

# 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律

孙玉永, 周顺华, 宫全美

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 在城市环境中, 如何预测和控制盾构掘进引起的地层移动以保证地下既有构筑物的安全, 是设计和施工亟待解决的技术问题。以上海某盾构隧道施工段为工程背景, 应用现场监测和数值模拟相结合的方法, 研究盾构掘进施工引起周围地层位移场的分布规律。研究表明: 盾构掘进对周围地层位移场的影响主要分为接近、穿越和远离测孔3个阶段。在盾构掘进接近和穿越阶段, 隧道侧向土体以隆起、沿盾构掘进方向向前和向隧道外侧的位移为主; 在远离阶段, 侧向土体则发生沉降、向前和向隧道内的三维运动趋势。由于该工程隧道埋深大, 隧道中心上方土体主要发生沉降和向前的位移趋势。根据数值计算所得隧道上方不同深度土层的横向沉降槽曲线, 建立用于预测隧道上方深层土体沉降的修正 Peck 公式, 计算结果与数值结果吻合较好。

**关键词:** 隧道工程; 盾构掘进; 软土地区; 深层位移场; 数值分析

**中图分类号:** U 455.43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)03 - 0500 - 07

## DISTRIBUTION OF DEEP DISPLACEMENT FIELD DURING SHIELD TUNNELING IN SOFT-SOIL AREAS

SUN Yuyong, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The main issue considered both in design and construction in urban environments is controlling ground movement to keep the safety of existing buildings. Based on a shield tunnel construction in Shanghai, the ground displacement distribution around tunnel is studied by field measurement and numerical analysis. It is shown that the influence of shield excavation on soils around tunnel can be divided into three stages, including shield approaching, crossing and leaving the measuring holes. While the shield approaches and crosses the measuring holes, the ground movements of lateral soil behave heaving, moving along the shield tunneling direction and outward the tunnel. Settlement, moving along the shield tunneling direction and inside the tunnel are main deformation characteristics when the shield leaves the measuring holes. Settlement and forward movement the soils above tunnel because of the large buried depth. According to the calculated layered settlement above tunnel, modified Peck formula used to predict the settlement of deep soils is established; and the results are compared with those of simulation.

**Key words:** tunneling engineering; shield tunnelling; soft-soil areas; deep displacement field; numerical analysis

## 1 引言

近年来, 随着盾构施工技术的不断完善, 盾构法在地铁施工中得到了广泛应用, 上海、北京、南

京、广州、深圳、天津等地铁施工中基本都采用盾构法。由于地质条件和施工工艺的限制, 盾构掘进不可避免地引起对周围地层的扰动, 产生地层变形及地面沉降。目前, 盾构掘进常以地表的隆沉值为控制指标, 地层的变形预测也主要集中在地面的隆

**收稿日期:** 2008 - 09 - 19; **修回日期:** 2008 - 12 - 14

**作者简介:** 孙玉永(1980 - ), 男, 2003年毕业于郑州大学水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事基坑及盾构隧道方面的研究工作。E-mail: sunyuyong2@126.com

沉变形方面<sup>[1~4]</sup>, 而对于盾构掘进施工引起土层内部位移场的研究成果和实测资料相对较少<sup>[5~7]</sup>。近年来, 随着我国城市现代化建设的迅猛发展, 盾构隧道近距离穿越的情况越来越多、越来越复杂, 因此如何准确预测和控制盾构掘进引起的土层深层位移, 保护既有地下构筑物的安全便成为设计和施工亟待解决的重大技术问题。

目前, 盾构施工引起土层变形的预测方法主要有经验法<sup>[1]</sup>、解析法<sup>[8~11]</sup>和有限元法<sup>[12~15]</sup>等。经验法主要是 Peck 公式<sup>[1]</sup>, 该法假定地面沉降的横向分布类似正态分布曲线, 且沉降槽的体积等于地层损失的体积, 上海地区许多实例也证明了它的实际使用效果。但该公式中参数的选取带有经验性, 未考虑土层条件和施工过程, 且不能预测土层内部的位移场分布。C. Sagaseta<sup>[8]</sup>利用不可压缩土体的地层损失的概念, 采用镜像技术, 给出了应变场的近似解。A. Verruijt 和 J. R. Booker<sup>[9]</sup>在 C. Sagaseta 的研究基础上, 结合土层泊松比和隧道空间椭圆化的影响, 得到均质弹性半无限土层垂直向和水平向变形的解析解, 但该方法预测的沉降槽宽度和水平位移通常都较实测值大。N. Loganathan 和 H. G. Poulos<sup>[10]</sup>重新定义了地层损失参数, 并结合 A. Verruijt 和 J. R. Booker<sup>[9]</sup>推导的解析解, 得到的预测结果与大多数实测结果都较接近。

