

# 砂卵石地层顶管施工地表塌陷 成因与处治技术

陈秋南<sup>1,2</sup>, 衣利伟<sup>2</sup>, 马缤辉<sup>1,2</sup>, 雷勇<sup>1,2</sup>, 胡兴宁<sup>2</sup>, 龚拼<sup>2</sup>

(1.湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘 要:**湘江排水口整治工程设计的顶管施工是在粉质粘土为主的地层中进行,为确保施工和周围建筑物的安全,须采用泥水平衡理论,严格控制管道周围的土体扰动和地表产生大变形.而实际施工到 W13~W15 井位之间 D1800 顶管全部位于砂卵石地层中,在施工过程中监测到地表最大沉降量达到 457.4 mm,部分地段已经冒顶地表出现塌陷.结合地层重新勘探结果,对施工引起的地表变形机理和原因等进行了总结分析.并提出了在顶管两侧设计止水帷幕、区段中间注浆加固并回填的处治措施,同时在 W13~W15 顶管区间新增一个工作井缩短顶管距离.在后续顶管施工过程中对地表沉降进行监测,结果表明地表沉降在可控制范围内,确保了施工和周围环境的安全.

**关键词:**顶管施工;土体扰动;地表变形;砂卵石地层;注浆加固

**中图分类号:**TU992.05

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-9102(2017)03-0034-07

## Research on the causes of surface subsidence of large section pipe jacking construction and treatment technology in sand gravel stratum

Chen Qiunan<sup>1,2</sup>, Yi Liwei<sup>2</sup>, Ma Binhui<sup>1,2</sup>, Lei Yong<sup>1,2</sup>, Hu Xingning<sup>2</sup>, Gong Pin<sup>2</sup>

(1.Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2.School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Xiangjiang remediation drain pipe jacking construction engineering design is carried out mainly in silty clay stratum, in order to ensure the safety of the construction and the surrounding structures, the water balance theory must be used to strictly control the disturbance of soil around the pipe and the large deformation of the ground surface. While the actual construction between W13 to W15, D1800 pipe were all located in sandy pebble stratum, during the construction process monitoring to the maximum ground settlement reached 457.4 mm, some sections had roof fallen and surface collapse had occurred. The mechanism and causes of surface deformation caused by the construction were summarized and analyzed. And some treatment measures were put forward, such as in the pipe on both sides to design waterproof curtain, to use grouting and backfill in the middle section, at the same time, in the interval of W13~W15 add a new working well to shorten the distance of pipe jacking. The ground subsidence was monitored during process of subsequent pipe jacking construction, the results show that the surface subsidence is controlled within the control range, ensures that the safety of construction and surrounding environment.

**Keywords:** pipe - jacking construction, soil disturbance, ground deformation, sandy cobble ground, grouting reinforcement

收稿日期:2017-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372303);湖南省交通厅科技进步与创新资助项目(201229)

通信作者:陈秋南(1968-),男,江西莲花人,博士,教授,主要从事岩土与隧道工程研究.E-mail: cqndoc@163.com

近年来,顶管施工技术在我国发展迅速,并广泛的应用于给排水管道工程.在湘江污水排水口整治工程中,采用该技术施工,由于排污管道的直径比较大,并且先前提提供的水文地质工程地质勘察报告与实际情况不符,当顶管到 50 m 时,致使已顶通管顶地表严重沉陷,继续机械顶进将存在较大安全隐患.本文结合湘江排水口整治工程实例,提出了解决方法,为以后类似工程提供一些参考性的建议.

## 1 顶管施工原理及理论

顶管施工是继盾构施工之后而发展起来的一种地下管道施工的方法,它不需要开挖面层,顶管施工借助于主顶油缸及管道间中继间等的推力,把工具管或掘进机从工作井内穿过土层一直推到接收井内吊起.在顶管施工中应用最多的 3 种平衡理论就是气压平衡理论、土压平衡理论和泥水平衡理论<sup>[1-5]</sup>;本工程中采用的工作面平衡理论是泥水平衡理论,但是从实际情况来看,采用泥水平衡理论设计的顶管掘进机在砂卵石层掘进的过程中出现了严重的地表沉降.

