

# 盾构停推对土体扰动影响的分析

姜 培<sup>1,2</sup>, 周文波<sup>3</sup>

(1. 上海大学 土木系, 上海 200072; 2. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200232; 3. 上海城建集团, 上海 200232)

**摘要:**盾构掘进将对周围土体产生扰动,因此盾构施工将不可避免地导致地面沉降。相较于盾构正常推进时,盾构停推会引起更大的地面沉降,这与土体受到较大扰动有关。结合上海某公路隧道盾构施工实例,分别分析了地面沉降和超孔隙水压力在盾构停推前后的历时波动曲线。分析结果表明,盾构停推阶段周围土体超孔隙水压力的消散程度与土体扰动程度是相对应的;土体受到盾构施工扰动时,孔隙水压力反应灵敏,而地面沉降存在一定的滞后性。

**关 键 词:**盾构停推; 土体扰动; 地面沉降; 超孔隙水压力; Pearson 相关系数

**中图法分类号:** TV554

**文献标志码:** A

**DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.13.014

盾构隧道施工中,盾构通过之处难免对附近土体产生扰动。扰动程度的大小受到许多因素的影响,许多学者对此进行了研究并取得了很多成果,例如周海群研究了盾构掘进速度对地面沉降的影响<sup>[1]</sup>,发现其最终取决于掘进速度变化幅度的大小;魏纲等人研究了施工参数对地面隆起的影响<sup>[2]</sup>,发现盾构机总推力对地面隆起影响最大;赵玉勃等人推导了盾构推进时正面推力、盾构与土体间的摩擦力引起的周围土体附加应力表达式<sup>[3]</sup>,得到了周围土体附加应力沿圆周方向的分布规律;魏新江等人研究了盾构机参数关系及其对地层位移的影响<sup>[4]</sup>,得出盾构穿越阶段地面沉降与土舱内外压力差值成反比。

盾构施工中由于各种原因会出现停推现象,包括等待管片拼装和出土等工艺原因及机械设备故障等等。盾构停止时间较长时相应的地面沉降往往比正常推进时大,说明盾构停推会加剧周围土体的扰动,这方面的研究鲜有发表。超大直径盾构由于开挖面积大,停推对土体扰动的影响更加明显。本文结合上海某公路隧道工程的试验段,对超大直径土压平衡盾构停推对土体扰动影响进行研究。

## 1 超孔隙水压力消散机理

在土体受到外加力时,孔隙水无法排出,孔隙水压

力也将马上增加,这种由外加荷载引起的附加孔隙水压力,称为超孔隙水压力。如果土体不能产生侧向位移,超孔隙水压力即等于外加荷载,土骨架受到的有效应力保持不变。在有边界排水的条件下,孔隙水将向土层自由边界渗出,渗出的同时,超孔隙水压力降低并逐渐趋于消失,这种现象称为超孔隙水压力的消散。在消散的同时,土骨架将产生压缩,孔隙减小,有效应力随之提高。当超孔隙水压力全部消散,孔隙水渗出随即停止,有效应力的增加值即等于外加荷载。

按照盾构施工的进程,盾构开挖至某处时,由于盾构刀盘面板和土舱内土体对前方土体的挤压作用和盾尾同步注浆压力的作用等施工因素,周围土层将形成超孔隙水压力区。盾构隧道周围的超孔隙水压力的分布形态如图 1(a)所示,其中,点 A 处的超孔隙水压力与开挖面支护压力、盾尾同步注浆压力、注浆填充率等有关。当盾尾离开该处后,由于土体表面的应力释放,浆液凝固收缩引起压力下降,以及土体内孔隙水沿管片裂隙排出,隧道周围的超孔隙水压力缓缓下降,呈现如图 1(b)所示的形态,随着孔隙水排出,引起周围土体固结,表现出来的是地面沉降。

