

# 顶管穿越路堤实测地基变形和扰动程度分析

王 斌<sup>1</sup>, 陈 帅<sup>1</sup>, 陶柏峰<sup>2</sup>, 谭 昊<sup>1</sup>

(1. 河海大学 交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 上海铁路局技术中心, 上海 200071)

**摘要:** 顶管穿越已固结完成的高速公路地基, 将引起土体扰动和土层损失, 使路堤产生纵、横向不均匀沉降。分析表明, 在顶管施工及降水过程中可采用路堤纵、横坡改变量不大于 0.5% 的指标对由不均匀沉降引起路堤稳定性进行动态控制和预警, 有效防止路面裂缝的发生。现场试验和实测规律表明, 顶管穿越过程中扰动区的沉降具有瞬时性和超前性, 对于砂土地基, 扰动区范围要大于按软土计算的理论值, 扰动区主要发生在管壁外 1 m 范围内, 并以此向四周扩散。顶管轴线以上土层扰动后强度降低, 压缩系数改变量超过 50%, 孔隙比改变量可达 35%, 塑性指数有不同程度减小, 土体发生扰动再固结, 是引起地表沉降的内因; 轴线以下土体主要以压密为主。顶管在穿越砂土地层的路堤时, 在两侧沉井及顶管的施工过程中应重视施工降水对高速公路路堤的影响。

**关键词:** 土力学; 顶管; 路堤; 砂土地基; 变形; 扰动

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)增 1 - 2805 - 08

## MEASURED DEFORMATION AND DEGREE OF DISTURBANCE ANALYSIS OF EMBANKMENT DURING PIPE JACKING THROUGH EXPRESSWAY FOUNDATION

WANG Bin<sup>1</sup>, CHEN Shuai<sup>1</sup>, TAO Baifeng<sup>2</sup>, TAN Hao<sup>1</sup>

(1. College of Traffic, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Technology Center of Shanghai Railway Administration, Shanghai 200071, China)

**Abstract:** When the pipe jacking has been put through sand foundation consolidated under expressway embankment loading, differential settlements will be produced in cross section and longitudinal direction of the embankment due to the ground disturbance and ground loss caused by pipe jacking construction. Field observation and analysis indicate that the index, whether the increment of the slope caused by differential settlement in cross or longitudinal direction less than 0.5% or not, can be used to control and predict the stability of the embankment dynamically during pipe jacking or water depression. It can prevent the road surface from cracking efficiently. Field experiment and measured law show that the settlement of the disturbance zone is advanced and instantaneous during pipe jacking construction, to sand ground layer, the area of the disturbance zone is larger than the value calculated according to soft soil theory. The disturbance zone is mainly in the range of 1 m beyond the pipe wall exine and expand based on this. The percentage to the compressibility increment of the soil above the pipe axis could be more than 50%, and the void ration can be larger than 35%, the strength is decreased plasticity index has been reduced in different degrees, all these lead to the reconsolidation of the soil in the disturbance zone, which brings forward the settlement of the embankment directly. Compression is the main characteristic of the soil under the pipe axis. When the pipe jacking is through sand soil layer, more attention should be paid to water depression during pipe jacking and open caisson construction which can bring disadvantage to expressway embankment.

**Key words:** soil mechanics; pipe jacking; embankment; sand foundation; deformation; disturbance

**收稿日期:** 2008 - 11 - 12; **修回日期:** 2009 - 03 - 06

**作者简介:** 王 斌(1979 -), 男, 2001 年毕业于河海大学港口及航道工程专业, 现为博士研究生, 主要从事工程力学和软土地基处理方面的研究工作。  
E-mail: binger@hhu.edu.cn

# 1 引言

近年来随着城市化进程的发展,顶管施工作为一种非开挖施工技术越来越多地被应用于市政工程,特别是给排水管线工程<sup>[1]</sup>。目前施工方法更加成熟,发展了泥浆和气压平衡等新型施工工艺,使得大管径的顶管施工成为可能。

顶管法施工将施工工作面由地上转到地下,避免了对原地面的大量开挖,可在不破坏上部构造物和周围环境的情况下实现管道的铺设,受地层埋深限制小,且比较容易控制土体的变形。然而顶管施工将不可避免引起地层扰动和地层损失,特别是软弱土层<sup>[2]</sup>和砂土、粉砂层地基,引起地表沉降和隆起。随着顶管施工更广泛的应用,对由顶管施工所引起的土体变形规律的研究越来越被重视。

在顶管穿越高速公路路堤时应解决顶管施工对路堤的扰动程度以及顶管施工过程(含降水)中路堤稳定的控制指标等两个关键问题。房莹光等<sup>[3]</sup>在 Peck 扰动区范围和地表沉降理论计算公式的基础上,考虑了扰动引起土体密实度变化的影响,对其进行了修正。魏纲等<sup>[4]</sup>对顶管施工过程中产生的挤土效应进行了数值模拟,认为挤土效应会减小地面总的沉降值与沉降槽宽度。两者都考虑了顶管施工对四周土体的影响,但没有给出影响程度的量化指标。陈卫明等<sup>[5~9]</sup>对软弱地基中由顶管施工所引起的地表或路堤沉降等进行了观测分析。对路堤而言