有限元法不仅能够反映土层性质的影响, 还能对盾构施工过程进行不同程度的模拟, 且能得到不同深度土层的沉降、侧向位移以及地层的变形过程, 因此在盾构隧道施工分析中得到了越来越广泛的应用。K. M. Lee 和 R. K. Rowe<sup>[12~14]</sup>开发了一种考虑隧道开挖的三维弹塑性有限元分析模型, 得到不同截面处的位移值与实测值都较为一致。张海波等<sup>[15]</sup>提出了一种可以考虑盾构掘进对土层的扰动、盾尾建筑空隙和注浆、衬砌变形等因素的三维有限元模拟方法, 得到隧道纵断面地面沉降值与实测值非常接近, 但没有考虑周围地层再固结的影响。姜忻良等<sup>[6]</sup>通过控制不同阶段开挖土体单元的“应力释放”来模拟盾构掘进对周围土层的影响, 获得了较好的效果。

为了探索软土地区盾构掘进引起深层位移场的分布规律, 本文对上海某盾构施工段进行了现场实测分析。然后, 采用有限元分析程序 Plaxis 3D Tunnel 对盾构掘进过程进行了三维有限元模拟计算, 计算结果与实测值吻合较好。最后, 根据数值计算结果对隧道中心上方土层的变形规律进行了研究,

并提出了隧道上方深层土体横向沉降的预测公式。

## 2 现场实测与分析

### 2.1 工程概况及测点布置

上海市某区间隧道采用土压平衡盾构施工, 盾构外径为 6.34 m, 隧道外径为 6.2 m, 内径为 5.5 m; 衬砌管片宽度为 1.2 m, 厚度为 0.35 m; 两单圆隧道净间距为 7.6 m; 隧道埋深为 19.4 m。盾构穿越土层的主要物理力学指标见表 1。

表 1 地层的主要物理力学参数

Table 1 Main physico-mechanical parameters of soil layers

土层编号	w/%	e	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	E/MPa
② <sub>1</sub>	32.7	0.97	20	18.0	4.65
③ <sub>1</sub>	45.8	1.26	11	18.5	2.44
④ <sub>1</sub>	49.7	1.41	11	13.0	2.31
⑤ <sub>1-1</sub>	36.5	1.03	16	13.5	3.71
⑤ <sub>1-2</sub>	33.2	0.98	14	22.5	4.96

为了有效监控盾构施工引起深层土体的变形规律, 本文进行了土体测斜和分层沉降测试, 测点布置见图 1, 测点埋深如图 2 所示。由于施工现场条件所限, 仅在隧道侧面布置了 2 个分层沉降观测孔(FC1, FC2)和 2 个测斜孔(CX1, CX2), 测点与隧道

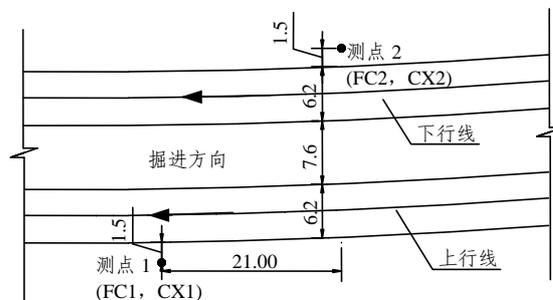


图 1 测点平面布置图(单位: m)

Fig.1 Plan of measuring points arrangement(unit: m)

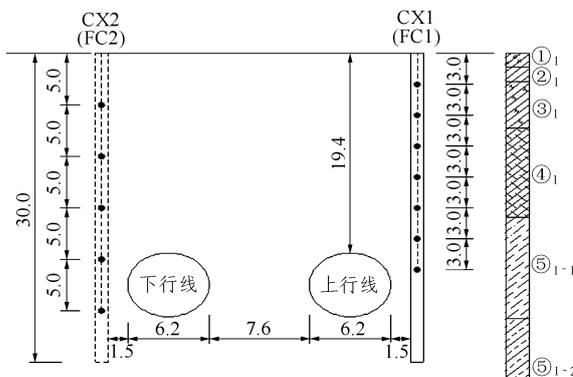


图 2 测孔埋深示意图(单位: m)

Fig.2 Sketch of inclinohole depth(unit: m)

水平净间距为 1.5 m。

盾构隧道上行线于 2007 年 11 月 4 日开始接近测点 1, 11 月 6 日切口到达测点 1 位置, 11 月 7 日盾尾通过该测点; 下行线于 2007 年 12 月 23 日开始接近测点 2, 切口于 12 月 24 日到达该测点, 盾尾于 12 月 25 日通过测点。