## 2 试验设计

为了深入研究盾构停推时间与地面沉降及超孔隙

水压力的关系,在隧道施工试验段布置了 4 个监测断面,监测项目包括孔隙水压力和地面沉降,监测点平面布置见图 2。

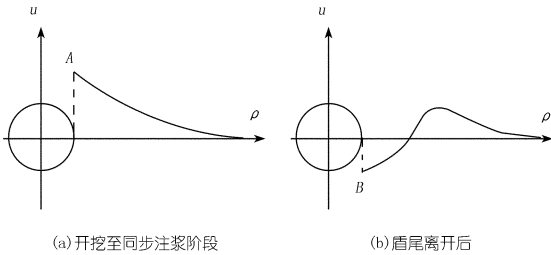


图 1 隧道周边超孔隙水压力变化情况

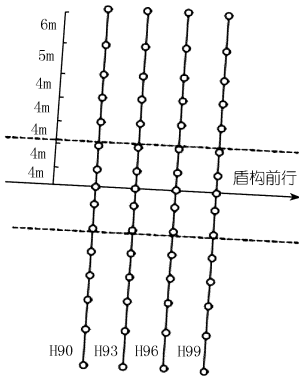


图 2 地面沉降监测断面布置

H90 和 H96 断面上的超孔隙水压力监测点布置见图 3,SK3 系列表示 H90 断面的监测点,SK6 系列表示 H96 断面的监测点。

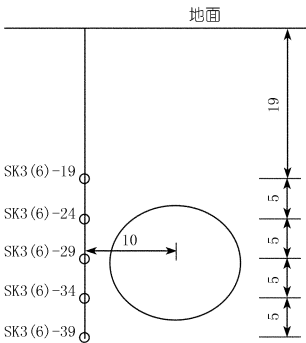


图 3 H90、H96 断面孔隙水压力监测点布置(单位:m)

在盾构切口到达之前到盾尾脱出之后的时间内每隔一段时间记录一次地面沉降和超孔隙水压力的数据。根据这些数据,可以绘制出沉降历时曲线和超孔隙水压力历时曲线。再比较这两种曲线,可以找到地面沉降和超孔隙水压力之间的关系。

这里对“推进环号和盾构机所处相对位置”做一下解释:根据直径 14.27 m 土压平衡盾构的尺寸和管片拼装位置,推进环号在切口后方约 5 环即 10 m,在盾尾前方约 2 环即 4 m。

3 地面沉降与停推时间的关系

上海某公路隧道施工中,盾构机在监测断面附近有两次较长时间的停推。在 87 环完成和 88 环开始推进之间,于 2010 年 8 月 23 ~ 24 日停止了约 19 h。96 环推进过程中遇到机械故障,于 2010 年 8 月 26 ~ 28 日停止了约 31 h。

图 4 为 4 个监测断面中心点地面沉降的历时曲线。从图中可以看出,盾构停推使地面沉降不断增加,恢复推进后,沉降减缓或者产生上抬趋势。通过两处停推的对比可以发现,停推时间越长,地面增加的额外沉降越大。

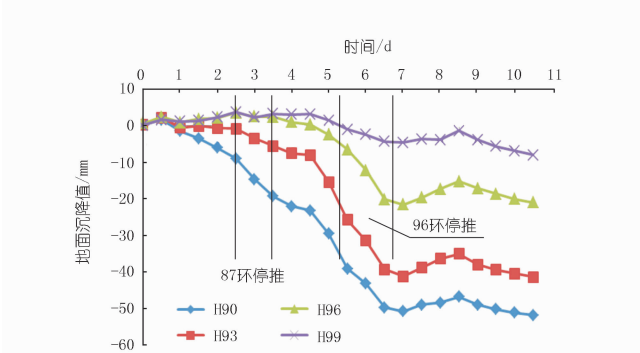


图 4 各断面中心点地面沉降历时曲线

将两段停推时间地面沉降曲线单独进行研究,对影响明显的沉降曲线进行了非线性回归分析,见图 5。87 环完成后停推阶段,开挖面附近的 H90 和 H93 断面影响较大,拟合出的  $R^2$  分别为 0.936 5 和 0.911 8;96 环停推后,盾尾附近的 H93 和 H96 断面影响较大。由于这两处的地面沉降值基本一致,图 5(b)中只反映了 H90 处的影响情况,其对数关系式的  $R^2$  为 0.933 2。

对图 5 中的曲线进行分析可知,盾构机停推对不同位置的地面沉降影响有较大的区别,具体可以得到如下结果:87 环盾构停推阶段,H90 位于盾壳上方,水平方向距离开挖面 4 m;H93、H96 和 H99 位于开挖面前方,距离分别为 2,8,14 m。

停推阶段,H90 地面沉降最大,H93、H96 和 H99 随着与开挖面距离的增大,地面沉降逐渐减小。96 环盾构停推时,H90 和 H93 位于盾尾后方,与盾尾距离分别为 10 m 和 4 m;H96 和 H99 位于盾壳上方,与盾尾距离分别为 2 m 和 8 m。停推阶段 H93、H96 沉降最大,H90 沉降较小,H99 沉降最小。这些结果将用来和超孔隙水压力的变化情况作对比分析。

