

# 盾构机下穿桩基施工对单桩承载力影响的数值研究<sup>\*</sup>

李德胜<sup>①</sup> 李大勇<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>蓬莱安全生产监督管理局 蓬莱 265600)

(<sup>②</sup>山东科技大学土木建筑学院 青岛 266510)

**摘要** 在大型有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 平台上进行二次开发,利用内嵌 FISH 语言编程,对盾构隧道动态施工过程中上部基桩承载力的影响进行数值仿真模拟,模型考虑盾构前方土仓压力、盾尾同步注浆、注浆凝结和未凝结两种状态以及衬砌管片施加等施工参数。从桩侧摩阻力、桩端阻力等方面对盾构开挖过程中上部桩基承载力进行分析,以及土仓压力变化对承载力影响。研究表明:随着隧道开挖,桩侧摩阻力、桩端阻力发生复杂变化,桩底部出现负摩擦力,桩端轴力为拉力,对基桩竖向极限承载力有一定的影响;并且开挖面距桩轴线不同位置,土仓压力对基桩竖向极限承载力影响不同。

**关键词** 盾构隧道 土仓压力 注浆压力 数值模拟 桩侧摩擦力 竖向极限承载力

中图分类号:U455 文献标识码:A

## NUMERICAL SIMULATION OF EFFECT OF SHIELD TUNNELING ON BEARING CAPACITY OF SINGLE PILE

LI Desheng<sup>①</sup> LI Dayong<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>Penglai Administration of Work Safety, Penglai Shandong 265600)

(<sup>②</sup>School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266510)

**Abstract** On the basis of the finite difference software - FLAC<sup>3D</sup>, this paper compiles program using its FISH language to simulate the effects of shield tunneling on bearing capacity of a single pile. Considering the soil pressure in the soil chamber, grouting in the shield tail, and grouting with two phases of clotted and not clotted states. The bearing capacity of a single pile is analyzed during shield tunneling. Influential factors to the single pile by shield tunneling consist of skin - friction resistance and tip resistance of a pile. The influence on the pile bearing capacity is also analyzed as changing of propellant force of the face of excavation. It shows that negative skin - friction of pile would occur at the bottom of the pile, which could decrease the bearing capacity of the pile. The bearing capacity of a pile changes with varying the soil pressure in the soil chamber.

**Key words** Shield tunneling, Soil pressure, FLAC, FISH, Numerical simulation, Skin - friction resistance, Pile foundation, Ultimate bearing capacity

\* 收稿日期:2008-03-13;收到修改稿日期:2008-11-25.

基金项目:国家留学基金资助课题(2006100413);山东科技大学科技发展基金资助项目(05s001).

第一作者简介:李德胜,研究方向为地下空间结构. Email:deshengsheng12@163.com

# 1 引言

工业化快速发展和城市人口的高度集中,使得城市交通拥挤、用地面积日益缩减。为了解决城市交通问题,人们越来越注重修建地铁等城市轨道交通。随着地下掘进、精密导向技术的日益成熟,盾构法在城市地铁中越来越广泛的应用。由于地铁隧道多建在建筑物已高度集中的大城市,施工引起的地层移动对邻近建(构)筑物的影响不容忽视。在日本,已将近距离条件下施工定义为“近接施工影响问题”<sup>[1]</sup>。另外市区内建筑物大多采用桩基础,所以盾构开挖隧道对桩基的影响越来越受到关注。

目前,国内外已有不少学者对隧道开挖对邻近桩基影响问题进行了研究。如:Morton (1979)通过室内试验来研究隧道对桩基承载力和沉降的影响。阮林旺(1997)分析了盾构施工引起相邻桩体变形和受力的机理,进一步利用弹性力学开尔文解及弹性地基梁理论导出盾构推进对相邻桩体内力及挠曲影响的实用计算公式及相应计算程序。Loganation (2000)通过3个离心模型试验得出了隧道开挖引起的地层移动和对于邻近桩基(单桩、群桩)的影响。杨晓杰(2006)从桩侧摩阻力、桩端总抗力和桩底段轴力等方面对浅埋暗挖隧道近距穿越建筑桩基基础施工引起桩基承载力变化规律进行分析研究。