### 2.2 盾构掘进引起侧向土层的水平位移

#### (1) 盾构掘进方向

图 3 为盾构掘进引起的 CX1 和 CX2 在掘进方向的水平变形曲线。从图中可以发现, 侧面土体在盾构掘进方向的水平位移主要可以分为 3 个阶段:

① 盾构接近测点时, 由于土仓压力的挤压而引起向前的变形。从变形特性来看, 深层土体主要发生

沿着盾构掘进方向向前的变形, CX1 和 CX2 的最大值分别为 9.5 和 3.2 mm, 浅层土体(地下 10 m 范围)由于处于卸荷扰动区<sup>[5]</sup>, 其变形以向后位移为主。

② 穿越时盾构机壳与周围土体的摩擦剪切引起侧向土体向前的较大变形。从变形曲线来看, CX1 和 CX2 的最大位移增量分别为 13.6 和 14.5 mm, 分别位于地面以下 20(隧道拱顶)和 25 m(隧道拱底), 这与盾构掘进时的姿态控制有关。③ 盾构远离测点阶段, 受扰动土体固结引起侧向土体的向后变形。变形缓慢、历时长是该阶段土体变形的特点。在本次测试中, 侧向土体的最大水平位移增量分别为 2.2 和 2.0 mm。

#### (2) 垂直于盾构掘进方向

图 4 为盾构掘进引起的 CX1 和 CX2 在垂直

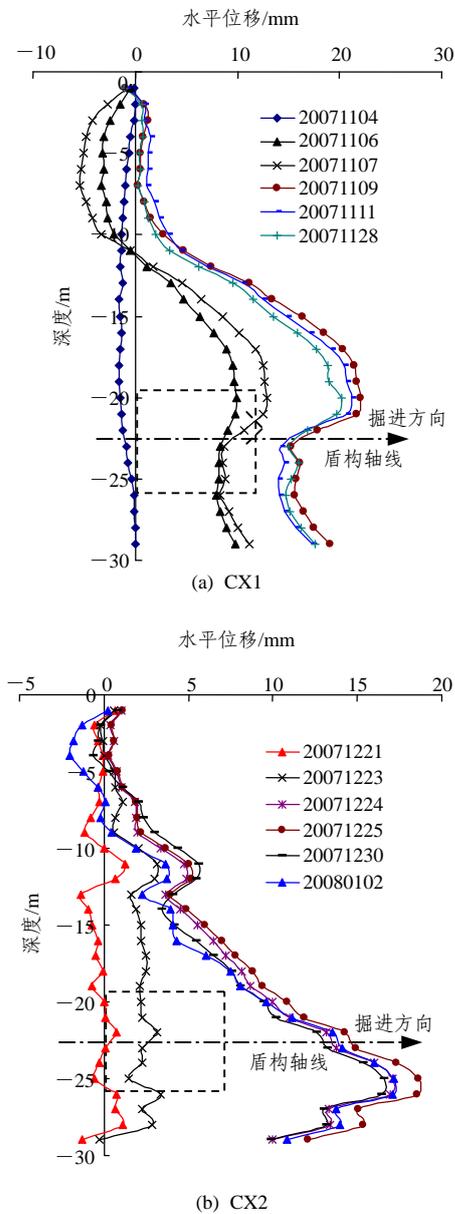


图 3 盾构掘进方向的水平变形曲线  
Fig.3 Horizontal deformation curves in shield tunneling direction