4 超孔隙水压力与停推时间的关系

图 6 是 H90 断面和 H96 断面各监测点超孔隙水压力历时曲线。

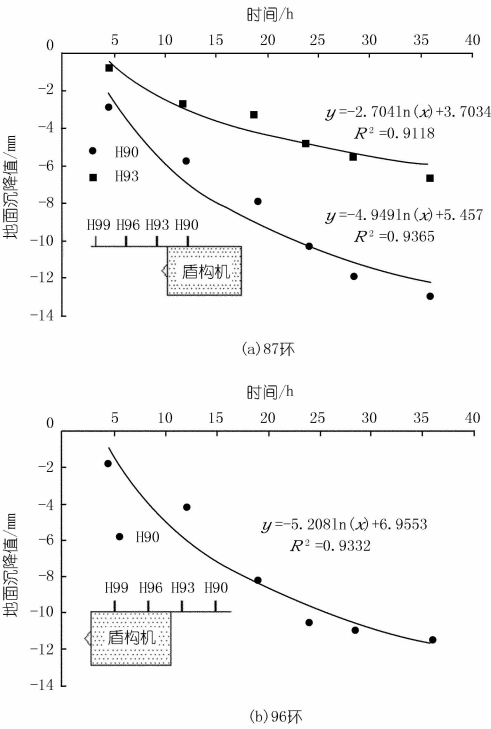


图 5 停推地面沉降与停推时间关系

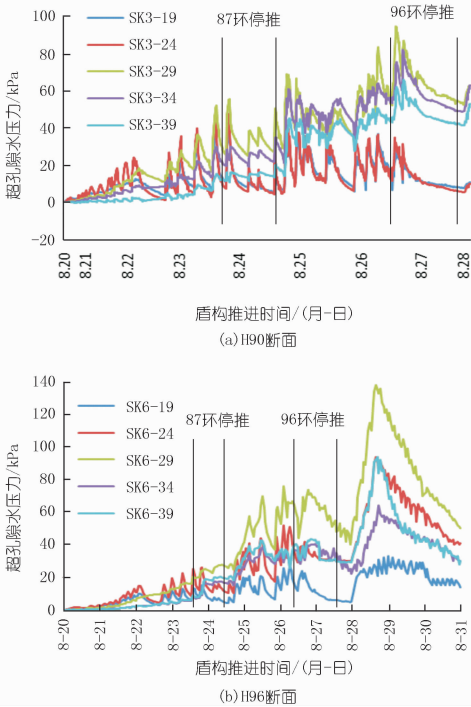


图 6 超孔隙水压力历时曲线

对图中的曲线进行分析可以得到以下结果。

(1) 盾构在正常推进、停推拼装过程中,超孔隙水压力呈现规律性波动。随着盾构的推进,各监测点的测量值随即上升,当停止推进开始拼装时,测量值随即开始下降。盾构机距离越近,波动值越大。就盾构机相对位置而言,盾尾附近波动最大,从盾尾往开挖面波

动不断减小。

(2) 盾构停推时间越长,超孔隙水压力下降越多。两次较长时间停推中,超孔隙水压力下降都比正常停推拼装时大。第二次停推时间比第一次时间长,其相应超孔隙水压力下降明显大于第一次。

(3) 盾构切口通过 H90 断面过程中,超孔隙水压力不断波动上升。而在 87 环完成推进后较长时间的停推阶段,H90 断面超孔隙水压力值有了明显的下降。当盾构恢复推进直到盾尾离开 H90 断面,超孔隙水压力值又不断波动上升,而且达到更高值。

(4) H96 断面超孔隙水压力的波动情况与 H90 断面类似,不同的是 H96 断面处于盾构停推时的盾尾附近,所以停推引起的超孔隙水压力下降更大。

为了更好地分析停推阶段超孔隙水压力的变化情况,将 H90 断面单独列出,并进行非线性回归分析,得到超孔隙水压力历时曲线。由于 5 个监测点的变化曲线类似,只选择最上方的监测点 SK3 - 19 的数据进行分析,见图 7。87 环完成后停推阶段,由于土舱压力下降,进行了 3 次微小距离推进,使土舱压力上升到控制土压。因此,H90 断面的超孔隙水压力历时曲线出现了 3 次起伏,这里选择了其中一段曲线。