综上所述,就有关盾构隧道动态施工对桩侧摩阻力分布和竖向极限承载力影响的研究还鲜见,但这也是人们在实际工程中所关心的问题。

## 2 分析过程

### 2.1 计算模型

计算模型如图1所示,计算模型范围与边界条件为:模型尺寸为40m( $x$ 方向) $\times$ 40m( $y$ 方向) $\times$ 40m( $z$ 方向),共划分11472个单元,12954个节点。采用位移边界条件,侧面限制水平位移,底部限制垂直位移,模型上表面取为自由边界。土体强度准则为Mohr-Coulomb准则,采用大应变变形模式。隧道中心埋深20m,洞径 $D$ 为6.0m,混凝土衬砌厚度为0.35m,注浆层空隙取0.1m,盾壳7.5m。桩入土深度为15m,桩径 $d$ 为1.0m。桩体位于隧道正上方,桩端距离隧道冠顶1.55m(表1)。

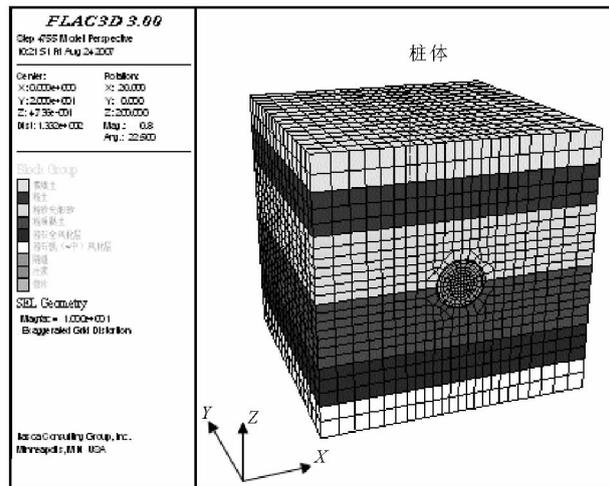


图1 计算模型

Fig. 1 3-D Mesh

表1 南京地铁一号线材料物理力学参数表

Table 1 Physical parameters for materials at subway line 1 in Naging

	容重/ kN · m <sup>-3</sup>	弹性模 量/MPa	泊松比	粘聚 力/kPa	摩擦 角/(°)
素填土	19.4	4.32	0.37	10	15
粉土	19.6	12.3	0.26	26	19.4
粉砂夹细砂	21	14.45	0.25	0	33
粉质黏土	20	4.03	0.3	20	20.2
岩石全风化层	24	45	0.24	40	32
煌斑岩	36	800	0.21	600	50
桩	25	300	0.17	450	30
管片	26	300	0.17	500	30
盾壳	24	2100	0.3	800	30
注浆(凝结)	20	2.57	0.286	10	10
注浆(未凝结)	20	1.0	0.4		

### 2.2 盾构隧道施工步骤模拟

盾构法隧道施工主要包括盾构机向前推进土体开挖、盾尾衬砌安装和同步注浆3部分。模拟的基本步骤如下:(1)建立三维模型,计算土体重力,将土体位移赋值为零。(2)加入桩单元,得到桩单元后土体应力场,将土体及桩位移赋值为零。(3)隧道开挖,模型采用model null模型,挖出 $y$ 方向12.5m长的隧道、衬砌及注浆部分土体。(4)在 $y = 5 \sim 12.5$ m内衬砌部分换成盾构壳的材料参数。(5)在 $y = 2.5 \sim 5$ m内注浆体假定为未凝结状态,在隧道内壁施加0.3MPa注浆压力。(6)在 $y = 0 \sim 2.5$ m的注浆体假定为凝结状态。(7)在土体开挖面上即

刀盘前方位土体施加 0.3MPa 的土仓压力动态施工过程是在大型有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 平台上,利用内嵌 FISH 语言进行编程实现的。在模拟过程中考虑了注浆压力随着计算步逐渐消散的实际情况。

