

一侧有建筑物时盾构引起地表沉降的数值分析

杨海勇, 鹿群

(天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

摘要:利用有限元程序 Midas/GTS, 综合考虑土体非线性、土体与盾构作用、注浆压力、千斤顶推力、密封舱土压力等要素, 建立了隧道-土-桩基-建筑物三维非线性有限元模型。研究地表一侧存在建筑物时及盾构施工参数对地表沉降的影响。通过三维仿真数值模拟得出以下结论: 地表存在建筑物时, 地表沉降最大值比无建筑物时要小, 且最大沉降值背离建筑物方向, 偏离盾构中心轴线; 盾构支护压力越接近侧向静止水土压力地表沉降越小, 合理的控制盾构施工参数(注浆压力、盾构机千斤顶推力)可以有效减小地表沉降。

关键词: Midas; 盾构隧道; 建筑物; 盾构参数; 地表沉降;

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

Numerical analysis of the ground movement induced by shield tunneling with a existing building on one side

YANG Hai-yong, LU Qun

(Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, TJCU, Tianjin 300384, China)

Abstract: Being taken into account the nonlinearity of soil, the interaction of soil and shield tunnel, grouting pressure, jack thrust pressure and airlock earth pressure to establish a three dimensional non-linear finite element model was established by using the finite element program Midas/GTS. The influence on the surface settlement of adjacent surface structures and shield tunneling was studied. The result shows that the maximum settlement value with structure is smaller than which without structure; the maximum settlement value is on the opposite direction of the structure, and deviates from the central axis of the shield; the closer to the lateral earth pressure at rest the shield support pressure is, the smaller the surface subsidence will be; reasonable control shield tunnel parameters (grouting pressure, jack thrust) can effectively reduce surface settlement.

Key words: Midas; shield tunnel; building; shield parameter; surface settlement

盾构机在开挖过程中不可避免扰动地层, 导致地表发生下沉。国内外学者认为地层沉降主要分为地层损失和受扰动土层的固结^[1]。1967 年 Peck 系统地提出了 Peck 公式, 指出沉降槽的形状近似于概率论中正态分布曲线^[2]。同济大学李森研究了地表存在建筑物时地表沉降曲线与无建筑物时的差异, 得出了地表沉降曲线的峰值要比无建筑物存在时小, 曲线的反弯点离隧道轴线的距离要比无建筑物存在时远的结论^[3]。韩焯提出“刚度修正法”给出了地表存在建筑物时沉降的预

估方法^[4]。刘纪峰在中国矿业大学“复杂多变环境下城市地下工程模拟试验系统”的基础上, 研制了模型盾构掘进系统进行试验, 得到地表最终沉降值随支护超压比增加而增大^[5]。

虽然, 目前国内外对盾构施工引起的地面沉降研究比较多, 但是很少考虑存在邻近建筑物时盾构施工对地表沉降的影响, 文献[6]通过离心机试验得知有无建筑物时盾构施工引起的地表沉降有较大不同。本文利用有限元程序 Midas/GTS, 综合考虑土体非线性、土体与盾构作用、注浆压

收稿日期: 2013-07-10

基金项目: 天津市软土特性与工程环境重点实验室开放基金资助项目(2011SCEEKL001)

作者简介: 杨海勇(1986-), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 从事岩土工程, 盾构隧道开挖对地层、临近桩基的影响的研究。

力、千斤顶推力、密封舱土压力等要素,建立了隧道-土-桩基-建筑物三维非线性有限元模型,研究了地表一侧存在建筑物时及盾构施工对地表沉降的影响,同时分析研究了盾构施工力学参数对地表沉降的影响。

1 模型的建立及数值模拟步骤

盾构中心埋深 15.5 m,覆土深度 12 m,外径 7.0 m,衬砌管片厚度为 0.35 m,环宽 1.2 m,弹性模量 34.5 GPa,泊松比 0.3,考虑环向接头的影响,刚度折减系数取为 0.75^[7],按弹性均匀圆环考虑。

建筑物为 4 层框架结构,沿隧道轴线纵向方向 2 跨,每跨 6 m,横向方向 3 跨,跨度均为 6 m,层高 3.6 m,摩擦型桩基础,桩径 0.8 m,桩长 15 m。梁截面尺寸 0.3 m × 0.6 m,柱截面尺寸 0.45 m × 0.45 m,楼板厚为 0.12 m。建筑物每层楼面作用折算荷载 3 kN/m²,靠近隧道一侧桩基距隧道边缘最近 0.9 m。