必须对沉降的量级进行控制,同时沉降对路堤的影响具有时间效应,因此有必要提出顶管穿越路堤时的沉降动态控制指标。

基于以上两点,本文拟通过顶管施工前后管外壁土体力学指标的对比试验尝试对扰动程度进行定量分析,并结合现场监测,针对地基已基本固结完成的高速公路路堤的特点,对由地下水位降低和顶管施工引起的路堤沉降规律进行分析,提出针对高速公路路堤特点的路堤稳定动态控制方法和建议,为相关工程和研究提供参考。

# 2 工程概况

该工程为某城市供水管道工程,管线需穿越高速公路路堤,钢筋混凝土管外径为 2 880 mm。工程地质属长江三角洲冲击-湖沼平原,顶管穿越地层位置如图 1 所示(图中  $N$  为锤击数)。

两侧顶管施工用沉井采用排水法施工,左右侧沉井底板埋深分别为 15.3 和 14.5 m。根据施工工艺需要降低地下水位 13.0~14.0 m。因此应考虑地下水位降低引起的路堤附加沉降和对路堤的影响。

沿穿越中线前、后对称布置 5 个沉降观测断面,以分析顶管施工的扰动影响范围。观测采用带测微器的二等水准闭合测量系统,精度可达 0.2 mm。水位管沿穿越中线布置,埋深 15.0 m,以监测水位变化与路堤沉降的关系。顶管施工前后,在管壁外 40 cm 处沿平行管轴线方向分别进行钻孔取芯和静力

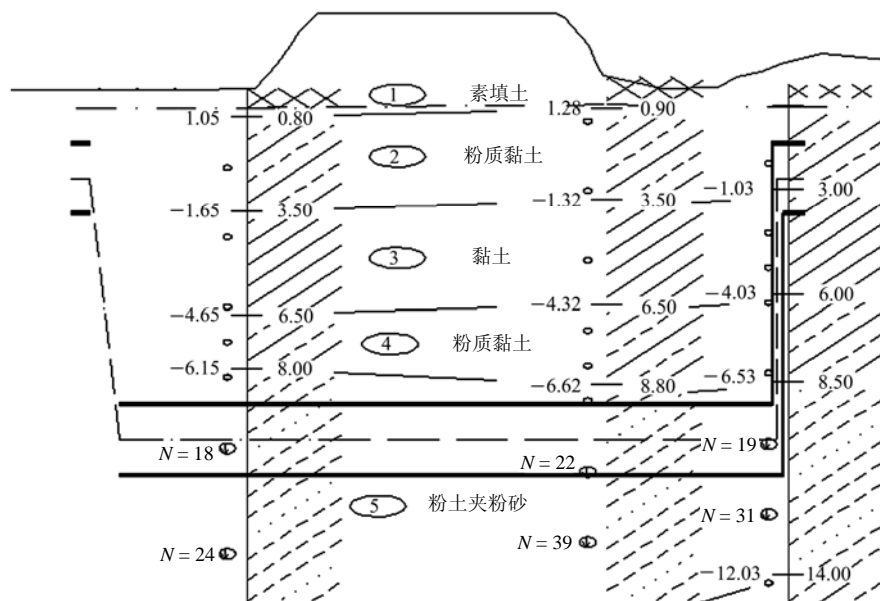


图 1 顶管穿越地层位置示意图(单位: m)

Fig.1 Ground layer of pipe jacking(unit: m)

触探对比试验, 对土体力学指标的变化情况进行分析。观测仪器布置如图 2 所示。

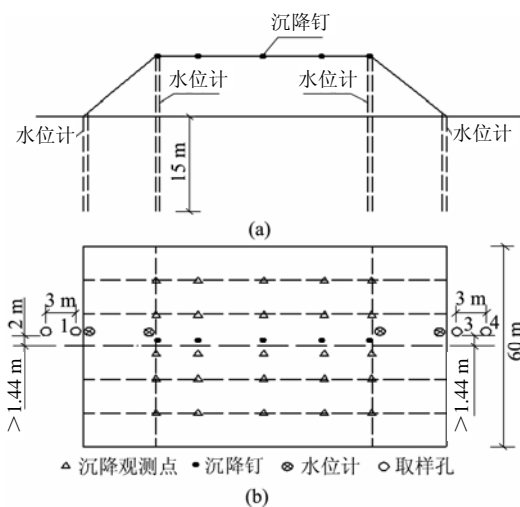


图 2 观测仪器布置图

Fig.2 Arrange plan of observation instrument

### 3 观测成果分析

大直径顶管穿越地基已经固结完成的高速公路砂土地基, 主要解决 3 方面的问题: (1) 地下水水位降低引起的路堤不均匀沉降; (2) 顶管施工使地基产生扰动, 引起地基在未扰动和扰动区之间形成差异沉降, 使路堤产生纵、横向不均匀沉降, 并影响路堤的稳定性; (3) 差异沉降的控制标准问题。

