

# 单桩对临近盾构机侧向穿越时的响应

李大勇<sup>1,2</sup>, 宋言江<sup>1,2</sup>, 李德胜<sup>3</sup>

(1. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266510; 2. 山东科技大学土木建筑学院, 山东 青岛 266510;  
3. 蓬莱安全生产监督管理局, 山东 蓬莱 265600)

**摘要:** 盾构机掘进靠近已有临近桩基时, 引起的地层移动会导致桩的承载力降低和产生附加变形。因此, 针对隧道侧向穿越桩基时, 桩体的承载力及变形的影响问题进行了深入分析, 研究中考虑了土仓压力和与桩的距离等因素对桩基的影响, 得出了单桩弯矩和桩顶沉降的变化规律; 结果表明, 盾构掘进中桩基的竖向承载力和沉降下降明显, 在工程实践中需引起重视, 需考虑采取适当控制措施以保证桩基的安全性; 土仓压力大小能有效控制桩的承载力下降, 对桩的下沉有一定的控制作用。论文成果对盾构机穿越桩基的安全评估提供了借鉴意义。

**关键词:** 盾构施工; 桩侧摩阻力; 沉降; 极限承载力; 土仓压力

**中图分类号:** U452      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0150-05

**作者简介:** 李大勇(1971-), 男, 博士, 教授。研究方向为海洋岩土工程。E-mail: ldy@sdu.edu.cn。

## Responses of a single pile to laterally passing shield tunneling

LI Da-yong<sup>1,2</sup>, SONG Yan-jiang<sup>1,2</sup>, LI De-sheng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266510, China; 2. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China; 3. Penglai Administration of Work Safety, Penglai 265600, China)

**Abstract:** The decrease in the bearing capacity of a single pile and the additional deformation will occur when the shield machine approaches the existing pile. Effects of shield tunneling on a single existing pile are investigated by means of the numerical method in this study in the case of shield machine passing laterally. Earth pressures in the chamber of the shield machine and change in the distance between the pile and the shield machine are taken into account in the numerical simulation. It shows the two factors, i.e., earth pressures in the chamber and the distance, play an important role in this process. Moments along the pile and settlements at the top of the pile are obtained as well. It is proved that the decrease in the bearing capacity of the pile and the increase in the settlement are significant during the shield tunneling. Therefore, some measures should be taken to protect the existing pile from damage. Moreover, the earth pressures in the chamber can prevent effectively the pile from decreasing in the bearing capacity, and to some extent, it can control the settlement induced by the shield tunneling.

**Key words:** shield tunneling; side friction of pile; settlement; ultimate bearing capacity; earth pressure in chamber

## 0 引言

当盾构机接近或穿越建筑物桩基而向前推进时, 引起的地层移动会对桩基产生附加轴向力、侧向力、附加沉降和侧向位移, 从而导致桩基承载力降低, 进而影响到上部结构的正常使用。这类课题越来越引起了国内外工程界的关注<sup>[1]</sup>。例如: Chen<sup>[2]</sup>将隧道开挖视为二维问题, 利用边界元分析了隧道开挖对单桩(不受荷载作用)的影响, 指出桩的变形受隧道形状、地层损失率、土体强度、桩径以及桩长与隧道覆土厚度比等因素影响。阮林旺<sup>[3]</sup>就盾构掘进对桩体的影响进行了三维弹性有限元分析, 分析了水平载荷作用下桩体的承载力问题以及桩间土的变形规律。李永盛<sup>[4]</sup>提

出了盾构推进对相邻桩体力学影响的实用计算方法。Patsakorn<sup>[5]</sup>将单桩扩展到群桩, 分析了无荷载作用的群桩受隧道开挖的影响。杨晓杰<sup>[6]</sup>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础施工引起桩基承载力变化规律进行分析研究。芮勇勤<sup>[7]</sup>利用 RFPA 系统以及 FLAC<sup>3D</sup>程序, 对广州地铁二号线隧道通过电化教育学院录音楼时, 所引起建筑物桩基的变形与力学特性进行了研究。朱逢