土体强度准则选择修正剑桥模型,桩、柱、盾壳、衬砌选择线弹性模型。土体重度 19.6 kN/m³,泊松比 $\mu = 0.2$,压缩模量为 6.2 MPa,根据文献[8],取土体的弹性模量为 18.6 MPa,在桩土之间设 Goodman 接触单元,楼板、盾构机和隧道管片采用板单元模拟,注浆体采用实体单元模拟。具体材料参数详见表 1、表 2。

表 1 土体参数

Tab. 1 The soil parameters

参数	C	φ	λ	κ	Γ	M
土体	32kPa	20	0.09	0.009 3	3	0.91

表 2 材料参数

Tab. 2 The material parameters

名称	重度/kN·m ⁻³	μ	E/MPa
盾壳	78	0.2	200 000
注浆体	24	0.3	12 000
桩	24	0.2	20 000
梁板柱	25	0.3	30 000
管片	25	0.3	25 875

根据文献[9],模型尺寸定为 60 × 50 × 40 m。位移边界条件为:4 个侧面限制水平位移,底部限制垂直位移,上表面取为自由边界。隧道-地基-建筑物共同作用的三维数值模型如图 1、图 2 所示。

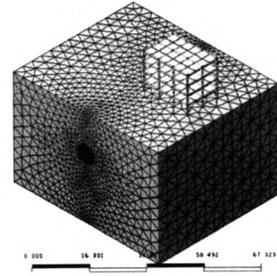


图1 隧道-土-桩基-建筑物三维非线性有限元模型
Fig.1 The tunnel-soil-pile-building three-dimensional nonlinear finite element model

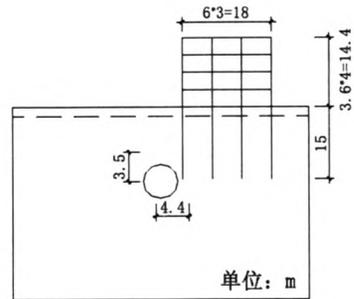


图2 隧道-土-桩基-建筑物正立面布置图

Fig.2 The tunnel-soil-pile-building elevation

数值模拟步骤:

- 1) 建立三维土体模型,计算土体在自重应力下的初始应力场,将位移值赋零。
- 2) 加入框架结构与桩单元,楼面荷载,将位移值赋零。
- 3) 定义施工阶段分步开挖,每 1.2 m 为一个开挖步,在开挖面处施加土仓压力,激活与钝化土体,盾壳单元。
- 4) 逐步施作管片和注浆,在盾尾施加注浆压力。
- 5) 计算分析,后处理。

2 建筑物及盾构参数对地表沉降的影响

2.1 建筑物对地表沉降的影响

盾构千斤顶推力 15 800 kN,注浆压力 150 kPa,支护面压力 128 kPa,研究建筑物存在对地表沉降的影响。

图 3 中,当地表存在建筑物时地表沉降曲线与无建筑物时有较大不同。有建筑物时,地表沉降曲线与 peck 公式有较大出入。当地表存在建筑物时,因建筑物刚度的协调及桩基的约束作用,地表沉降曲线的曲率变小,但其在有建筑物一侧远离盾构中心轴线 24 m - 30 m 处地表沉降值要大于无建筑物的沉降值。

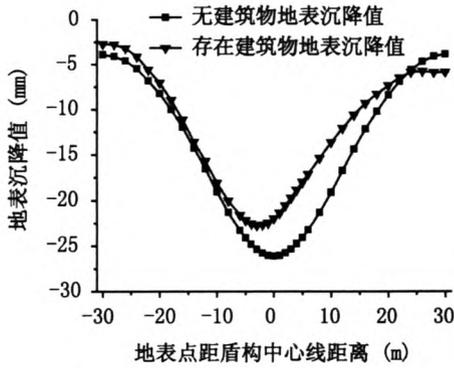


图3 有无建筑物时地表沉降差异

Fig. 3 The differences of surface settlement with or without a existing building

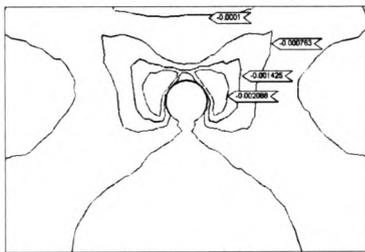


图4 无建筑物时25m处竖向塑性应变等值线图

Fig. 4 The vertical plastic strain contour map of sectional profile at 25m without a building