## 2 现场监测内容及布置

### 2.1 工程主要情况

根据湖南省资源规划勘测院提供的《水文地质工程地质勘察报告》污水主干 W13~W15 井 D1 800 顶管位于粉土层,采用泥水平衡机械顶管方式对该段进行施工,由于该段顶管断面全部位于砂卵石层,与之前勘察报告中给出的地质情况严重不符.为此,业主委托勘探队伍进行了二次勘察,结果显示 W13~W15 顶管段均位于砂卵石层,需进行加固处理后方可继续施工,同时由于顶管与周围砂卵石层产生过大的摩擦力,导致顶管顶力不足无法继续顶进.本次顶管施工的现场监测包括地表沉降、孔隙水压力、地下水位变化和土压力.根据现场实际情况,在垂直和平行于顶管顶进的方向上布置了监测点,如图 1 和图 2 所示.

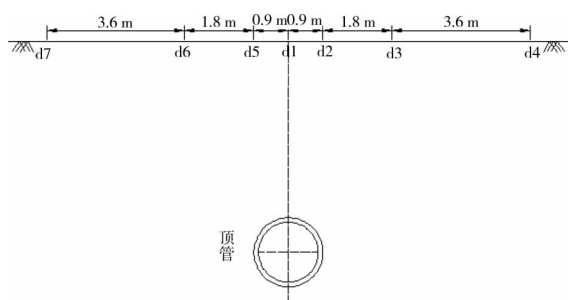


图 1 横向监测点布置

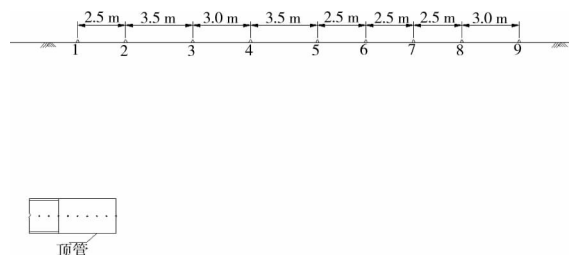


图 2 纵向监测点布置

### 2.2 地表横向变形监测及结果分析

如图 3(右侧监测点)和图 4 所示,当掘进机距离监测点比较远时,从 3 月初开始监测地表沉降,这时土体受到轻微的扰动,地表会先出现微小的沉降;然后随着掘进机距离的靠近,土体受到的扰动明显变大,土体受到的千斤顶挤压力开始变大,土体开始出现向外挤压,地表出现急剧隆起;当掘进机靠近到很近的距离时,地表反而会出现沉降现象<sup>[6]</sup>.这是因为土体开挖引起卸载,开挖面四周的土体因应力松弛而向开挖面和隧洞空间膨胀,从而引起土体移动,即地面产生沉降.当掘进机通过测点所在横截面时,地面又开始轻微隆起,这是由于土体受到掘进机向外的挤压.

当掘进机尾部离开测点时,随着掘进机的继续顶进,地表一直产生明显的沉降而且没有稳定的迹象,这是由于顶管直径有 1.8 m,采用泥浆式运输,用水量很难控制,而且通过查看排泥管排出来的弃渣中含有大量的粗砂及砾石,并且没有胶结物.当遇上这种渗透系数特别大的砾砂、卵石层,往往难以建立泥水加压平衡机制,导致注浆压力不能很好的稳定控制,无法形成泥浆套,达不到稳定托浮管节的作用,在管节的自重作用下,地表隆起时的最大位移值并不是出现在顶管轴线的正上方,而是出现在距离顶管轴线 0.5 倍顶管直径附近.地表下沉时的最大位移值在顶管轴线正上方,同时已顶通段随着时间的增加,泥浆流失严重而又未及时补浆产生间隙,引起地表下沉<sup>[7-9]</sup>.