根据顶管施工工艺, 分 2 个阶段分析顶管穿越粉砂地层对路堤的影响: (1) 沉井施工期, 主要分析地下水水位降低对现有路堤的影响; (2) 顶管穿越期和扰动再固结期。

#### 3.1 地下水水位降低对路堤的影响

##### 3.1.1 变形规律分析

工作井和接收井距高速公路坡脚的距离分别为 30.7 和 25.9 m, 地下水水位最大降低值为 14 m。沉井施工时, 在沉井四周布置了井点降水。地下水位的

降低, 将在路基和井点之间形成水位差并产生向井点和沉井方向的渗流, 沉井内外的水位差将可能造成粉砂流失引起土体损失而使路基发生附加沉降。地下水水位降低产生的附加荷载使土体压密, 是引起此阶段地表沉降的主要原因。由此所引起的沉降分布情况如图 3(设置水位管时工作井已经施工结束)所示。

图 1 显示上部土层主要以粉质黏土和黏性土为主, 因此土体颗粒的孔隙大小和压缩系数对沉降的影响显著, 土体的渗透性对沉降发生的快慢有重要影响。土工试验显示, 粉质黏土和黏土的平均孔隙比为 0.890~0.750, 压缩系数为 0.45~0.24 MPa<sup>-1</sup>, 上层土体处于路堤荷载的主要压缩层范围内, 已固结稳定, 地下水位的降低对其压实影响相对较小, 穿越地层主要以粉土夹粉砂为主, 孔隙比 0.903~0.922, 平均压缩系数 0.24 MPa<sup>-1</sup>, 同时承受地下水水位降低的全荷载, 其影响程度要比上层黏性土大, 在新增荷载下会发生固结, 降水期实测最大沉降量为 13.4 mm。

地下水位的降低与地表沉降的变化具有关联性, 地下水水位回升, 地表沉降反弹, 后期沉降大主要是顶管施工对地基的扰动和由此引起的地层损失。顶管施工结束后, 地下水位的变化仍是地表沉降的主要因素。观测表明, 随着工作井一侧地下水位的回升, 沉降表现出了一定的回弹, 其中路肩处为-0.5 mm, 中央分隔带边缘为-0.3 mm, 施工全过程地下水水位降低与地表沉降变化曲线如图 4 所示。

##### 3.1.2 沉降对路堤影响的动态控制指标

图 3 水位线表明, 路堤在横向将产生不均匀沉降, 由于路堤本身具有一定的刚性, 两侧不均匀沉降易引起路面纵向裂缝的产生, 曾出现过由于坡脚降水而使路面开裂的实例, 因此必须加强降水过程中的沉降监测和预报。裂缝产生的根本原因是沉降

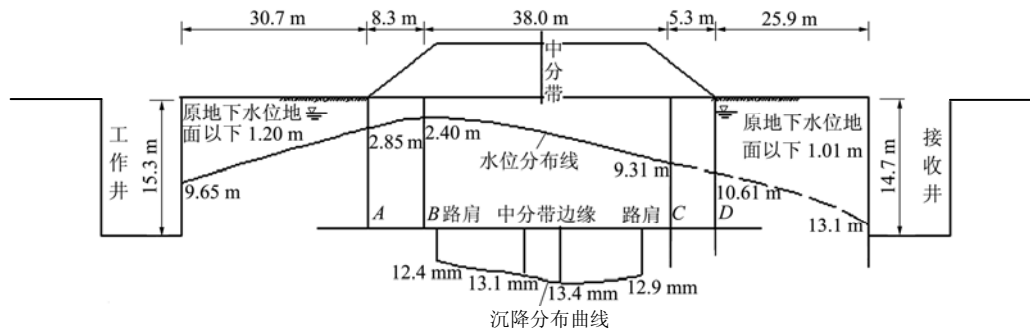


图3 沉井施工期地下水位、沉降沿横断面分布图

Fig.3 Settlement variation curve with groundwater depression in cross section

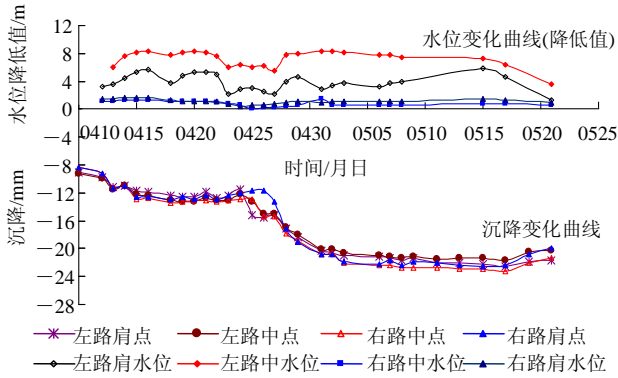


图4 施工全过程地下水位降低与地表沉降变化曲线(2008年)