### 3 数值模拟结果分析

#### 3.1 隧道盾构施工对桩侧摩阻力影响分析

桩顶承受 250kN 轴向力作用下,随盾构施工开挖,刀盘距桩轴线不同距离  $H$  下,桩侧摩阻力的分布曲线(图 2)。图 2 中距离  $H$  为正值表示桩体位于盾构机刀盘前方, $H$  为负值表示盾构机刀盘已穿过桩体轴线。

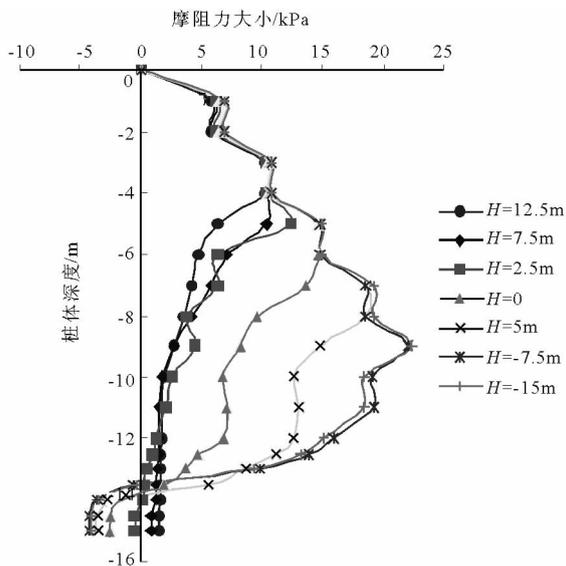


图 2 桩侧摩阻力分布

Fig. 2 Side - friction resistance of pile

从图 2 可以得出:

(1)随着盾构开挖向前进行,在桩身某一位置(本例大约在 14m 处)以下侧摩阻力逐渐减小,并且桩端附近出现了负摩阻力,其最大值约为  $-5\text{kPa}$ ;而桩上部侧摩阻力逐渐增大,并且桩侧摩阻力最大值沿着桩身向下偏移,最后趋于稳定( $H \geq -7.5\text{m}$ ) 在桩身 9m 处左右,其最大值约为  $23.8\text{kPa}$ 。

(2)当  $H \geq 7.5\text{m}$  时,桩侧摩阻力变化不大,这是因为隧道开挖后桩周土产生沉降,带动桩体产生几乎同步的沉降,桩土间相对位移变化很小。

(3)当  $H = 2.5\text{m}$  时,桩端开始出现负摩擦力,随着  $H$  的减小,桩端负摩阻力逐渐增大,中性点沿

着桩轴线有上升趋势,最后在  $H = -7.5\text{m}$  时,桩端负摩阻力达到最大。在  $H \geq -7.5\text{m}$  时,桩侧摩阻力大小基本不变,分布趋于稳定。桩侧负摩阻力的出现是由于隧道开挖接近桩体轴线时,桩端土体率先下沉,其沉降量大于桩端部沉降,使桩底端部产生向下的侧向拉力(负侧摩阻力),而上部土体相对于下部地层而言沉降滞后且量较桩体小,阻止桩体下滑,故产生向上的侧摩阻力,即正摩阻力。负摩阻力的产生,导致了桩体承载力的降低。

#### 3.2 盾构施工及土仓压力对桩顶竖向沉降的影响

盾构隧道下穿基桩施工中,由于隧道开挖,使得隧道周围土体受到扰动,隧道顶部土体下沉,隧道顶部位置土体下沉量最大,对桩基的承载能力影响最大。

从图 3 可以得到以下结论:

(1)随着盾构刀盘向前推移,桩顶沉降量逐渐增大,在  $H = -15\text{m}$  时达到最大,而后趋于稳定,最大值约为  $22.5\text{mm}$ 。