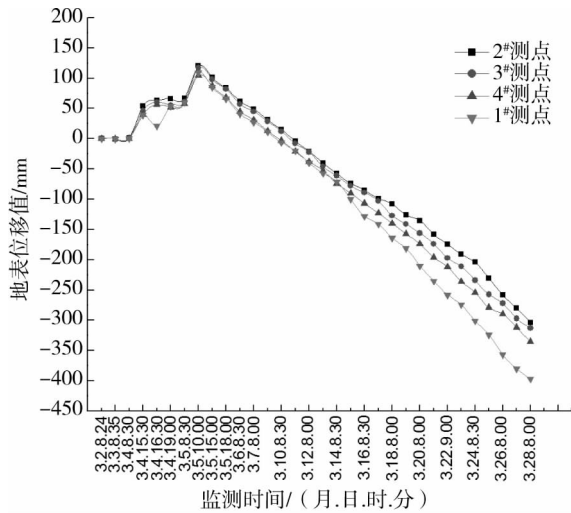


图3 测点位移随时间变形曲线

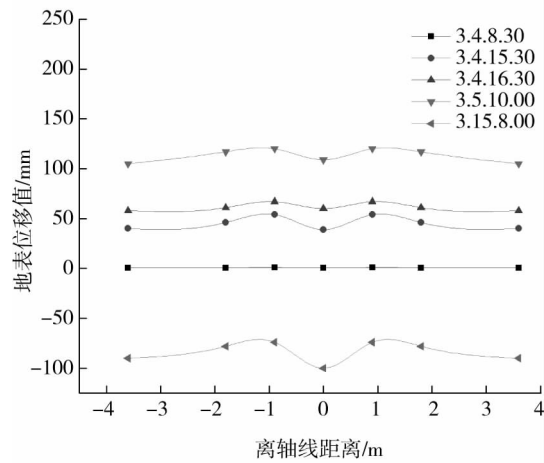


图4 地面横截面变形曲线

### 2.3 地表纵向变形监测及结果分析

如图2所示,在地表沿顶管顶进的轴线方向布置了9个监测点,地表纵向变形曲线如图5所示,随着掘进机的接近,顶管前面部分的土体因为受到千斤顶的挤压作用,使地面呈现隆起状态,随着掘进机继续前进,后方已顶通顶管段地表却产生了明显的沉降,这是由于掘进机机头顶过后,后续的管节管径较机头管径小,土体与管节之间存在环形空隙,导致土体向管道径向内移,同时由于泥浆流失严重,形不成泥浆套,在管节的自重作用下,在较短的时间内产生很大的地表下沉,当顶管到50 m时,致使已顶通管顶地表严重沉陷,如图6所示,部分地段出现塌陷的坑,顶管顶进的前方还将要通过民宅的正下方,继续机械顶进将存在较大安全隐患,于是在4月末,停止了顶进并对出现塌陷的地方进行了回填。