Fig.4 Settlement variation with groundwater depression in construction(in 2008)

差引起的拉应力超过了路面路基的容许值, 由于无法预知拉应力的大小, 可通过路面差异沉降量的大小来判断, 过大的沉降差一方面引起路面开裂, 另一方面对行车的舒适性造成影响。

判断方法可根据由差异沉降引起的路面纵、横坡的改变量来判断<sup>[10]</sup>, 具体方法为路肩与中分带左侧路缘带的沉降差所引起的路面纵横坡的改变量应 $<0.5\%$ , 路幅宽度大, 允许的沉降差就大。工程实践表明<sup>[11]</sup>, 对由地下水位降低引起的附加不均匀沉降量采用横坡改变量控制差异沉降是可行的。

通过上述指标, 可为降水速度和顶管施工提供技术支持, 以保证路堤在降水和顶管施工过程中的稳定性。

### 3.2 顶管施工沿轴线沉降规律

顶管施工对地表沉降的影响主要表现为地基扰动和土层损失。在顶管掘进过程中, 管道与土体之间的摩阻力对周围土体产生扰动, 使四周土体产生剪切变形, 一方面使管体四周土体压密, 并可引起扰动区范围内的地表隆起, 如排水边界被破坏, 将引起大面积的水体流动现象, 在该项目顶管施工过程中, 曾发现水位管的喷水现象, 正是由于土体和

水受到挤压力所引起的; 另一方面, 剪切变形破坏了原有土颗粒的结构组成, 使得土颗粒重新排列, 在管壁四周一定区域内形成剪切扰动区, 在上部荷载和地下水位变化引起的渗流共同作用下, 将发生扰动再固结, 进而引起地面沉降。土体损失是指开挖的土体多于设计开挖量的数量, 主要发生在开挖面的前部、掘进机顶部和掘进机尾部的环形建筑空隙。尽管采用了注浆填充措施, 但仍不可避免地会产生土体损失, 从而引起地面沉降<sup>[12]</sup>。

本次观测点的设置充分考虑了对顶管掘进过程中不同位置沉降的分析。观测表明, 顶管到达位置即引起扰动区范围内的土体发生沉降或隆起, 而对扰动区外的土体则几乎无影响。顶管在穿越路基过程中各观测点的沉降增量变化情况见表1, 沿轴线方向不同施工阶段沉降随时间变化曲线如图5所示。

表1 顶管施工沉降变化表

Table 1 Settlement variation in pipe-jacking construction mm

观测时间/年月日	工作井一侧		接收井一侧	
	路肩	中分带边缘	中分带边缘	路肩
20080422(出工作井)	0.80	0.30	0.30	0.60
20080423	-0.40	-0.10	-0.20	-0.60
20080424(进路基)	-0.80	-0.80	-0.15	-0.30
20080425	3.70	1.10	-0.50	-0.25
20080426	0.40	1.80	2.55	0.00
20080427	-0.40	-0.10	0.00	1.45
20080428(出路基)	1.85	1.90	2.30	3.95
20080429(进接收井)	1.30	1.10	1.15	1.95
20080501	2.00	2.05	1.90	1.70
20080502	0.25	0.10	-0.20	0.00
20080503	0.40	0.45	1.40	1.00
顶管施工累计沉降增量	9.10	7.80	9.00	9.50

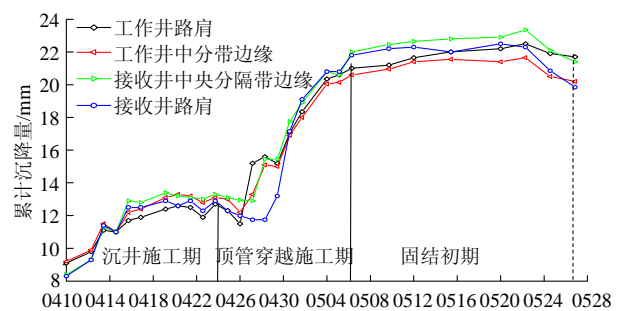


图 5 不同施工阶段沉降随时间变化曲线(2008 年)

Fig.5 Settlement variation in different construction periods (in 2008)