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078227); 山东省自然科学基金项目(ZR2009FM003); 山东省“泰山学者”建设工程专项基金项目; 教育部留学回国人员科研启动基金项目

收稿日期: 2011-08-02

斌<sup>[8]</sup>采用离心模型试验, 研究了隧道开挖引起单桩沿桩身轴力和弯矩分布规律, 对数值分析结果的可靠性是一个有价值的参考。

笔者及其学生对盾构机掘进引起桩基响应问题, 进行了几年研究, 取得了一系列成果, 如: 刘丽<sup>[9]</sup>研究了盾构动态推进过程中桩的内力和变形响应, 并进行了参数研究, 如: 桩的弹性模量、半径、长度以及桩与隧道空间位置等因素变化时桩的反映。潘军刚<sup>[10]</sup>应用 FLAC 程序, 从桩顶荷载、土层分布、隧道纵向坡度、地层损失等方面对隧道盾构施工过程中邻近单桩及群桩的内力和变形进行了分析研究。李德胜<sup>[11]</sup>对双孔隧道盾构施工对邻近桩基变形和内力问题进行了数值模拟并进行了深入的分析; 同时研究了盾构机下穿桩基时, 引起的桩基承载力的变化分析<sup>[12]</sup>。

盾构掘进对已有桩基影响的现场监测资料非常罕见, 已有桩基的变形和力的监测布置难以在现场实施是一个重要原因。因此, 目前此类课题研究, 大都集中于计算机仿真研究手段。为了保证本研究的数值分析过程及采用参数的可靠性, 文献[13]对文献[8]的离心试验进行了复核, 数值计算得到的曲线型式和数值量级较好吻合。本文的研究重点是, 研究了掘进过程中, 盾构机趋近侧桩时, 引起侧桩内力、承载力和变形分析, 分析过程中主要研究了盾构机趋近的距离及土仓压力等因素的影响, 本文是文献[12]研究成果的延续。

## 1 计算模型建立

数值计算三维模型如图 1 所示, 计算模型范围与边界条件为:

边界条件: 模型尺寸为 40 m×40 m×40 m, 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。

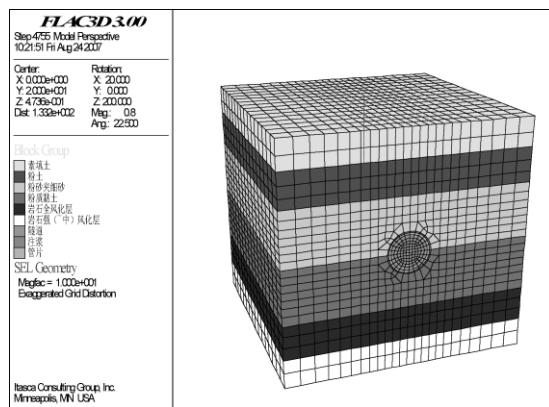


图 1 计算模型

Fig. 1 3D model

材料模型: 土体和同步注浆液(凝固状态)采用 Mohr-Coulomb 准则, 桩采用 FLAC<sup>3D</sup> 中的结构桩单元, 钢筋混凝土管片、桩体、盾壳和同步注浆液(未凝结)采用弹性模型。

几何尺寸: 隧道中心埋深 20 m, 洞径 D 为 6.0 m, 混凝土衬砌厚度为 0.35 m, 注浆层空隙取 10 cm, 盾壳直径 7.5 m。桩径 d 为 0.5 m, 桩为端承桩。

材料物理力学参数如表 1 所示。

表 1 材料物理力学参数表

Table 1 Physical properties for materials

类型	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性 模量/MPa	泊松比	黏聚力 /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	—	—
管片	26	300	0.17	—	—
盾壳	24	2100	0.3	—	—
同步注浆液 (凝结)	20	2.57	0.286	10	10
同步注浆液 (未凝结)	20	1.0	0.4	—	—

## 2 数值计算步骤

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。本次数值计算的基本步骤如下:

- (1) 建立三维模型, 计算自重应力场和位移场, 将土体位移赋值为零, 保留自重应力。
- (2) 加入桩单元, 得到桩单元后土体应力场和位移场, 将土体及桩位移赋值为零, 保留应力场, 即桩体内产生的力和位移完全是由盾构掘进引起的。
- (3) 隧道开挖, 模型采用 model null 模型, 挖出 y 方向 12.5 m 长的隧道、衬砌及注浆部分土体。
- (4) 在 y=5~12.5 m 内衬砌部分换成盾构壳的材料参数。
- (5) 在 y=2.5~5 m 内注浆体假定为未凝结状态, 在隧道内壁施加 0.3 MPa 注浆压力。
- (6) 在 y=0~2.5 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置土体施加土仓压力。
- (8) 用内嵌 FISH 语言编写程序, 来模拟盾构机的

动态前移施工，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 结果分析

#### 3.1 盾构隧道动态施工对基桩承载力研究

盾构与桩体的空间位置如图 2 所示。本算例中取桩距隧道轴线水平距离 5.0 m，且整个分析过程中保持不变，研究距离  $L$  值不断变化时基桩承载力的反应，得出基桩基桩承载力变化规律。

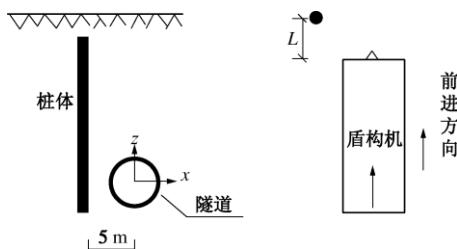


图 2 盾构与桩体的空间位置

Fig. 2 Relative position between shield tunneling and pile

当桩端位于隧道水平轴线以下时，轴线以上桩周土体向下位移，使桩体发生沉降，轴线以下桩周土体发生隆起，使桩体产生向上的位移，如图 3 所示，此时桩两端受压，桩体以侧向弯曲变形和水平变形为主，竖向沉降变形为辅。在垂直于桩体纵轴方向，由于桩体具有一定刚度，隧道周围土层的移动会因为桩的遮拦作用而发生变化，靠近隧道一侧的桩周土体移动较大，可能会与桩体发生脱离，桩侧土压力大幅度减小，而远离隧道一侧的桩周土体移动较小，土体与桩体没有发生脱离或者脱离程度较小，桩侧土压力变化不大，这样桩体两侧存在较大的土压力差，也会引起桩体发生水平位移和弯曲变形。

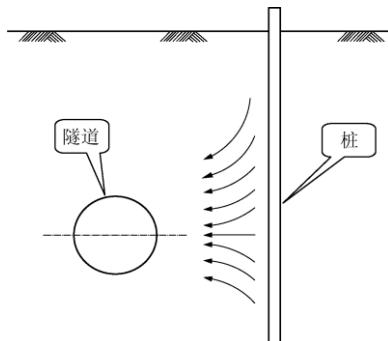


图 3 隧道 - 土 - 桩相互作用

Fig. 3 Tunnel-soil-pile interaction

在地下水位较浅的地区，由于盾构掘进会导致地下水超孔隙水压力产生，引起土体固结，盾构通过后超孔隙水压力逐渐消散，引起桩周土体产生固结沉降从而在桩周产生负摩擦力，桩身轴力增大，甚至可能

超出桩体的承载能力，从而影响上部结构的正常使用。

当隧道由远处逐渐向桩基位置掘进时，桩身的内力和变形会逐渐增大；当隧道掘进至桩基位置时对桩基的影响最不利，即桩的内力和变形最为明显；当隧道由近处逐渐远离桩基位置而向前掘进时，桩身的内力和变形逐渐趋于稳定。