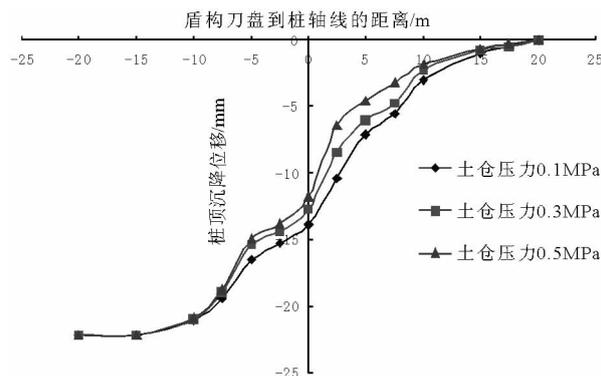


图 3 桩顶沉降变化

Fig. 3 Curves of pile head settlements

(2)在距离  $H > 5\text{m}$  时,桩顶沉降较小且发展缓慢,在  $H = 5\text{m}$  后,桩顶沉降发展加快,开始产生较大沉降,这是由于刀盘离桩轴线较近,对土体扰动较大,桩侧阻力和端阻力扩散区与土体由于开挖产生的扰动区相交,使得桩顶开始产生较大沉降。

(3)当刀盘穿过了轴线时( $H = 0$ ),桩顶沉降增长速度放慢,而当距离  $H = -5\text{m}$  时,桩顶沉降增加速度突然加快,使沉降量增加,然后趋于一定值。此时,桩顶沉降突然加快,是由于盾壳开始脱离桩底端,在该处安装管片,管片刚度低于盾壳刚度,且在管片与土体空隙里的注浆液还没有凝固,导致桩体沉降再次加大,而后随着注浆液的凝固,桩顶沉降趋

于稳定。

(4)土仓压力能减少桩体沉降量,土仓压力越大,桩顶沉降量越小;在刀盘未通过桩体时,土仓压力作用较明显,当刀盘通过桩体后,土仓压力对减少桩顶沉降的作用很小,在 $H = -7.5\text{m}$ 时,土仓压力对桩顶沉降影响不明显。

### 3.3 盾构法隧道施工及土仓压力对桩竖向极限承载力影响

隧道从桩底穿越时,会扰动桩的持力层,将会对桩的轴力特别是桩底段的轴力产生较大的影响,使桩底端轴力出现拉应力,同时增大了桩体的沉降量,降低了桩的承载力。根据桩体施工设计规范,桩顶沉降应控制在 $40 \sim 60\text{mm}$ ,本文以桩顶沉降达到 $50\text{mm}$ 时对应的荷载作为桩的竖向极限承载力(图4)。

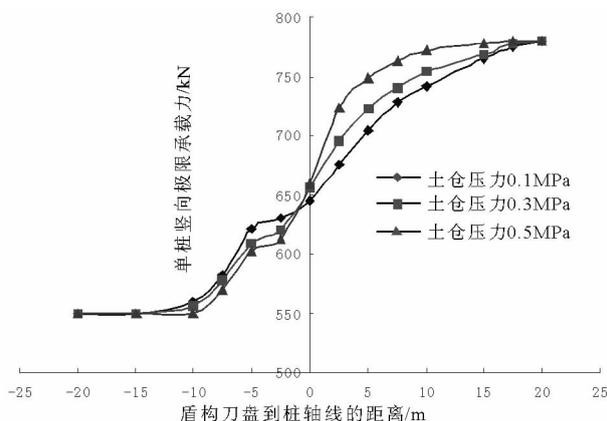


图4 竖向承载力变化曲线

Fig. 4 Vertical ultimate bearing capacity

从图4可以看出:

(1)随着隧道开挖,桩体承载力呈下降趋势,最后趋于一定值,从本例图4上可以看出,其值约为 $550\text{kN}$ 。

(2)在距离 $H \geq 7.5\text{m}$ 后,桩体竖向极限承载力下降较平缓,下降曲线斜率为 $0.38$ ;当在 $H = 5\text{m}$ 时,桩体竖向极限承载力开始急速下降,下降曲线的斜率为 $1.34$ ,下降速度是 $H \geq 7.5\text{m}$ 的 $3.5$ 倍。从图2得知,当刀盘距离桩轴线较近时,桩端开始出现负摩擦力,说明此时桩端土层沉降大于桩体沉降,桩端处于受拉状态,使桩底土层丧失了对桩的承载能力,从而大大降低了桩体竖向极限承载力。