由表 1 和图 5 可见, 2008 年 4 月 24 日顶管进入路基后, 4 月 25 日即在工作井一侧路肩处发生了 3.7 mm 的沉降增量, 由于此时还未穿过中央分隔带, 工作井侧中央分隔带边缘的沉降增量为 1.1 mm, 接收井一侧几乎未发生沉降, 掘进中机头对前方土体的扰动以及地下水位回升甚至引起地基少量的回弹。在穿越中央分隔带时引起了地表相对较大的沉降量, 工作井一侧中央分隔带边缘为 1.8 mm, 接收井一侧中央分隔带边缘为 2.5 mm。而工作井一侧路肩的沉降增量仅为 0.4 mm。4 月 27 日, 穿越了接收井一侧路肩, 在该处亦引起了 1.5 mm 的沉降增量, 其他位置沉降量几乎为 0。

上述观测表明, 在机头顶进到达的位置, 路堤发生较大的沉降。扰动区的沉降具有超前性, 机头未达到时即发生地表隆起或沉降, 随着顶管位置的不断推进, 扰动区也逐步推进, 在扰动区外沉降几乎无变化。对扰动区范围和沉降计算方法, 魏纲等<sup>[4]</sup>给出了修正的 Peck 理论公式, 其研究表明与实测结果较为一致。在顶管施工过程中, 特别是穿越砂土地层, 如何考虑其沉降也是一个值得关注的问题。

沉降由此分为 2 个阶段: 一是扰动沉降, 具有瞬时性和超前性; 二是扰动后的再固结沉降, 具有时间效应, 稳定时间随扰动程度和土质条件而存在差异。

由图 5 可知, 2008 年 5 月 3 日在顶管施工结束后, 地下水位开始缓慢回升, 并伴随着地基的扰动再固结。在初期, 地下水位回升引起的地基回弹量部分抵消了土体的固结沉降, 但由于穿越土层为粉砂地基, 扰动后固结速度快, 与地下水位回升对地基的影响相比, 稳定时间短。在后期随着地下水位的持续上升, 地表沉降出现反弹, 并快速稳定, 这集中反应了在地下水位不断变化和顶管施工扰动的情况下, 上层粉质黏土和黏性土及下部粉砂层在路堤荷载作用下的扰动再固结规律。

顶管在掘进过程中, 扰动区的土体将受到压密作用, 在顶管施工所产生的压力作用下, 管体四周局部范围内水体将产生超孔隙水压力, 可形成水流使砂层随着水体流动而损失。为防止由此造成的土体损失, 一般采取降水或者做好两侧沉井的封水堵漏等措施。本项目在施工中就曾发现水位管的涌水、涌砂现象, 因此砂层地基的顶管施工工程, 对于水的处置应给予重视。贾红敏<sup>[13]</sup>指出对于饱和砂土可采用深层搅拌桩和高压旋喷桩 2 种方法来对洞口外土体进行加固止水, 但 2 种方法造价较高, 可根据具体情况选用。

### 3.3 沿横向地表沉降分析

为了对顶管施工的影响范围进行评价, 在距顶管穿越中心线前后  $\pm 30$  m 合计 60 m 范围内共设置了 5 个观测断面, 对沉降沿路堤纵向的变化规律进行了分析, 不同位置沿纵向沉降变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可见, 沉降主要发生在顶管穿越中线附近, 距中线愈远, 沉降量愈小。距离中线 15 m 处的最大沉降量为 14.35 mm, 30 m 处为 7.80 mm, 考虑到降水期最大沉降量为 13.40 mm, 因此可认为顶

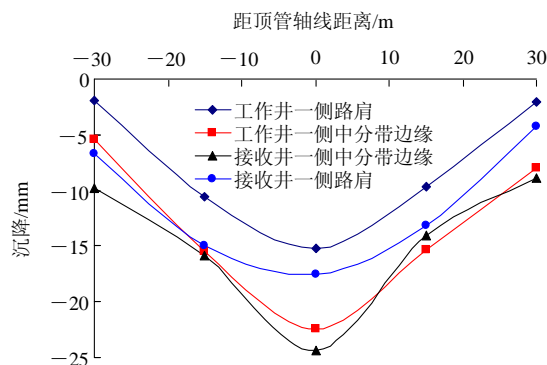


图 6 不同位置沿纵向沉降变化曲线

Fig.6 Settlement curves variation along longitudinal direction

管施工和降水的影响范围主要在顶管轴线以外 15 m 范围内。穿越中线处沉降量最大, 也是扰动最大的位置。随着距顶管轴线远近的不同, 沉降表现为轴线处大, 两侧边缘小的槽形分布。

沉降槽的大小决定了扰动区内沉降随路面纵向的变化规律, 其对路堤的影响可同样采用局部范围内的坡度改变率来判断。根据现场实测资料, 坡度的最大改变量为 0.07%, 路面的使用状况良好。并可据此实测沉降量和坡度变化, 在顶管穿越地层时对路堤的稳定状况进行动态控制。