基桩的侧摩阻力计算结果如图 4 所示，得出如下计算结论：

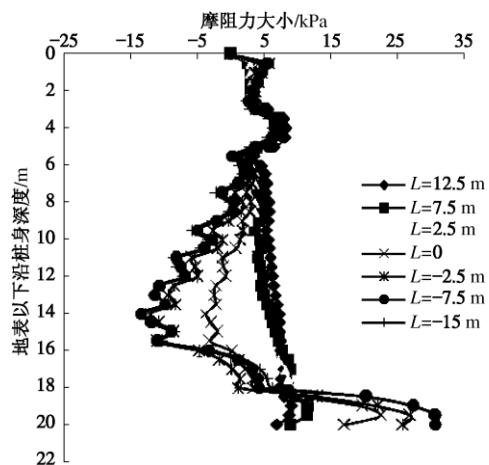


图 4 桩位于隧道正侧方时桩侧摩阻力分布

Fig. 4 Distribution of skin friction along pile

(1) 随着盾构开挖向前进行，桩顶至桩体入土深度 6 m 范围内桩侧摩阻力变化不大，桩深 6~16 m 范围内桩侧摩阻力逐渐减小，并且出现负摩阻力，负摩阻力最大值为 -13.54 kPa；桩深 16 m 以下桩侧摩阻力逐渐增大，在  $L=-7.5 \sim -15$  m 时，在桩身底部正摩阻力达到最大并基本保持不变，其最大值约为 30.78 kPa。

(2) 桩身 6 m 以下，沿桩身长度方向， $L=7.5 \sim 15$  m 时，桩侧摩阻力逐渐增大，增加幅度较小； $L < 7.5$  m 时，桩侧摩阻力先减小后增大，本例大约在 14 m(隧道冠顶处) 最小，即此时负摩阻力最大。

(3) 当  $L < 2.5$  m 时，桩体中部开始出现负摩阻力，桩体上产生两个中性点，上面中性点处于受拉状态，下面中性点处于受压状态，如图 5。随着隧道开挖，桩身负摩阻力逐渐增大，上面中性点向上移动，下面中性点向下移动，负摩阻力范围扩大。桩体中部负摩阻力的出现是由于隧道开挖接近桩体时，桩体中部周围土体的沉降量大于桩体的下沉量，使桩中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，产生向上摩阻力(正摩阻力)，桩端部土体由于隧道开挖向上隆起，也产生向上的侧摩阻力，有效阻止了桩体下沉。负摩阻力的产生，严重削弱了桩基的承载能力。

#### 3.2 盾构法隧道施工及土仓压力对桩竖向极限承载

## 力影响

从图 6 可以看出:

(1) 隧道未开挖时, 桩体的竖向极限承载力为 1062 kN。随着隧道开挖, 桩体承载力呈下降趋势, 在  $L=-10$  m 时, 承载力值基本保持不变, 从本例图 7 上可以看出, 其值约为 940 kN 左右, 承载力下降了约 13%。