(3)在距离 $H = -5\text{m}$ 时,桩体竖向极限承载力再次出现急速下降,在 $H = -10\text{m}$ 后开始趋于平

稳。承载力的二次下降,也由于盾壳开始脱离桩底端,管片刚度要比盾壳低,且注浆液还没有凝固,使得桩体沉降再次加大,从而导致桩体承载力的降低。

(4)在刀盘未通过桩体( $H \geq 0$ )时,随着刀盘前方土仓压力的增大,桩体竖向极限承载力下降速度变慢,在 $H = 5\text{m}$ ,土仓压力为 $0.1\text{MPa}$ 时,桩体竖向极限承载力为 $705\text{kN}$ ,承载力下降了 $10\%$ ;土仓压力为 $0.3\text{MPa}$ 时,桩体竖向极限承载力为 $723\text{kN}$ ,承载力下降 $7\%$ ,比土仓压力为 $0.1\text{MPa}$ 时少下降了 $3\%$ ,说明土仓压力对桩体竖向极限承载力的下降有抑制作用;当刀盘开始通过桩体( $H < 0$ )后,在 $H = -5\text{m}$ ,土仓压力为 $0.1\text{MPa}$ 时,桩体竖向极限承载力为 $621\text{kN}$ ,承载力下降了 $20\%$ ;土仓压力为 $0.3\text{MPa}$ 时,桩体竖向极限承载力为 $609\text{kN}$ ,承载力下降 $21\%$ ,比土仓压力为 $0.1\text{MPa}$ 时多下降了 $1\%$ ,土仓压力越大反而承载力下降速度变快,在 $H = 15\text{m}$ 时趋于一定值,但其影响程度比刀盘未通过桩体时的影响程度要小。这主要是由于当刀盘未通过桩体时,刀盘前方土体所受的土仓压力可以减少桩体沉降,增大桩周土体的水平应力 $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ ,而桩周土的环向压应力 $\sigma_m = -(\sigma_x + \sigma_y)/2$ ,于是,土仓压力使桩周土的环向压应力增大,根据桩侧极限摩阻力公式 $\tau = c + \sigma_m \tan \phi$ 知, $\sigma_m$ 的增大可以提高桩侧摩阻力;而当刀盘通过桩体后,土仓压力则对桩周土体应力变化影响很小,作用在桩周的环向压应力变化不大,从而对桩体承载力影响变小。

## 4 结 语

(1)隧道盾构施工对桩侧摩擦力分布有很大影响,开挖面接近桩体时,桩底部出现负摩擦力,使桩体处于受拉状态,严重削弱了桩体承载能力。

(2)随着隧道开挖,桩顶沉降量逐渐增大,在开挖面经过桩体和盾壳脱离桩端时,出现两次较大沉降。

(3)随着隧道盾构动态施工,桩体竖向极限承载力降低,在开挖面经过桩体和盾壳脱离桩端时,承载力出现两次较大降低,桩顶沉降与之吻合。

(4)在刀盘未通过桩体时,土仓压力可以减少桩体承载能力的降低,土仓压力越大,承载力降低的越少;当刀盘通过桩体后,土仓压力反而加大桩体承载能力的降低,但其影响程度比刀盘未通过桩体时的影响程度要小得多。

## 参 考 文 献

- [1] 日本铁道综合技术研究所. 近接既有隧道施工对策指南[M], 1996. Japan Railway Integrated Technical Institute. The counter-measures guide on the existing tunnel construction, 1996.
- [2] Morton JD, King K H. Effects of tunneling on the bearing capacity and settlement of piled foundations [C]. Tunneling Proc. of 2nd Int. Symp. of Mining & Metallurgy. London, 1979, 7(3): 57 ~ 64.
- [3] 李永盛, 黄海鹰. 盾构推进对相邻桩体力学影响的实用计算方法[J]. 同济大学学报, 1997, 25(3): 261 ~ 267.  
Li Yongsheng, Huang Haiying. The practical computational method of the mechanics influence on pile adjacent to shield tunneling.