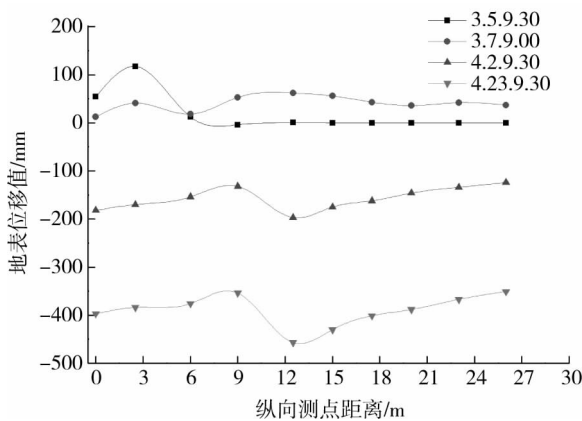


图5 地面纵向实测变形曲线

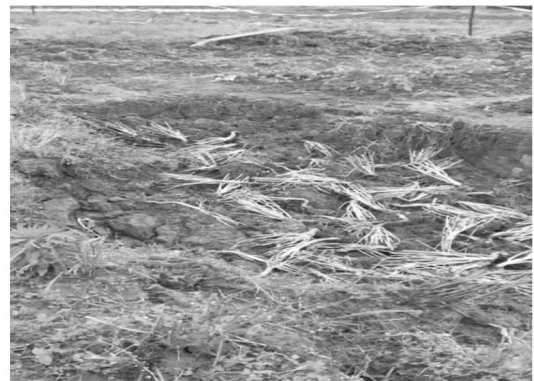


图6 现场塌陷坑

## 3 原因分析及处治方法与技术

### 3.1 Peck 公式的回归分析

对于顶管施工中引起的地层与地表变形预测方面,一般借鉴盾构施工引起的地表与地层位移的方法,像采用 Peck 法计算的盾构隧道地面沉降量计算公式如下式:

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right).$$

式中: $x$  为曲线中心到所计算点的距离; $i$  为“沉降槽宽度”。

其沉降横向分布如图7所示。Peck 法假定施工引起的地面沉降是在不排水情况下发生的,沉降槽的体积应该等于地层损失的体积。

通过对大量的地表沉降实测数据的收集,这些数据形成的曲线跟正态分布很相近,在 Peck 公式的基础上,进行线性回归分析.将其转换为  $\ln S(x) = \ln S(x)_{\max} + (-\frac{x^2}{2i^2})$ ,以  $\ln S(x)$  和  $-\frac{x^2}{2i^2}$  为回归变量进行

求解,令  $\ln S(x)_{\max}$  为回归后的常数项,  $\frac{1}{i^2}$  为回归后线性系数,回归过程如下:

$$S_{xx} = \sum \left( \frac{-x_i^2}{2} \right)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum \frac{x_i^2}{2} \right)^2; \quad (1)$$

$$S_{xy} = \sum \left[ \left( \frac{-x_i^2}{2} \right) \ln S(x_i) \right] - \frac{1}{n} \sum \left( \frac{-x_i^2}{2} \right) \sum \ln S(x_i); \quad (2)$$

$$S_{yy} = \sum \ln^2 S(x_i) - \frac{1}{n} \left[ \sum \ln S(x_i) \right]^2. \quad (3)$$

则 2 个最小二乘估计值:

$$\hat{b} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \hat{a}, \hat{a} = \overline{\ln S(x)} - \hat{b} \times \overline{\frac{-x^2}{2}}. \quad (4)$$

式中:  $x_i$  为第  $i$  个样本距隧道轴线的距离的代表值;  $n$  为样本点个数.

由上述回归可得:

$$S(x)_{\max} = \exp(\hat{a}), i = \frac{1}{(\hat{b})^{0.5}}. \quad (5)$$

根据所记录的实测数据,对 3 月 5 日上午 10 时所采集的数据进行回归计算,此时为掘进机刚好通过测点,地表向上隆起的值达到最大,如表 1 所示.

表 1 地表实测沉降值转换表

样本点	横坐标( $x$ )/m	$S(x)$ /mm	$-x^2/2$	$\ln S(x)$
d7	-3.6	97	-6.480	4.57
d6	-1.8	107	-1.620	4.67
d5	-0.9	110	-0.405	4.70
d1	0.0	109	0.000	4.69
d2	0.9	124	-0.405	4.82
d3	1.8	115	-1.620	4.74
d4	3.6	100	-6.480	4.61

得到  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  和  $S_{xy}$  的值,然后得到  $\hat{a} = 4.439\ 5$ ,  $\hat{b} = 0.103\ 1$ . 回归后的线性函数为

$$\ln S(x) = 4.439\ 5 + 0.103\ 1 \left( -\frac{x^2}{2} \right). \quad (6)$$

在施工初期,回归后的线性函数与实测数据拟合较好,能够比较直接的反映转化后的 Peck 公式与实测数据之间的关系,而且通过 Peck 公式绘成的曲线与实测数据得出的曲线基本吻合,说明该公式用于预测砂卵石地层顶管施工引起的地表变形是可行的.