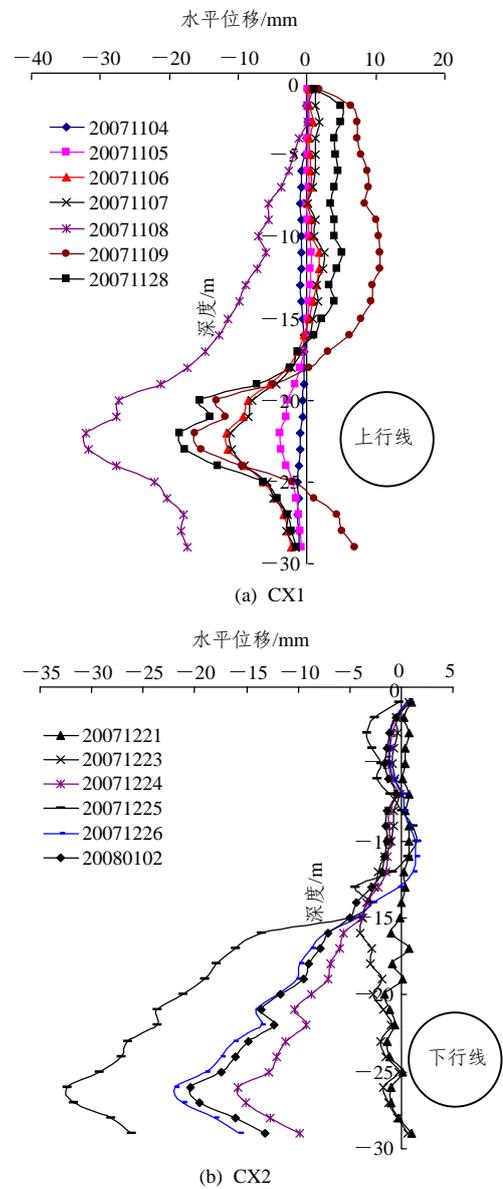
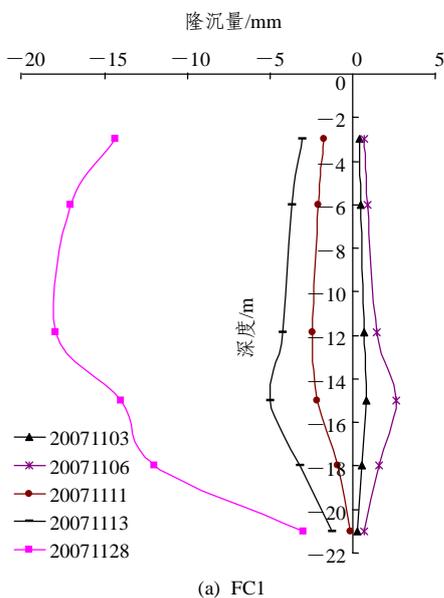


图 4 垂直于盾构掘进方向的水平变形曲线  
Fig.4 Horizontal deformation curves in the direction perpendicular to shield tunneling

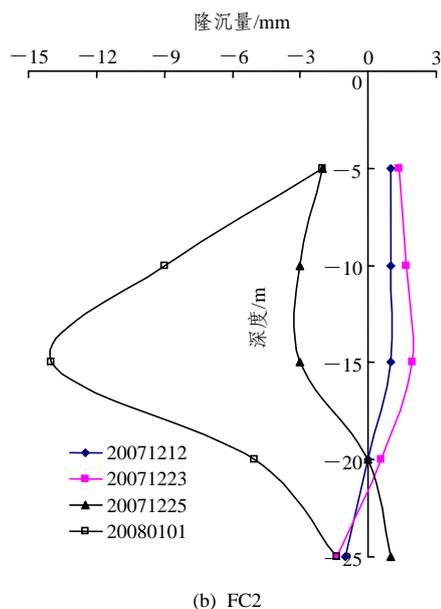
掘进方向的水平变形曲线。由图 4 可知, 侧面土体在垂直盾构掘进方向的水平位移主要可以分为 4 个阶段: ① 盾构接近时向隧道外的微小变形。土仓压力的挤压和盾壳与周围土体的摩擦剪切作用是引起该阶段土体变形的的主要因素。该阶段土体的最大位移发生在隧道中心埋深附近, CX1 的实测值为 11 mm 左右。② 盾构机身通过时的平缓段。该阶段测点既未受到土仓压力的挤压作用, 也未受到同步注浆压力的影响, 因此侧向土体的变形量值很小。③ 盾构刚通过时向隧道外的较大变形。盾尾同步注浆压力是引起该阶段土体变形的的主要原因, 该阶段土体变形量值较大, 最大位移为 32 mm 左右, 分别位于地面以下 22(隧道中心)和 26 m(隧道拱底), 这同样是由盾构掘进时的姿态控制引起的。④ 盾构通过后向隧道内的变形。受扰动土的固结及浆液的凝结是引起该阶段土体变形的的主要原因, 最大位移增量分别为 16 和 13 mm。

### 2.3 盾构掘进引起侧向土体的分层沉降

从图 5 的分层沉降测值可知, 侧面土体在盾构掘进过程中的竖向变形也可以分为 3 个阶段: (1) 盾构掘进接近和穿越阶段的隆起变形, 最大值发生在地面以下 15 m 处, 即隧道上方 4 m 左右, 其值约为 2.5 mm; (2) 盾尾刚通过时由于建筑空隙存在而发生的沉降, 实测数据显示该阶段侧面土体的沉降量较小, 最大值为 3 mm 左右; (3) 盾构掘进远离测孔阶段的较大沉降, 受扰动土体的固结是引起该阶段侧面土体沉降的主要原因, 且沿埋深出现先增加后降低的变化过程, 最大沉降量发生在地面以下 15 m 处, 分别为 18 和 14 mm。