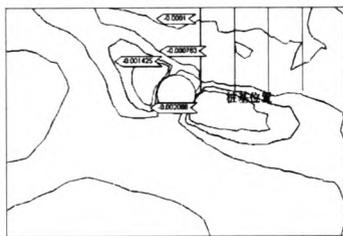


图5 有建筑物时25m处竖向塑性应变等值线图

Fig. 5 The vertical plastic strain contour map of sectional profile at 25m with a existing building

由图3可知,当地表存在建筑物时,地表沉降最大值要比无建筑物时地表沉降最大值要小,且最大沉降值不在隧道中心线上,而是背离建筑物方向,偏离盾构中心线2 m处。究其原因:(1)建筑物具有结构刚度,在刚度作用下,会起到对地层位移的约束作用。根据共同作用原理,刚度具有传递、协调作用,由此造成变形量减小。(2)因建筑物先于盾构隧道存在,在盾构隧道开挖之前,地表建筑物因自重对土体产生附加应力,使土体产生压缩变形,相较于未加建筑物时提高了土体强度,改善了表层土体单元的受力状态。图4、图5为25 m断面处的竖向塑性应变等值线图,分别对应无建筑物、有建筑物的情况。从两幅图的对比

来看,建筑物与土体的相互作用改善了土体的受力状态,减小了土体的塑性变形。(3)建筑物桩基础与土体之间因摩擦力的缘故对桩基范围内的土体起了约束作用,减小了土体的体积变形,从而降低了地表沉降量。

当地表存在建筑物时,地表沉降曲线*i*点要比地表无建筑物时离盾构中心线要远。根据文献[10],地表沉降曲线*i*点与水平位移的最大值对应。无建筑物时,地表沉降曲线*i*点为7 m。存在建筑物时,地表沉降曲线*i*点为11.5 m。

2.2 支护面压力对地表沉降的影响

为了便于表述所加支护力与土体原始侧压力关系,采用支护应力比的概念:

$$\lambda = \sigma_s / \sigma_0 \tag{1}$$

$$\sigma_s = \lambda k_0 \gamma h \tag{2}$$

$$\sigma_0 = k_0 \gamma h \tag{3}$$

式中 σ_s - 开挖面支护力; σ_0 - 原始侧向静止土压力值。

现取盾构千斤顶推力 15 800 kN,注浆压力 150 kPa,支护面压力 64 kPa,102 kPa,128 kPa,140 kPa,153 kPa,166 kPa,180 kPa,218 kPa。支护压力比 λ 分别为 0.5,0.8,1.0,1.1,1.2,1.3,1.4,1.7。研究盾构参数支护面压力大小对地面沉降的影响。

通过对图6、图7的分析和整理现得出如下结论:

1)地表最大沉降值随支护压力比变化曲线中间存在 $\lambda = 1.0$ 突变点,曲线变化分两个阶段:先上升后下降。在第一阶段支护应力比 < 1.0 即 $\sigma_s < \sigma_0$,盾构开挖造成土体扰动,土体应力重新分配,当支护面未能及时得到支护,开挖面前方土体会向盾构内临空面滑移,造成地层的沉降。随着支护面压力继续增大,有效地阻止了四周土体向盾构方向的滑移,因此有效降低了地表土体的沉降;进入第二阶段 $\lambda > 1.0$,地表沉降曲线出现下降趋势,表明地表最大沉降值随着盾构支护压力的增大而增大。根据文献[6]可知,随着盾构支护面压力的增大,盾构施工对周围土体扰动损伤程度增加,三维楔形体下滑结构的结构面发生破坏,导致土体重新开始沉降,地层变形增大。因此支护面压力越接近原始侧向静止土压力沉降越小,对控制地面沉降效果越好。支护面压力 σ_s 建议取原始侧向静止水土压力值 $\sigma_0 \pm 20$ kPa,对控制地

表沉降比较好。

2) 地表沉降的影响范围在 25 ~ 30 m 处趋于稳定。*i* 点变化随着支护面压力的变化不明显,基本处于 11.5 m 附近处。但是地表沉降曲线右侧因为建筑物的存在导致沉降值较左侧稍大。