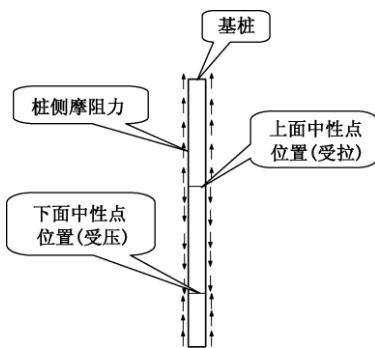


图 5 桩侧摩阻力示意图

Fig. 5 Side-friction resistance of pile

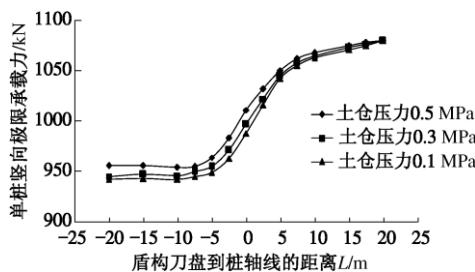


图 6 竖向承载力变化曲线

Fig. 6 Curves of ultimate bearing capacity

(2) 3 种土仓压力下, 桩体的承载力变化曲线形式相似, 此处取土仓压力为 0.5 MPa 的曲线进行分析。在距离  $L \geq 7.5$  m 后, 桩体竖向极限承载力下降曲线较平缓, 下降曲线变化率为 2.3 kN/m; 当在  $L = 5$  m 时, 桩体竖向极限承载力下降速度迅速增大, 下降曲线的变化率为 9 kN/m, 下降速度是  $L \geq 7.5$  m 的 3.9 倍。从图 4 得知, 当刀盘距离桩轴线较近时, 桩体中部开始出现负摩擦力, 使桩体中部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) 在刀盘未通过桩体 ( $L \geq 0$ ) 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, 土仓压力为 0.5 MPa 时, 桩体竖向极限承载力为 956 kN, 承载力下降了 12%; 土仓压力为 0.3 MPa 时, 桩体竖向极限承载力为 945 kN, 承载力下降 12.5%, 比土仓压力为 0.5 MPa 时多下降了 0.5%, 说明土仓压力对桩体竖向极限承载力的下降有抑制作用; 与隧道下穿桩基的情况相比, 在盾构开挖过程中,

桩体承载力下降没有出现变缓现象, 从  $L=5 \sim -5$  m 过程中, 桩体承载力一直下降较快, 但下降速度较隧道下穿桩基的情况慢。

## 3.3 盾构施工及土仓压力对桩顶竖向沉降的影响

从图 7 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  $L=-15$  m 时沉降量达到最大, 最大值约为 8.9 mm, 开挖继续进行, 桩顶沉降略微减小后保持不变, 其沉降量远小于隧道下穿基桩时桩体的沉降量 22.5 mm<sup>[12]</sup>。

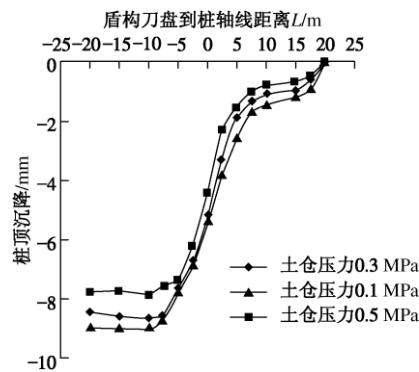


图 7 桩顶沉降变化

Fig. 7 Curves of settlements at top of pile

(2) 在距离  $L > 5$  m 时, 桩顶沉降较小且发展缓慢, 在  $L = 5$  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, 对土体产生较大扰动, 导致桩周土体强度降低, 提供给桩的侧向摩阻力减少, 使得桩顶开始产生较大沉降。

(3) 土仓压力能减少桩体沉降量, 土仓压力较大时, 桩顶沉降量变小; 与桩体位于隧道正上方相比, 随着隧道开挖的进行, 在不同土仓压力下, 桩体的沉降并没有趋于相同, 土仓压力为 0.1 MPa 时, 桩端最终沉降量为 8.92 mm, 土仓压力为 0.3 MPa 时, 桩端最终沉降量为 8.4 mm, 土仓压力为 0.5 MPa 时, 桩端最终沉降量为 7.69 mm。

## 4 结 论

本文通过三维数值方法研究了盾构机侧穿桩基时, 引起的单桩力学响应, 分析过程中考虑了多种施工因素的影响, 如土仓压力、盾构机与桩的相对位置等。得出了单桩地基承载力和桩顶沉降与盾构机前端与桩体之间距离的以下变化规律:

(1) 盾构刀盘推进基桩而后远离基桩的动态施工过程中, 桩身入土深度 6 m 以内, 桩侧摩阻力变化很小; 6~16 m 范围桩侧摩阻力逐渐减小, 出现负摩阻力, 产生两个中性点, 上面中性点受拉, 下面中性点受压, 随着刀盘向前推进, 上中性点向上偏移, 下中

性点向下偏移, 负摩阻力范围逐渐增大, 而后趋于稳定, 负摩阻力最大值位于隧道冠顶附近; 桩端附近摩阻力逐渐增大, 最后稳定于一定值。

(2) 盾构刀盘推进过程中, 桩体沉降先增大后减小, 最后趋于稳定, 其最大沉降量比隧道下穿基桩时要小得多; 桩体竖向极限承载力逐渐下降, 承载力下降过程中没有出现变缓现象, 下降速度较隧道下穿桩基的情况慢。