(a) FC1



(b) FC2

图 5 土层分层沉降曲线)

Fig.5 Layered settlement of soil layers

总之, 在盾构掘进接近和穿越测孔阶段, 隧道侧面土体的变形以隆起、沿盾构掘进方向向前和向隧道外侧的三维运动趋势为主; 在盾尾刚通过阶段则表现为沉降、向前和向外的较大变形; 在盾构掘进远离测孔阶段, 侧面土体的变形以沉降、向后和向隧道内为主。

## 3 盾构掘进引起深层位移的数值分析

### 3.1 有限元分析模型

如图 6 所示, 模型取单个隧道进行分析, 计算模型宽 90 m, 高 50 m, 沿隧道纵向长 60 m。计算中土体采用莫尔-库仑模型, 盾构机及管片采用线弹性材料, 各土层的主要物理力学指标见表 1。

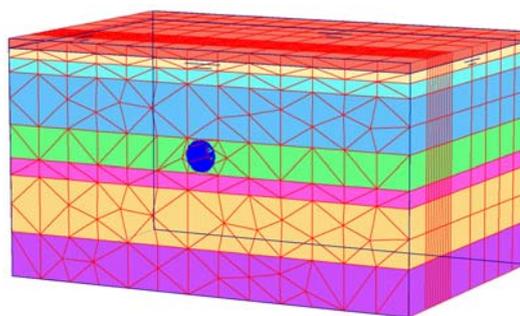


图 6 有限元模型

Fig.6 Finite element model

在本文数值计算中所考虑的盾构施工引起地层位移的主要因素如下:

(1) 土仓压力，通过在开挖面施加梯形荷载来模拟，其数值为开挖面水土压力理论计算值的1.1~1.2倍；

(2) 盾构与周围土体的错动，通过在盾构壳单元与土单元之间设置 Goodman 三维接触面单元来模拟；

(3) 盾尾建筑空隙，通过对管片壳单元施加已知径向位移来实现；

(4) 盾尾同步注浆，通过对盾尾外土体单元施加向外的均布力来模拟，其数值由注浆压力计算得到。

### 3.2 数值计算结果分析

图 7 为盾构掘进引起的 CX1 水平位移计算值(沿深度 40 m 范围内)与实测值对比图。由图 7 可知，计算所得隧道侧面土体的水平位移趋势及量值都与实测值吻合较好，从而验证了本文分析方法的正确性。从图 7(b)也可发现，实测隧道侧下方土体在掘进方向的水平位移沿深度有增大的趋势，而计算值则逐渐趋于收敛，这可能是由盾构掘进时“磕头”对下方土体挤压引起的。

从图 8 所示隧道中心上方土层的水平变形曲线可以发现，在盾构接近过程中，土体在盾构掘进方向上发生了向前的位移(地下 16 m 处为 2.4 mm)。在竖向变形方面，浅层土体以沉降为主，深层土体则由隆起逐渐过渡为沉降，分界面的深度与距离刀盘远近有关，可根据盾构施工扰动分区<sup>[5]</sup>计算得到；在盾构穿越和远离过程中，浅层土体发生向后的水平位移，深层土体则发生向前的水平位移，但竖向变形以沉降为主，且沉降量与深度呈正比关系。