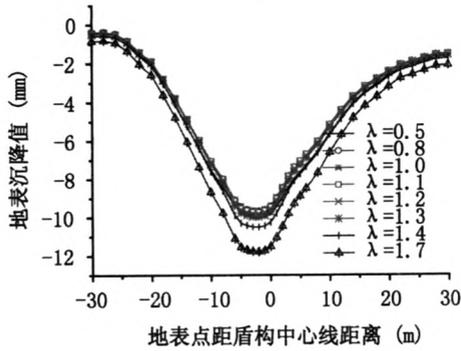


图6 工作面位于25m时横向地表沉降

Fig. 6 The lateral surface settlement as excavation face is at 25 m

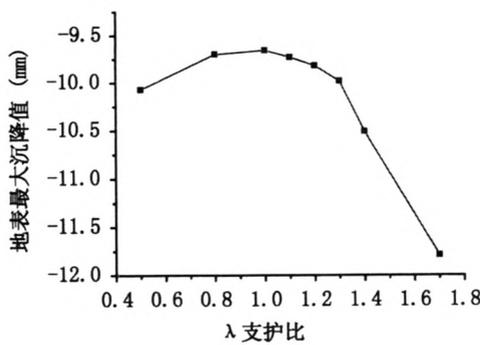


图7 地表最大沉降值随支护比变化图

Fig. 7 The maximum surface settlement vs supporting pressure ratio

2.3 千斤顶推力对地表沉降的影响

取千斤顶推力 15 800 kN、22 120 kN、25 280 kN、28 440 kN,依次为原推进力的 1 倍、1.4 倍、1.6 倍、1.8 倍。数值模拟结果如图 8 - 图 10 所示。

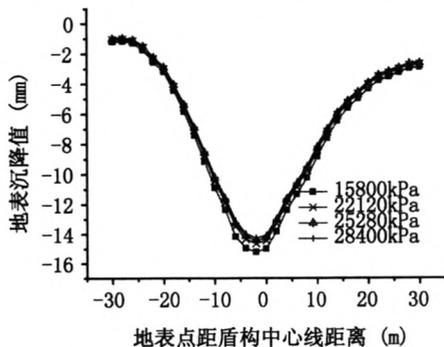


图8 工作面位于25m时横向地表沉降

Fig. 8 The lateral surface settlement as excavation face

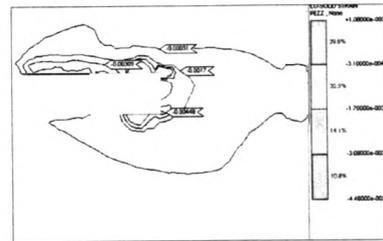


图9 推力15800kN时工作面位于25m时竖向塑性应变等值线图

Fig. 9 The vertical plastic strain contour map as excavation face is at 25m with 15800kN jack thrust

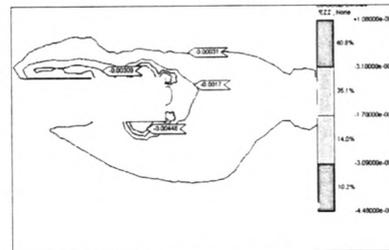


图10 推力25280kN时工作面位于25m时竖向塑性应变等值线图

Fig. 10 The vertical plastic strain contour map as excavation face is at 25m with 25280kN jack thrust

地表横向沉降值随着千斤顶推力的增大而减小。究其原因:(1) 盾构机外壳克服周围土体的摩擦,会对其产生附加应力,使土体产生剪切变形,同时盾壳会带着一部分土体向前移动,对与之接触的土体形成挤压,改善了上方土体的受力形态。随着推进力的增大这种挤压和剪切作用越明显,从而降低了土体的塑性应变,减小地表沉降。如图 9、图 10,当推进力为 15 800 kN 时盾构周围土体大于塑性应变 $-3.09e^{-4}$ 的面积为 10.8%,推进力为 25 280 kN 时为 10.2%,可见随着推进力的增大,挤压和剪切作用越明显,塑性变形越小。(2) 盾构机随着开挖向前推进,会带着与之接触的土体向前移动,及时填补了盾壳脱出时所造成的空隙,降低了地表沉降量。(3) 由文献[11]得知,当千斤顶推力向前推进时,工作面斜上方 ($<45^\circ$) 土体承受很大的挤压变形, σ_h, σ_v 均有增加, σ_v 的增大在一定程度上抵消了土体应力重新分布时向下的趋势。如图 9、图 10 所示:当推进力为 15 800 kN 时盾构周围土体小于 -0.0031 的塑性应变的面积为 39.6%,推进力为 25 280 kN 时为 40.8%。

由图 8 得知,千斤顶推力由 15 800 kN 增大到 28 400 kN 时,盾构纵向轴线 18m 处地表点最大地表沉降量减少了 0.8 mm,约占其沉降量的 3%。

由此可见盾构推进力的大小对地表的最终沉降影响很小。

2.4 注浆压力对地表沉降的影响

工程中采用同步注浆的方法来减少由于盾尾空隙所造成的沉降。将注浆压力分别设为: 150 kPa、250 kPa、350 kPa, 数值模拟结果如图 11、图 12 所示。