### 3.2 引起地表沉降塌陷的原因

引起地表沉降的主要原因有开挖面的土层变形,由于开挖面设置的土压力  $P_0 < P_N$ ,导致地表沉降;掘进机在纠偏时引起土层变形,纠偏时必定会使土体的某一侧受到挤压,当受压侧的应力超过等效屈服应力时,就会引起受压侧的土体产生位移;掘进机尾部的空隙,因为掘进机与后续管节之间存在管径差,土体要填补这些空隙,从而产生地表沉降;土体流入管节接缝并且接缝处渗漏明显,这是因为注浆不及时且注浆压力控制不当,以及后面时间注浆液中水分的流失也使地表沉降;过多的大量抽水,使其携带出来大量的砂砾,使地层损失的体积很大<sup>[10-12]</sup>.

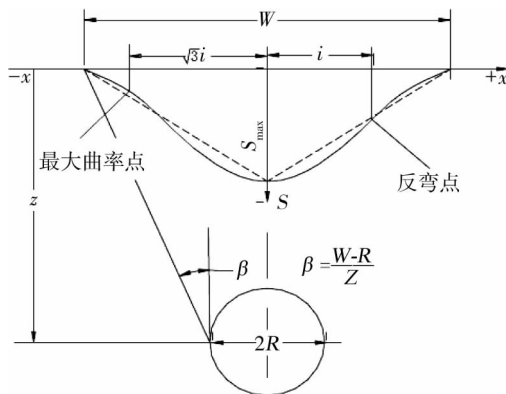


图7 沉降槽横向分布图



图8 二次勘察取土样

由于地表变形严重,业主要求勘探队伍进行了二次勘察,通过查看钻孔取出来的土样,如图8所示,结果显示W13~W15顶管段均位于砂卵石层,砂砾、卵石很多,并且没有胶结物;此外受扰动土体的固结,以及施工过程中顶管的后退等都会引起地表的沉降和变形.由于这些原因的综合影响,导致已顶通管顶地表出现严重的沉降,如图9所示,为此需进行加固处理后方可继续施工.

### 3.3 注浆止水帷幕设计参数

在顶管两侧采用高压旋喷注浆(单侧布孔3排,呈梅花状布置,排距0.4 m,列距0.5 m.孔深为低于顶管底部3 m)形成止水帷幕,止水帷幕与管外壁净距为0.50 m.所用注浆材料为P.C32.5R复合硅酸盐水泥,浆液水灰比1:1,喷嘴孔径为2~3 mm,喷射注浆压力为20~25 MPa,喷嘴旋转速度为1~1.5 Rr/min,喷嘴提升速度为20~30 cm/min,注浆量为400~600 kg/m.

旋喷注浆过程中,冒浆量小于注浆量的20%~25%时为正常;超过此值时,可通过提高喷射压力或更换新喷嘴(或小一级孔径的喷嘴),以及增加旋转和提升速度,来减少冒浆量.

### 3.4 增设工作井 W14

在W13~W15顶管段中间位置,新增一个工作井(直径7.5 m,内壁厚60 cm)如图10所示,工作井采用人工开挖或选择可以直接进入工作井的小型挖机进行挖掘,挖到设计深度后浇筑底板混凝土垫层,混凝土强度为C10,厚度为10 cm;当垫层达到强度后,进行底板混凝土浇筑,厚度为50 cm,强度等级为C25.

由于顶管在砂卵石层中所受的摩阻力很大,工作井井壁要承受超过10 000 kN的顶推力,为防止工作井结构遭到损坏,确保顶进时工作井周围土体具有充足的稳定性,在工作井建造完毕后,在周围5 m宽范围内注浆,注浆孔的平均深度约8 m,采用机械钻孔,孔径为50 mm,钻孔成形并清孔后,再插入注浆管注浆,增加周围土体对工作井的约束力.