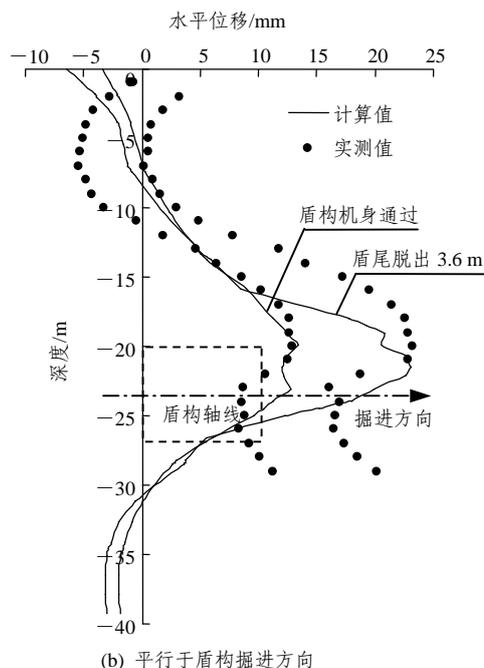
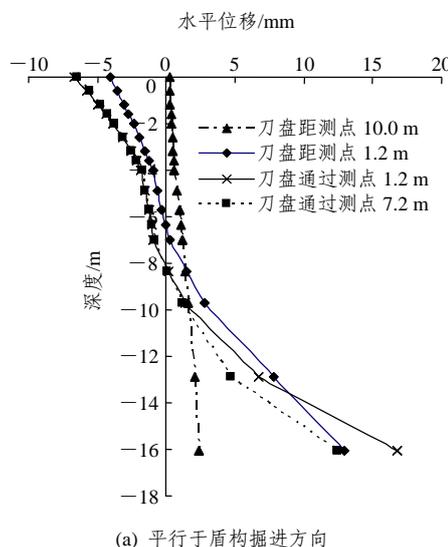
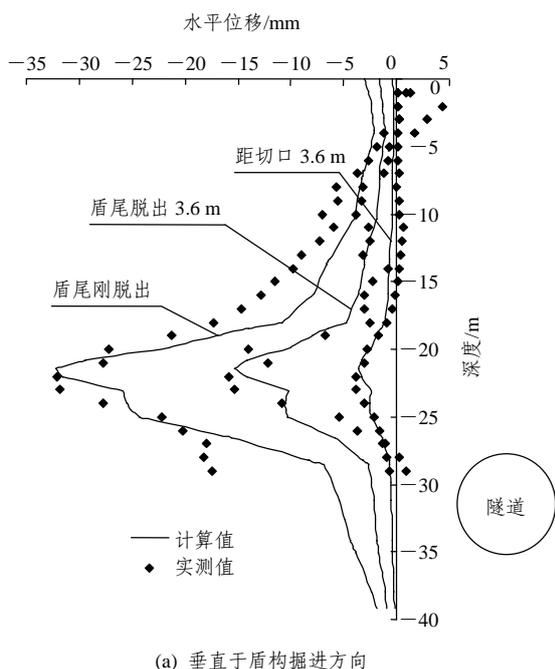


图 7 CX1 水平位移计算值与实测值对比图

Fig.7 Comparison of horizontal displacement between calculated and measured results of CX1

### 3.3 深层土体沉降预测公式的建立

图 9 给出了隧道上方不同深度土层的横向沉降槽曲线。由图可知，盾构掘进完成后，隧道上方不同土层的沉降量随着深度的增加而增大，且最大值一般都位于隧道中心 3 m 范围内，而横向沉降影响范围则沿深度呈减小趋势。另外从横向沉降槽的分布形状来看，其与 Peck 曲线都较相似，且上海许多盾构施工实例也证明了它的实际使用效果，因此本文建立的深层土体沉降预测公式仍沿用 Peck 公式的形式。



