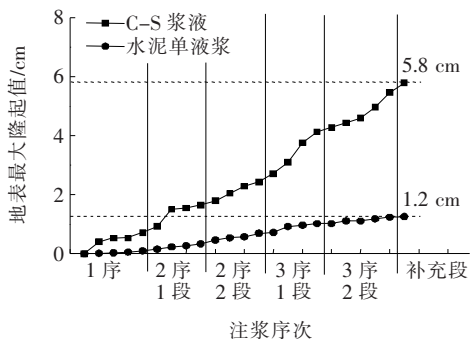


图 7 不同注浆材料地表最大隆起值变化曲线

由图 7 可知:水泥浆液、C-S 浆液分别对应地表



最大隆起值 1.2 cm 与 5.8 cm,可见注浆材料类型对地表隆起具有显著影响,在相同注浆量条件下,水泥浆液对应的地表隆起值要显著低于 C-S 浆液的地表隆起值。分析原因:水泥浆液凝胶时间较长,可长达 2~4 h,而每次注浆的时间一般不超过 1.5 h,所以水泥浆液在整个注浆过程中的浆液扩散阻力低,水泥浆液很容易扩散到目标加固范围以外,同时浆脉厚度也较小,导致水泥浆液对应的地表隆起值较低。C-S 浆液为速凝类注浆材料,浆液凝胶时间为十几秒至几分钟,在注浆过程中浆液凝胶阻力增长很快,导致 C-S 浆液扩散范围较小、注浆压力较高、浆脉厚度较大,因此 C-S 浆液对应的地表隆起值较大。

## 4 地表隆起控制方法

### (1) 严格限制注浆量

由上述分析可知,注浆量对地表隆起变形影响显著,过大的注浆量会导致地表隆起变形超限,因此,应严格限制单孔单段注浆量,以保证地表隆起变形不超限。在依托工程中,地表隆起限值为 3 cm,综合现场试验结果,单孔单段注浆量设定为  $1.2 \text{ m}^3$ 。

### (2) 减少重复注浆

由于重复注浆会显著提高地表隆起值的增长速度,重复注浆区域上方的地表隆起值过大,因此,在注浆序次上可减少重复注浆段,以消除或削弱重复注浆导致的地表隆起变形。在依托工程中,取消第 3 序钻孔第 1 段的注浆。

### (3) 配套膜袋定域注浆工艺

为减少深部注浆孔注浆过程中浆液在浅部地层的扩散,造成重复注浆,采用膜袋定域注浆工艺,隔绝浅部地层的浆液扩散。注浆工艺原理如图 8 所示,在注浆孔内设置可膨胀膜袋,在注浆开始前将膜袋膨胀,注浆开始后由于膨胀膜袋的隔离作用,浆液将只会进入深部地层。

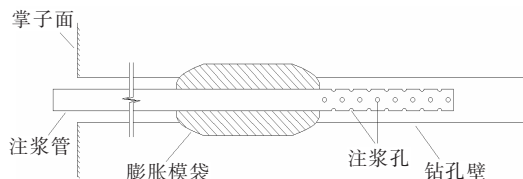


图 8 膜袋定域注浆施工工艺

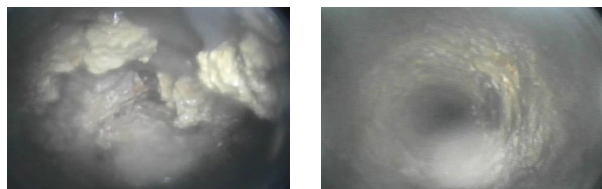
### (4) 加强地表变形监测

注浆过程中应对地表隆起变形状态进行密集监测,当注浆过程中地表隆起速率过大时,可提前结束注

浆施工,适当调整注浆参数或采取必要的施工工艺后再实施注浆。

在依托工程中,通过采取调整单孔单段注浆量为  $1.2 \text{ m}^3$ ,取消第 3 序钻孔第 1 段的注浆,配套膜袋定域注浆工艺,加强地表变形监测等措施,有效保证了注浆过程中地表隆起变形不超限,地表隆起最大值维持在 2~2.5 cm。与此同时,注浆加固效果也得到了有效保证,注浆后隧道开挖掌子面揭露浆脉较多,掌子面整体稳定,基本无水,可保证初期支护完成前的围岩稳定。

经过注浆加固后,检查孔出水情况基本为无水或慢速滴水状态,地层渗透系数小于  $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,满足隧道渗水量的要求。在检查孔内通过钻孔电视对孔内围岩进行摄像观察,检查结果如图 9 所示,由图 9 可知:注浆前由于地层未得到加固,地层完整性差,钻孔内塌落物较多;注浆后注浆加固体完整性获得明显改善,围岩具备自稳能力,未发现塌孔情况,注浆对于砂层的加固效果显著。



(a) 注浆前

(b) 注浆后

图 9 钻孔电视探查结果

## 5 结论

(1) 在垂直隧道轴线方向上,地表隆起值呈大致对称的山峰状分布,隧道轴线处地表隆起值最大;在隧道轴线方向上,地表隆起值最大的位置位于距掌子面较近的区域。

(2) 隧道超前注浆过程可分为压密变形吸收与地层整体抬升两个阶段,前一阶段并不能引起地表的显著隆起,地表隆起主要发生在后一阶段,重复注浆会显著提高地表最大隆起值。

(3) 地表最大隆起值与注浆量正相关,C-S 浆液由于具有速凝特性,其地表隆起值要显著高于水泥单液浆。

(4) 提出了超前注浆过程中地表隆起变形控制方法,主要包括:严格限制注浆量、减少重复注浆、配套膜袋定域注浆工艺、加强地表变形监测等措施。

## 参考文献:

[1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石