### 3.5 顶管通道上土层注浆加固

为确保人工顶管安全,防止管涌及管顶塌方,顶管范围内砂卵石层采用水泥水玻璃双液注浆固结,在注浆区域建造C30砼止浆墙,止浆墙厚度为0.2 m,宽度5 m,以防止注浆过程中地面冒浆.在施工之前,应选取具有代表性的地段作为一个试验段,来确定钻孔工艺、浆液配合比、注浆方法和工艺.止水帷幕完成,人工顶管前进行双液注浆固结施工,注浆孔沿顶管轴线呈梅花型布置2排,孔间距为1.2 m,注浆孔布置如



图9 现场抽水的砂砾

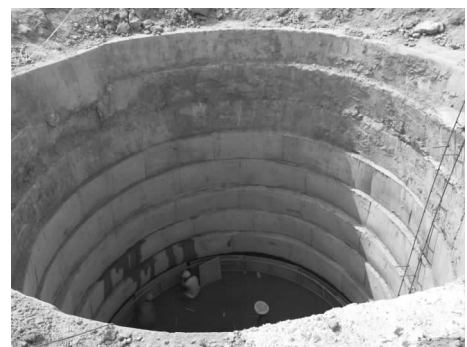


图10 新增工作井 W14

图 11 和图 12 所示.钻孔深度低于管底 3 m,孔径为 D60,注浆方式采取后退式分段注浆工艺,设计参数为孔径 60 mm,水泥浆水灰比 1.5 : 1 ~ 0.5 : 1,水泥浆液和水玻璃液体体积比 1 : 0.1 ~ 1 : 1,注浆压力 2.0 ~ 3.0 MPa.

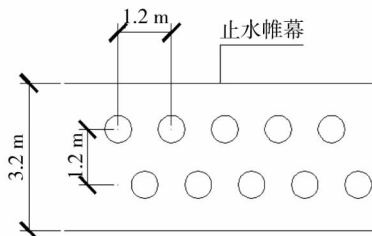


图 11 注浆孔平面布置图

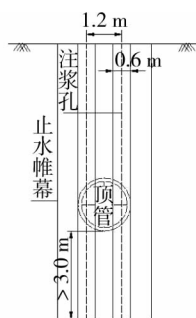


图 12 注浆孔立面布置图

## 4 效果分析

通过在顶管两侧施做高压旋喷注浆帷幕和管顶地层加固注浆,施工抽水时携带出的砂砾极少,地表沉降得到了有效的控制(见图 13),管顶中轴线地表沉降最大值约 18 mm.周围的房屋墙壁上的裂缝也没有继续发展扩大.同时有效的改善了砂卵石层的渗透性,泥浆流失较少可以形成稳定的泥浆套,对顶管起到了一定的托浮作用,弱化了顶管因自重而产生的下沉.在继续顶进的过程中,摩阻力也明显减小,千斤顶的顶力能更好的控制,在施工中产生轴向偏差的较之前小的多.

在 W13 ~ W15 顶管段区间位置新增工作井 W14,一是方便取出之前顶管顶进过程中因塌陷埋置的机头,二是大大缩短了顶管顶进距离,解决了由于顶管与周围砂卵石层摩擦力过大导致顶管顶力不足无法继续顶进的问题,加快了施工进度.

对于已顶通管道上土层采用的注浆加固,通过钻孔取样得到砂砾间较之前充满了更多的胶结物,整体性变好,渗透系数变小,改善了砂卵石地层的性质,也稳定了地表的变形,没有再出现新的塌陷坑<sup>[13-14]</sup>.

## 5 结论

1) 在湘江排水口整治工程中,施工前的勘察工作很重要,必须尽可能全面了解土层的分布情况,它对后续顶管施工工作具有指导意义.工程中勘察不到位、与实际不符,会对施工和周围环境造成严重的影响,需要引起高度重视.