图 6 中显示横向扰动区的大小不超过 15 m, 魏



纲等<sup>[12]</sup>提出顶管施工对土体的影响范围的水平倾角为  $45^\circ + \varphi/2$ 。根据土工试验资料, 顶管上部土层的平均内摩擦角  $\varphi = 28.3^\circ$ , 深度为 8.44 m, 由此计算的扰动区范围如图 6 所示坐标为[-14.1 m, 14.2 mm]。若按 E. J. Cording 等<sup>[14, 15]</sup>的研究结果, 对于各种软塑~硬塑的黏土, 地面沉降槽边缘点到轴线的水平距离为  $h+r$ ( $h$  为管道轴线埋深,  $r$  为管道外半径), 则扰动区的影响范围为[-(10+1.44) = -11.44 m, 10 + 1.44 = 11.44 mm], 考虑沉井施工期地下水位降低引起地面下沉, 扣除该部分的沉降, 距管轴线 15 m 处在顶管施工期的沉降增量为 2.7 mm, 而路中则达到了 9.1 mm。从数据上看, 两者扰动区大小相差 3 m 左右, 主要原因是由于前者主要适用于软塑~硬塑的黏土, 而本项目穿越地层为粉砂层, 内摩擦角大, 造成扰动区影响范围扩大。

因此在穿越砂土地基时, 应注意扰动范围扩大对周围结构物的影响, 特别是有水位变化的情下, 在计算中如何考虑其影响应予以关注。

### 4 地基扰动程度分析

在顶管穿越前后靠近顶管外壁处先后进行了静力触探和钻孔取样试验, 以对土体主要力学指标如孔隙比  $e$ 、压缩系数  $a_v$ 、塑性指数和液性指数等的扰动程度进行定量分析。

#### 4.1 静力触探对比试验

静力触探试验的锥尖阻力和侧壁阻力能较为灵敏的反映土体强度的高低。限于篇幅, 主要就锥尖阻力  $q_s$  的影响进行分析, 施工前后锥尖阻力变化曲线如图 7 所示。

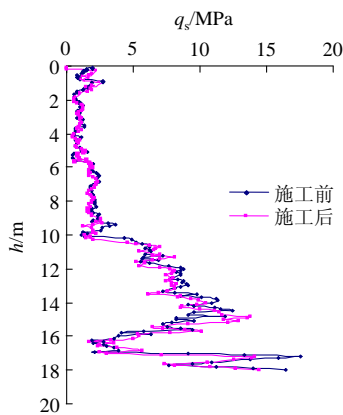


图 7 施工前后锥尖阻力  $q_s$  变化曲线  
Fig.7 Variation curves of  $q_s$  before and after construction

在顶管穿越位置以上即深度为 7.0~1.5 m 的深

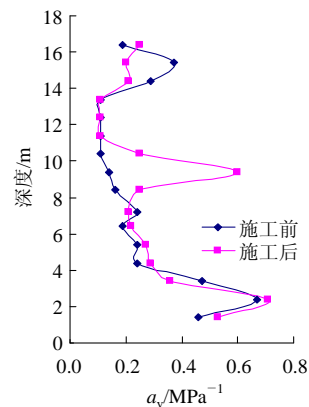
度范围内, 除个别点外, 锥尖阻力的变化不明显, 锥尖阻力变化不大; 在 7.0~13.5 m 顶管穿越深度范围内, 受施工扰动影响, 土体强度降低, 锥尖阻力减小, 分析表明平均影响量为-13.3%。其他深度范围内亦存在不同程度的影响。资料显示 25 m 深度以下范围内, 由于在顶管施工过程中实施了降水, 相当于在上部增加了荷载, 使地基重新再压缩, 土体强度得到提高, 锥尖阻力普遍增加。

#### 4.2 钻孔取样对比试验

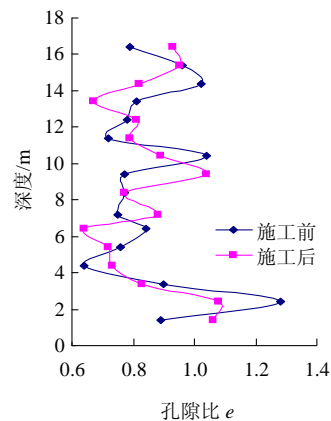
钻孔取样试验能比较清晰的分析土体力学指标的变化, 但鉴于现场取芯和土工试验过程中对土样的扰动, 其本身亦具有一定的误差。由节 3.3 的分析可知, 顶管施工存在扰动区问题, 因此可通过非扰动(或扰动程度小)区的 2 次土体力学指标的变化情况来评判土工试验误差的大小, 进而可以比较准确地分析主要力学指标如孔隙比  $e$ 、压缩系数  $a_v$ 、塑性指数和液性指数等的影响程度, 施工前后土体主要力学指标变化曲线如图 8 所示。