(a) 垂直于盾构掘进方向

(a) 平行于盾构掘进方向

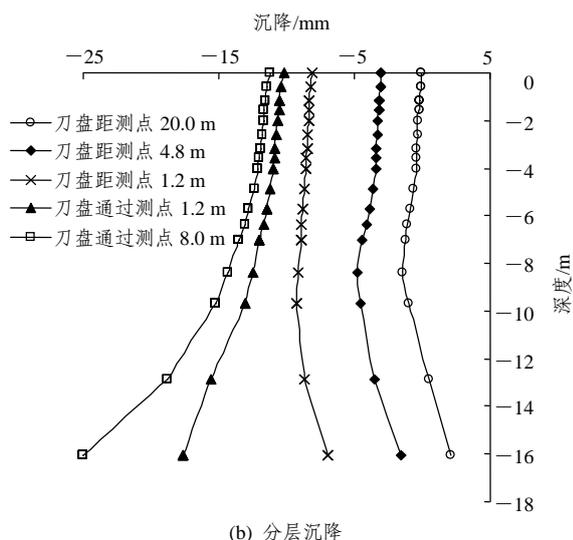


图 8 隧道中心上方土层计算变形曲线

Fig.8 Calculated deformation curves of soil layers above the center of tunnel

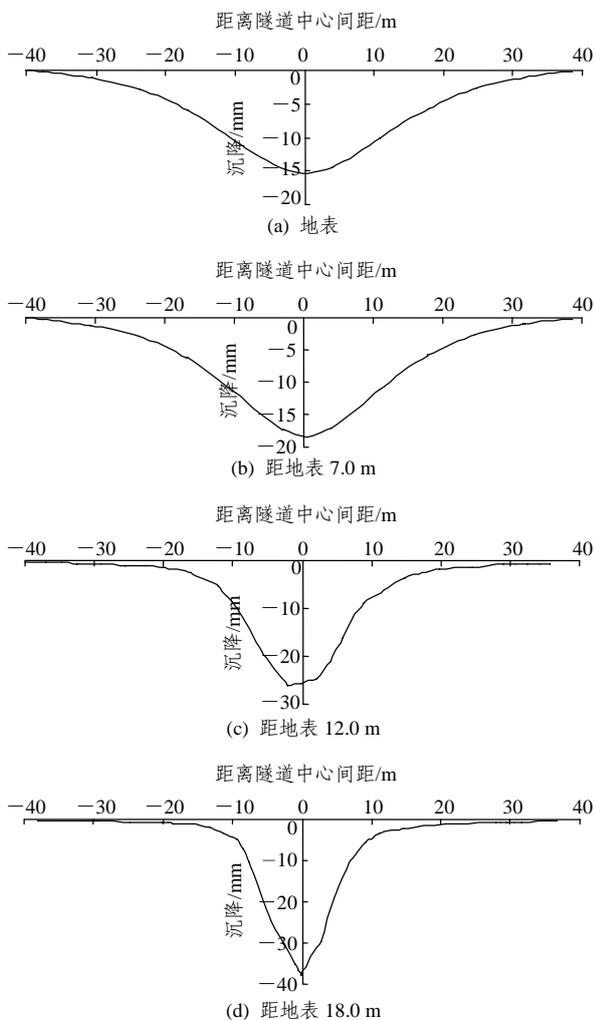


图 9 隧道上方土层的分层横向沉降槽曲线

Fig.9 Layered settlement curves of soils above tunnel

Peck 公式的数学表达式为

$$\delta(x) = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中:  $V_s$  为盾构施工引起的地层损失;  $i$  为沉降槽宽度系数, 即曲线反弯点与隧道中心的间距。

经过曲线拟合得:  $i=12.76 \text{ m}$ ,  $V_s = 0.49 \text{ m}^3/\text{m}$ , 如图 10 所示。可见地面横向沉降计算结果与 Peck 曲线吻合很好, 进一步证实了 Peck 公式的适用性。

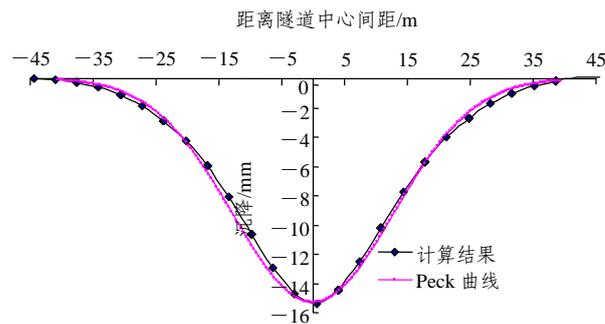


图 10 地面横向沉降计算结果与 Peck 曲线对比图

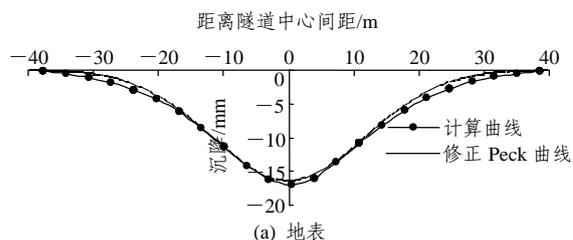
Fig.10 Comparison between calculated transverse settlements and Peck curve of ground

根据 Peck 公式, 在施工方法和工艺确定后, 施工所引起的地层损失率为定值, 因此深层土体的横向沉降预测公式就归结到沉降槽宽度系数的确定。根据分析可知, 深层土体的  $i_h$  可表示为地面沉降槽宽度系数  $i_0$ 、土层性质以及土层深度的函数。为了简化计算, 把隧道上方土体简化为均质土, 经过反复计算分析得到如下公式:

$$i_h = \left(\frac{h}{Z}\right)^{0.5} i_0 \quad (2)$$

式中:  $i_h$  为不同深度土层的横向沉降槽宽度系数,  $h$  为不同深度土层距离隧道中心的间距,  $Z$  为地面到隧道中心的距离,  $i_0$  为地面横向沉降槽宽度系数。

图 11 给出了不同深度土层的横向沉降计算与修正 Peck 曲线对比图。由图 11 可知, 两者非常吻合, 从而验证了修正 Peck 公式的适用性。



(a) 地表

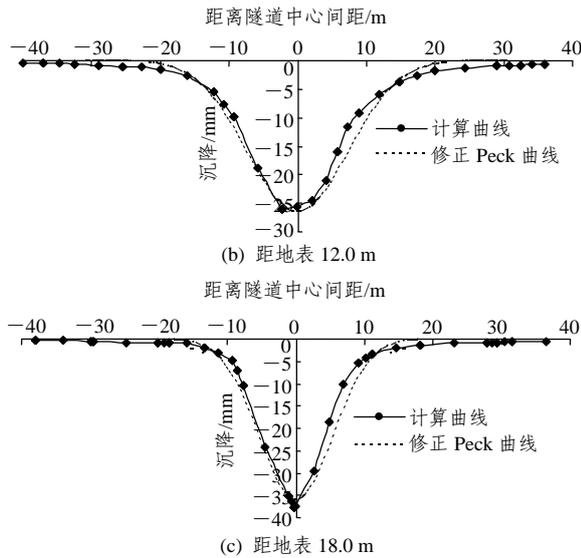


图 11 土体分层横向沉降计算结果与修正 Peck 曲线对比图  
Fig.11 Comparison between calculated and modified Peck curves of soil layered transverse settlements