2) 在采用泥水平衡原理的顶管施工中,泥浆式运输应该合理控制注浆压力,尽量减少泥浆携带出来的粗砂、砾石量.同时顶管施工时引起的地表隆起最大位移值不是出现在顶管轴线的正上方,而是在距离轴线 0.5 D 附近,由于管节的自重作用,地表下沉的最大位移值在顶管轴线正上方.

3) 在砂卵石层中进行的顶管施工时,由于砾砂、卵石的渗透性强,而胶结性很差,施工抽水时会携带大量泥沙颗粒,引起地表产生大量沉降甚至塌陷.通过对 Peck 公式的回归分析,发现实测数据绘制的曲线与其基本吻合,说明该公式用于预测砂卵石地层顶管施工引起的地表变形是可行的.

4) 对于砂卵石层的顶管施工,应通过施做注浆帷幕+地层注浆的方法进行加固,严格控制地表沉降的作用,保证泥浆套的稳定形成,同时减小了在顶进过程中的摩阻力,对施工进度和施工效果有明显的改善,对于以后处理相关类似的实际工程,具有一定的借鉴与指导意义.

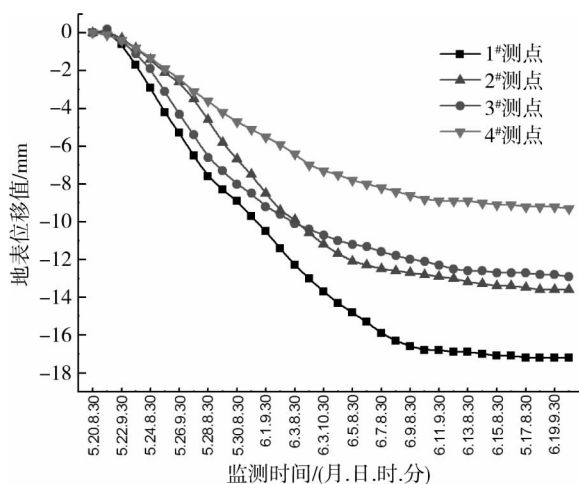


图 13 加固后测点位移随时间变形曲线

**参考文献:**

- [1] 张治国,张孟喜,王卫东.顶管推进引起施工场地竖向附加荷载分析[J].岩土力学,2014,35(2):121-128.
- [2] 周占学,李永利,马国庆.高地下水位高透水地质条件下的顶管施工技术[J].中国给水排水,2012,28(10):105-108.
- [3] 李方楠,沈水龙,罗春泳.考虑注浆压力的顶管施工引起土体变形计算方法[J].岩土力学,2012,33(1):204-208.
- [4] 霍国友,谢力.顶管技术在市政截污管道施工中的实践经验[J].中国给水排水,2009,25(6):95-97.
- [5] 董海涛.顶管施工关键技术及实例[J].中国市政工程,2009(6):58-64.
- [6] 魏纲,徐日庆,屠玮.顶管施工引起的土体扰动理论分析及试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):476-482.
- [7] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: State of the Art Report, 1969: 225-290.
- [8] 魏纲,吴华君,陈春来.顶管施工中土体损失引起的沉降预测[J].岩土力学,2007,28(2):359-363.
- [9] 朱才辉,李宁,柳厚祥,等.盾构施工工艺诱发地表沉降规律浅析[J].岩土力学,2011,32(1):158-164.
- [10] 韩霄.淤泥质土层中排水管道顶管施工法[J].西南给排水,2010,32(5):38-40.
- [11] 刘源.顶管施工中若干问题的分析与计算[D].北京:中国地质大学,2006.
- [12] 魏纲,徐日庆,肖俊,等.顶管施工引起的地面变形分析[J].中国市政工程,2012(4):27-29.
- [13] 施成华,黄林冲.顶管施工隧道扰动区土体变形计算[J].中南大学学报(自然科学版),2005,36(2):323-328.
- [14] 孙宇坤,周法根.穿越钱塘江大堤的顶管工程施工技术[J].中国给水排水,2009,25(8):95-103.