##### (1) 压缩系数变化情况

由图 8(a)可知, 在 0~4 m 范围内两次压缩系数曲线具有较好的一致性, 并结合整体变化趋势, 可判断两次土工试验结果的可靠性是可以保证的。



(a) 压缩系数  $a_v$



孔隙比  $e$

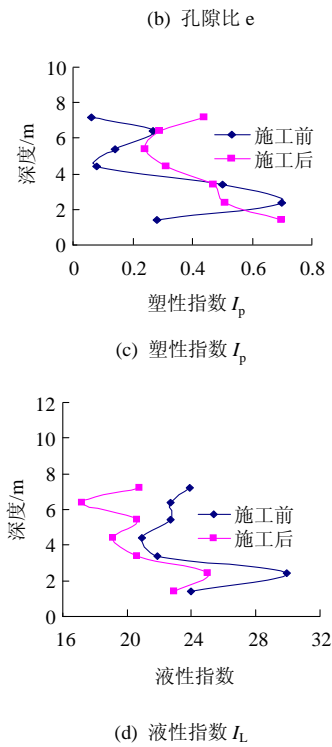


图 8 土体主要力学指标随深度变化曲线

Fig.8 Variation law of soil mechanical indices of  $e$ ,  $a_v$ ,  $I_p$ ,  $I_L$  with depth

由图 8(a)可知, 上部 0.0~4.0 m 范围内黏性土的  $a_v$  变化较小, 改变量为 6%~12%, 压缩系数在绝对值上改变不大。但在顶管穿越位置 8.2, 9.2 和 10.2 m 深度处, 改变量分别骤增为 56.00%, 328.57% 和 127.00%。根据设计资料, 顶管轴线深度为 10 m, 在顶管轴线深度以下, 土体扰动变形受下边界的约束, 在一定深度范围内表现为压缩, 而在顶管轴线深度以上, 由于存在土体损失, 管壁四周土体更多表现为应力松弛, 从而使压缩系数增大。从压缩系数随深度的变化和钻孔位置(管壁外 40 cm)来看, 主要扰动区应在管壁四周 1 m 范围内。

2.0~4.0 m 深度范围内压缩系数有所减小, 主要是地下水位降低引起土体再压缩所引起的。而在扰动区范围内, 地下水位降低所引起改变量不足以抵消扰动影响量。

由此可见, 根据土体力学指标的变化情况, 扰动区可按轴线分为上下两部分: 上部扰动区范围内土体强度降低, 而下部则主要受到压密作用。

(2) 孔隙比变化情况

由图 8(b)可知, 在 2.0~4.0 m 深度范围内, 土

体的孔隙比有不同程度的减小, 与压缩系数的变化一致, 主要由降水引起, 累计压缩量为 2.1 cm。

在顶管穿越的 8.0~10.0 m 深度范围内, 由于顶管施工时对地基产生扰动, 同时伴随顶管施工过程中少量流砂的出现, 使得顶管穿越范围内的土体的强度降低, 孔隙增大, 最大增幅达到了 35%, 粉砂层受扰动的影响要比黏性土大得多。轴线以下地基土由于上部降水的影响, 亦产生了一定的压缩量。由图 8 可知,  $a_v$  变化曲线与  $e$  的变化曲线在力学特性上具有较好的一致相关性。

(3) 塑性指数和液性指数

从塑性指数的变化可以看出, 上部黏性土的塑性指数有不同程度的减小, 塑性指数是衡量土体固结压缩特性的一个重要指标, 其降低与孔隙比的减小是相一致的。上部黏性土的液性指数均有不同程度的降低, 这主要与降水引起的土体压缩有关。

5 结 论

顶管穿越高速公路路堤, 特别是含粉砂层地基, 将使管壁四周土体产生扰动和土层损失, 引发路堤的横向和纵向不均匀沉降, 扰动程度与土质及施工工艺有关, 如施工过程中存在降水, 还将引发附加不均匀沉降增量。观测及试验结果表明:

(1) 当路堤两侧沉井施工需要采取降水措施时, 应根据地质情况和降水深度合理确定降水速率。实践表明, 当差异沉降引起的路堤纵、横向坡度改变量不大于 0.5% 时, 可保证路面不开裂和行车的平顺舒适。因此可通过该指标对降水和沉井施工时引起的沉降进行动态控制和预警, 以便采取有效的措施避免路面开裂和影响路面的使用性能。

(2) 顶管穿越高速公路路堤, 扰动区范围内路堤的沉降具有瞬时性和超前性, 为发生沉降的主要时段。对于粉砂或砂土地基, 在计算扰动区时, 应考虑砂土的特性对扰动区计算结果的影响。对于施工时存在降水的情况, 还应考虑水位降低对扰动区范围的影响。施工扰动所引起路堤不均匀沉降同样可采用 0.5% 的纵横坡改变量来进行控制, 以便调整施工工艺和顶管掘进速度。

(3) 顶管施工对管壁四周土体的扰动主要发生在管壁外 1 m 范围内, 并由此向四周扩散, 扩散程

度与土体内摩擦角有关。根据试验,扰动区可以轴线为标准分上、下两个区。轴线以上的区域土体强度降低,压缩系数增大超过 50%,孔隙比可达 35%,土体发生扰动再固结,是引起地表沉降的主要原因。轴线以下的土体主要以压密为主。