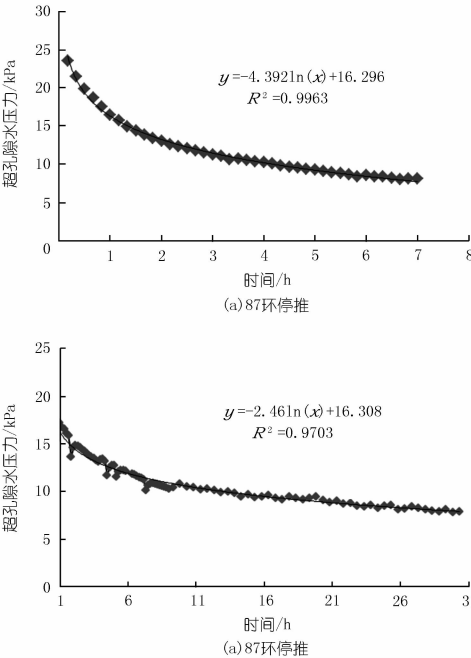


图 7 停推引起 H90 断面超孔隙水压力历时曲线

5 相关性分析

为了说明地面沉降和超孔隙水压力变化之间的关系,选取了数据样本中同一时间各自的数据,采用 Pearson 系数来分析其相关性。

表 1 96 环停推 H90 断面地面沉降和超孔隙水压力数据

时间/ h	地面沉降/ mm	超孔隙 压力/kPa	时间/ h	地面沉降/ mm	超孔隙 压力/kPa
4.50	-1.72	11.67	24.00	-10.52	8.60
12.00	-4.07	10.10	28.50	-10.98	8.00
19.00	-8.17	9.30	36.00	-11.58	7.40

将地面沉降值和超孔隙水压力值以散点图的形式反映在图 8 中,并计算了两组数据的 Pearson 系数,结果为 0.971 9,说明地面沉降和超孔隙水压力之间有很强的相关性。而地面沉降是由土体扰动所引起的<sup>[5]</sup>,进而可以说明土体扰动和超孔隙水压力也具有很强的相关性。

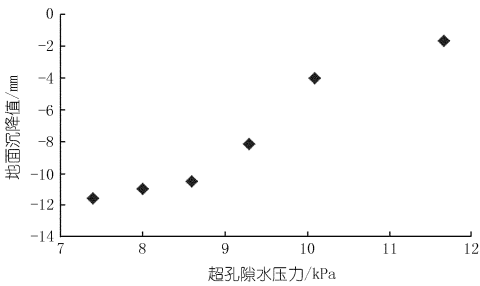


图 8 96 环停推 H90 断面地面沉降和超孔隙水压力散点

6 结 论

利用上海某公路隧道试验段监测数据,分别拟合出地面沉降和超孔隙水压力在停推阶段的历时曲线。经过对比分析和 Pearson 相关分析获得了以下结论。

(1) 盾构停推阶段,各个断面由于和盾构机的相对位置不一样,地面沉降受到的影响有较大区别。同一断面上,土体扰动和超孔隙水压力的变化有很强的相关性。说明了盾构停推阶段周围土体扰动程度与超孔隙水压力的消散程度是相对应的。

(2) 87 环完成后的停推阶段,3 次微小距离推进过程中孔隙水压力历时曲线出现了 3 次明显的起伏,而地面沉降历时曲线没有明显起伏。这充分证明,土体受到盾构施工的扰动时,孔隙水压力反应灵敏,而地面沉降存在一定的滞后性。这和超孔隙水压力消散机理中,形成时土体有效应力不变,消散时有效应力增加引起土体固结的过程相一致。

因此,对超孔隙水压力的监测可以运用在盾构施工对土体扰动的研究中,其数值大小和波动程度可以作为土体扰动程度的判定依据。超孔隙水压力监测还可以让施工技术人员快速了解土体的扰动情况,为施工参数调整赢得时间。

参考文献:

[1] 周海群.软土地层盾构施工中掘进速度对地面沉降的影响分析[J].铁道建筑,2012,(3): 45-48.

[2] 魏纲,周洋,魏新江.土压平衡式盾构机土舱压力控制仿真分析[J].地下空间与工程学报,2012, 8(S2): 1703-1709.

[3] 赵玉勃,张忠苗.盾构法隧道推进引起周围土体的附加应力分析[J].岩土工程学报,2010, 32(9): 1386-1391.

[4] 魏新江,周洋,魏纲.土压平衡盾构掘进参数关系及对地层位移影响的试验研究[J].岩土力学,2013, 34(1): 73-79.

[5] 李东海,刘军,刘继尧,等.盾构隧道施工引起的地表沉降因素分析[J].市政技术,2008, 26(2): 131-132.

(编辑:郑毅)

Analysis on soil disturbance caused by shielding cease

QIANG Pei<sup>1,2</sup>, ZHOU Wenbo<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200232, China; 3. Shanghai Urban Construction Group Corporation, Shanghai 200232, China)

**Abstract:** As shield driving would disturb around soil, so the shield tunneling inevitably leads to the ground subsidence. However, compared with the normal driving, the larger ground settlement would be caused by shielding stop due to more around soil disturbed. Based on an engineering example of highway tunnel excavation in Shanghai, the ground settlement and excess pore water pressure curves in the period of shielding stop are analyzed. The analysis results show that dissipation of excess pore water pressure is correspondent to around soil disturbance. When around soil is disturbed, the reaction of pore water pressure is sensitive but ground settlement is usually delayed in a certain degree.

**Key words:** soil disturbance; ground settlement; excess pore water pressure; Pearson correlation coefficient