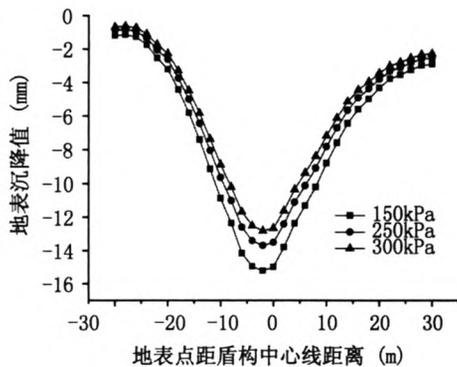


图11 开挖面位于25m时横向地表沉降

Fig. 11 The lateral surface settlement as excavation face is at 25m

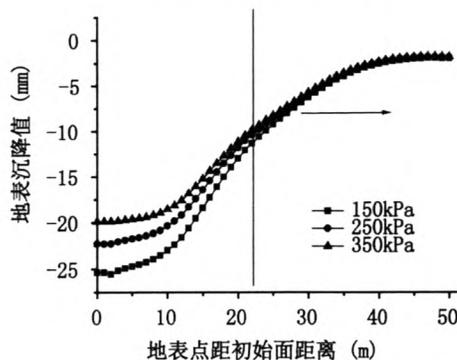


图12 开挖面位于25m时纵向地表沉降

Fig. 12 The longitudinal surface settlement as excavation face is in 25 m

地表竖向沉降值随着注浆压力的增大而减少。但注浆压力的改变对开挖面前方土体沉降影响较小。当开挖面位于 26.4 m 时, 注浆压力 350 kPa 盾构最大沉降值为 12.83 mm, 注浆压力 150 kPa 盾构最大沉降值为 15.3 mm, 地表点最大沉降值两者差值 2.47 mm, 如图 12 所示。随着盾构隧道的开挖, 地表最终沉降的差值能够达到 4.7 mm。说明同步注浆时, 适量的注浆压力可以抵消上部土体的部分沉降, 对控制地表沉降有较好的效果。但实际施工中注浆压力也不宜过大, 因为注浆压力过大将引起地表过多隆起或造成衬砌管片的破坏。

3 结论

1) 地表沉降曲线在有无建筑物存在时有很大不同。有建筑物存在时, 因建筑物的存在以及建筑物桩基础与土体的相互作用, 减小了土体沉降值。土体最大沉降值背离建筑物方向, 且偏离盾构中心轴线, 沉降曲线 i 点较无建筑物时远。

2) 在各施工参数不变的情况下, 支护面压力 σ_0 越接近原始侧向静止土压力 σ_s , 沉降越小, 对控制地面沉降效果越好。支护面压力 σ_0 建议取原始侧向静止土压力值 $\sigma_0 \pm 20$ kPa, 对控制地表沉降比较好。当支护压力比小于 1.0 时, 地表沉降最大值随着支护压力的增大而减小。支护压力比大于 1.0 时, 地表沉降最大值随着支护压力的增大而增大。

3) 地表沉降值随着盾构机千斤顶推力的增大而减小, 但是减小量较小。

4) 地表沉降值随着注浆压力的增大而减少。注浆压力的改变对开挖面前方土体沉降影响较小。

参考文献:

- [1] 刘昌. 盾构施工引起地表沉降的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [2] R B PEEK. Deep excavations and tunneling in soft ground state of the art report[C]. 7th Int. Conf On soil Mech and Fdn Eng., Mexico City, 1969, 7(9): 225-290.
- [3] 李森. 建筑物对盾构隧道施工引起地面沉降模式的影响[J]. 工程勘察, 2009(6): 30-33.
- [4] 韩焯. 隧道施工引起地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [5] 刘纪峰. 盾构隧道致地层沉降的物理模型试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(3): 91-98.
- [6] LOGANATHAN N, POULOS H G. Centrifuge model testing of tunneling - induced ground and pile deformations[J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 283-294.
- [7] 李林. 盾构施工地层变形及穿越桩群三维数值模拟试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [8] 东南大学: 土木工程学院. 桩土接触面的必要性及其参数影响的数值研究[R]. 2009.
- [9] 李志业, 曾艳华. 地下结构设计原理与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
- [10] 王柱. 地铁隧道开挖对刚性桩基变形影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [11] 张庆贺, 朱忠隆. 盾构推进引起土体扰动理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999(6): 700-703.

(责任编辑 刘存英)