(4) 当顶管穿越高速公路时,特别是含砂土层,应处理好水与砂的关系,防止出现流砂现象,避免地基出现局部空洞,给后期高速公路的运营带来隐患。

由于地质条件的复杂性,上述对于扰动程度的量化评价在普遍性上存在一定的局限性,可对相关研究提供参考。

### 参考文献(References):

- [1] 余彬泉,陈传灿.顶管施工技术[M].北京:人民交通出版社,2000.(YU Binquan, CHEN Chuancan. Pipe jacking construction technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2000.(in Chinese))
- [2] 王芳.软土地基中顶管施工的关键问题[J].施工技术,2006,35(增2):25-26.(WANG Fang. The key problems during pipe-jacking construction in soft soil[J]. Construction Technology, 2006, 35(Supp.2): 25-26.(in Chinese))
- [3] 房营光,莫海鸿,张传英.顶管施工扰动区土体变形的理论与实测分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(4):601-605.(FANG Yingguang, MO Haihong, ZHANG Chuanying. Theoretic and testing analysis of soil deformation in the area of disturbance caused by pipe-jacking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 601-605.(in Chinese))
- [4] 魏纲,魏新江,徐日庆.顶管施工引起的挤土效应研究[J].岩土力学,2006,27(5):717-722.(WEI Gang, WEI Xinjiang, XU Riqing. Study of soil-compacting effects induced by pipe jacking construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 717-722.(in Chinese))
- [5] 陈卫明.特殊地段顶管施工沉降控制技术[J].中国市政工程,2003,(6):35-38.(CHEN Weiming. Settlement control technology for pipe-jacking construction in special areas[J]. China Municipal Engineering, 2003, (6): 35-38.(in Chinese))
- [6] 屠毓敏.长距离顶管穿越海堤时的堤面沉降分析[J].中国市政工程,2001,(1):53-55.(TU Yumin. Surface settlement from long distance pipe jacking through an embankment[J]. China Municipal Engineering, 2001, (1): 53-55.(in Chinese))
- [7] 邹长中.吴闵污水外排穿越黄浦江顶管的施工[J].地下空间,1998,18(5):413-418,428.(ZOU Changzhong. The construction of Wumin wastewater out deposition across huangpu river pipes[J]. Underground Space, 1998, 18(5): 413-418, 428.(in Chinese))
- [8] 周丰年,刘传杰,张美富.顶管施工对长江大堤影响的实测研究[J].人民长江,2007,38(2):19-21.(ZHOU Fengnian, LIU Chuanjie, ZHANG Meifu. Measurement and research on influence of pipe thrusting construction on the changjiang levee[J]. Yangtze River, 2007, 38(2): 19-21.(in Chinese))
- [9] 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,2002,(4):27-29.(WEI Gang, XU Riqing, XIAO Jun, et al. Analysis of ground deformation caused by pipe-jacking construction[J]. China Municipal Engineering, 2002, (4): 27-29.(in Chinese))
- [10] 王斌.高速公路拼接段沉降变形规律及处理对策研究[硕士学位论文][D].南京:河海大学,2004.(WANG Bin. Study of settlement distortion characteristics of expressway connection sections and the foundation treatment[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2004.(in Chinese))
- [11] 徐泽中,王斌,许永明,等.沪宁高速公路扩建工程软土地基沉降控制标准与处理技术研究[R].南京:河海大学,2005.(XU Zezhong, WANG Bin, XU Yongming, et al. Research on settlement control criterion and treatment method on soft soil ground of huning expressway extension project[R]. Nanjing: Hohai University, 2005.(in Chinese))
- [12] 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.(WEI Gang, XU Riqing, TU Wei. Testing study and analysis on soil disturbance induced by pipe jacking construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 476-482.(in Chinese))
- [13] 贾红敏.饱水砂土地段顶管的几点经验[J].施工技术,2005,34(6):29-30.(JIA Hongmin. Some experience about the pipe jacking technology adopted in saturated sandy soil areas[J]. Construction Technology, 2005, 34(6): 29-30.(in Chinese))
- [14] CORDING E J, HANSMIRE W H. Displacements around soft ground tunnels[C]// Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1975: 571-633.
- [15] CHI S Y, CHERN J C, LIN C C. Optimized back-analysis for tunnelling-induced ground movement using equivalent ground loss model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 159-165.



---

**收稿日期:** 2008 - 11 - 12; **修回日期:** 2009 - 03 - 06

**作者简介:** 王 斌(1979 - ), 男, 2001 年毕业于河海大学港口及航道工程专业, 现为博士研究生, 主要从事工程力学和软土地基处理方面的研究工作。  
E-mail: binger@hhu.edu.cn