- Journal of Tongji University, 1997, 25(3): 261 ~ 267.
- [4] Loganathan N, Poulos H. G, Stewart D. P. Centrifuge model testing of tunneling - induced ground and pile deformations [J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 283 ~ 294.
- [5] 杨晓杰, 邓飞皇. 地铁隧道近距离穿越施工对桩基承载力的影响研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(6): 1290 ~ 1295.  
Yang Xiaojie, Deng Feihuang. The influence research on the capacity of pile adjacent to subway tunnels. Journal of Mechanics and Geotechnical Engineering, 2006, 25(6): 1290 ~ 1295.
- [6] 沈才华, 刘松玉, 童立元. 基于“承载复合体”的隧道位移反分析研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(2): 262 ~ 267.  
Shen Caihua, Liu Songyu, et al.. Bearing - complex model for back - analysis of tunnel displacement. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(2): 262 ~ 267.

## 重大工程建设中的地质工程问题 暨 IAEG 第七届亚洲区域会议 (2 号通知)

**会议地点:**

2009 年 9 月 9 日 ~ 11 日, 中国 成都

**主办单位:**

国际工程地质与环境协会 (IAEG)

**承办单位:**

国际工程地质与环境协会中国国家小组  
成都理工大学地质灾害防治国家重点实验室

**协办单位:**

中国科学院工程地质力学重点实验室  
中国国家自然科学基金委员会  
中国地质调查局

**会议主题:**

重大工程建设中的地质工程与地质环境问题

**相关主题报告人及题**

**Theme 1:** Geological risks and Environmental Geological problems in large - scale construction projects

**Opening addresser:** Prof. WANG Sijing (China)

**Topic:** Extreme Geo - hazards and risk management

**Theme 2:** Mechanism and control of large - scale landslides

**Keynote Speaker:** Dr. Suzanne LACASSE (Norway)

**Topic:** Landslide Risk Assessment and Mitigation Strategy

**Theme 3:** Terrain stability, geo - hazards and risk control in mountainous cities in geologically active regions

**Keynote Speaker:** Dr. H. N. WONG (Hong Kong, China)

**Topic:** Holistic Urban Landslide Risk Management - Challenges and Practice

**Theme 4:** Foundations of high dams, high buildings, bridges, etc.

**Keynote Speaker:** Dr. Ricardo OLIVEIRA (Portugal)

**Topic:** Engineering Geological Investigations for the Foundations of Large Structures - Examples of a Concrete Gravity Dam and a 13 km long Bridge in Portugal

**Theme 5:** Engineering geological problems and Geo - hazards in the construction of long, wide and deep tunnels, roads and rail roads

**Keynote Speaker:** Dr. Hiroshi OSHIMA (Japan)

**Topic:** Engineering Geological Problems in the Planning and Construction of Long and Large Scale Mountain Tunnels - Case Studies in Japan

**Theme 6:** Sustainable use of underground space in complex geological conditions

**Keynote Speaker:** Dr. Ed de MULDER (The Netherlands)

**Topic:** Megacities of Tomorrow

**联系我们**

联系人: 唐川 李泽琴

地 址: 四川成都市二仙桥东三路 1 号成都理工大学地质灾害防治国家重点实验室

邮 编: 610059

电 话: +86 - 28 - 84077505, +86 - 28 - 84078874

传 真: +86 - 28 - 84077988, +86 - 28 - 84078948

Email: iaeg2009@gmail.com

Website: www.iaeg2009.com

**考察路线:**

线路 1: 成都—汶川地震灾区(4 天); 线路 2: 成都—九寨沟—黄龙(4 天); 线路 3: 成都—三峡(4 天); 线路 4: 成都—西安(4 天)