(3) 在刀盘未通过桩体时, 土仓压力可以抑制桩体的沉降, 减少桩体承载能力的降低; 当刀盘通过桩体后, 土仓压力对桩体的影响很小。

(4) 在盾构掘进中, 保持土仓压力与作业面压力(土压、水压)平衡是防止地表沉降, 保证建筑物安全的一个重要因素, 土压力不足, 会加大地表沉降; 土压力过大, 会造成地表隆起。通过本章分析得出: 在刀盘为通过桩体前适当加大土仓压力, 可以有效减小桩体及地表沉降, 保证建筑物安全; 在刀盘通过桩体后, 适当减小土仓压力, 维持开挖面平衡。

## 参考文献:

- [1] MAIR R. Tunneling and geotechnics: new horizons[J]. *Géotechnique*, 2008, **58**(9): 695 – 736.
- [2] CHEN L T, POULOS H G, LOGANATHAN N. Pile responses caused by tunneling[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)* 1999, **125**(3): 802 – 811.
- [3] 阮林旺. 软土盾构推进对相邻土层及桩体影响的三维有限元分析[D]. 上海: 同济大学, 1997. (RUAN Lin-wang. Analysis on the influence of shield tunneling construction to adjacent soil and pile in soft soil with the three-dimensional finite element software[D]. Shanghai: Tongji University, 1997. (in Chinese))
- [4] 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 Yong-sheng, HUANG Hai-ying. Method of practical calculation on strength effect shield tunneling construction has on adjacent pile[J]. Journal of Tongji University, 1997, **25**(3): 261 – 267. (in Chinese))
- [5] PASTAKORN, KITIYODOMN, TATSUNORI Matsumoto, et al. A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunneling[J]. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 2005, **29**: 1485 – 1507.
- [6] 杨晓杰, 邓飞皇, 聂雯, 等. 地铁隧道近距穿越施工对桩基承载力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(6): 1290 – 1295. (YANG Xiao-jie, DENG Fei-huang, NIE Wen, et al. Study on the influence of subway tunnel construction on pile bearing capacity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(6): 1290 – 1295. (in Chinese))
- [7] 芮勇勤, 岳中琦, 唐春安, 等. 隧道开挖方式对建筑物桩基影响的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(5): 735 – 741. (RUI Yong-qin, YUE Zhong-qi, TANG Chun-an, et al. Analysis the influence of tunnel excavation way on pile[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(5): 735 – 741. (in Chinese))
- [8] 朱逢斌, 杨平, ONG W. 盾构隧道开挖对邻近桩基影响数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(2): 298 – 302. (ZHU Feng-bin, YANG Ping, ONG W. Numerical analysis on influence of shield tunnel excavation to neighboring piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(2): 298 – 302. (in Chinese))
- [9] 刘丽. 盾构掘进过程中邻近桩基的反应分析研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006. (LIU Li. Research on the responses of adjacent pile with shield tunnel construction[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese))
- [10] 潘军刚. 隧道近接施工引起邻近既有桩基的内力和变形研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007. (PANG Jun-gang. Study on the response of internal forces and deformations of existing pile foundation to tunneling[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese))
- [11] 李德胜, 李大勇. 双孔隧道盾构施工对邻近桩基变形和内力的研究[J]. 铁路勘查与设计, 2008(2): 40 – 44, 68. (LI De-sheng, LI Da-yong. Research on the effect of double orifice shield tunneling construction on the deformation and internal force of adjacent pile[J]. *Railway Exploration and Design*, 2008(2): 40 – 44, 68. (in Chinese))
- [12] 李德胜, 李大勇. 盾构机下穿桩基施工对单桩承载力影响的数值研究[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(2): 284 – 288. (LI De-sheng, LI Da-yong. Numerical simulation of effect of shield tunneling on bearing capacity of single pile[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, **17**(2): 284 – 288. (in Chinese))
- [13] 李德胜. 盾构隧道近接施工对邻近既有桩基的影响研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2008. (LI De-sheng. Study effect of pile foundation adjacent to shield tunneling[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))



第33卷 增刊2  
2011年 10月

岩 土 工 程 学 报  
Chinese Journal of Geotechnical Engineering

Vol. 33 Supp. 2  
Oct. 2011

(本文责编 黄贤沙)