### 4 结 论

针对上海某盾构施工段，通过现场实测得到了盾构施工过程中侧面土体的变形规律，并利用有限元程序 Plaxis 3D Tunnel 对盾构施工过程进行了动态仿真模拟。现场实测数据和有限元计算结果表明：

(1) 在盾构接近和穿越测孔阶段，隧道侧面土体的变形以隆起、沿盾构掘进方向向前和向隧道外侧的三维运动趋势为主；在盾尾刚通过阶段则表现为沉降、向前和向外的较大变形；在盾构掘进远离测孔阶段，侧面土体的变形以沉降、向后和向隧道内为主。

(2) 采用三维动态有限元能较好地考虑盾构施工时土仓压力、盾构与周围土体的错动、建筑空隙以及同步注浆等因素，动态模拟土体的变形值与实测值吻合较好。

(3) 在盾构掘进接近过程中，隧道中心上方浅层土体发生向前的水平位移和沉降，深层土体则发生向前的水平位移以及先隆起后沉降的变形趋势。在盾构穿越和远离过程中，浅层土体发生向后位移，深层土体发生向前位移，竖向变形都以沉降为主。

(4) 根据数值计算不同深度土层的横向沉降曲线，提出了深层土体沉降预测的修正 Peck 公式。

### 参考文献(References):

[1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: [s. n.], 1969: 225 - 290.  
[2] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.(ZHOU Wenbo. Shield tunnelling construction technology

and its application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese))  
[3] 璩继立, 葛修润. 软土地区盾构隧道施工沉降槽的特征分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(1): 42 - 46.(QU Jili, GE Xiurun. Analysis of characteristics of settlement trough induced by shield construction in soft soil area[J]. Industrial Construction, 2005, 35(1): 42 - 46.(in Chinese))  
[4] 魏 纲. 盾构施工中土体损失引起的地面沉降预测[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2 375 - 2 379.(WEI Gang. Prediction of surface settlement induced by ground loss during shield tunneling construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2 375 - 2 379. (in Chinese))  
[5] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构掘进对隧道周围土层扰动的理论与实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1 514 - 1 520.(JIANG Hongsheng, HOU Xueyuan. Theoretical study and analysis of site observation on the influence of shield excavation on soft clays around tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1 514 - 1 520.(in Chinese))  
[6] 姜忻良, 崔 奕, 李 圆, 等. 天津地铁盾构施工地层变形实测及动态模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1 612 - 1 616.(JIANG Xinliang, CUI Yi, LI Yuan, et al. Measurement and simulation of ground settlements of Tianjin subway shield tunnel construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1 612 - 1 616.(in Chinese))  
[7] 廖少明, 余 炎, 白廷辉, 等. 盾构隧道叠交施工引起的土层位移场分布规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 485 - 490.(LIAO Shaoming, YU Yan, BAI Tinghui, et al. Distribution of ground displacement field owing to two overlapped shield tunneling interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 485 - 490.(in Chinese))  
[8] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 301 - 320.  
[9] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half space[J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 753 - 756.  
[10] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846 - 856.  
[11] 魏 纲, 魏新江, 龚 慈, 等. 软土中盾构法隧道引起的土体移动计算研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 995 - 999.(WEI Gang, WEI Xinjiang, GONG Ci, et al. Study on calculation for shield tunneling-induced ground movements in clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 995 - 999.(in Chinese))  
[12] LEE K M, ROWE R K. Finite element modeling of the three-dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soil: part I—method of analysis[J]. Computers and Geotechnics, 1990, 2(2): 87 - 110.  
[13] LEE K M, ROWE R K. Finite element modeling of the three-dimensional ground deformations due to tunneling in soft cohesive soil: part II—results[J]. Computers and Geotechnics, 1990, 2(2): 111 - 138.  
[14] LEE K M, ROWE R K. Analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay tunnel[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(1): 25 - 41.  
[15] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 755 - 760.(ZHANG Haibo, YIN Zongze, ZHU Jungao. 3D finite element simulation of deformation of soil mass during shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 755 - 760.(in Chinese))