

文章编号: 1000-7598 (2013) 11-3055-06

膨胀土地基中隧道施工对群桩影响研究

马少坤^{1,2}, WONG K S³, 吕 虎³, 吴宏伟³, 赵乃峰⁴

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 广西大学 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004;
3. 香港科技大学 土木及环境工程系, 香港; 4. 广西大学 资源与冶金学院, 南宁 530004)

摘 要: 在膨胀土地基中进行隧道对群桩影响的三维离心模型试验研究, 目标地层损失比为 2%, 着重研究引起的地基沉降槽、桩的附加沉降、附加弯矩、轴力的变化规律。试验得出: 隧道开挖沉降槽空间效应明显; 隧道开挖从 $-0.75D$ 至 $1.25D$ 时, 桩附加沉降呈线性增长, 隧道开挖至 $1.25D$ 以后, 桩依然沉降明显。前桩与后桩沉降值不同, 桩帽会出现倾斜; 前桩上部出现负附加弯矩而下部出现正附加弯矩, 而后桩仅在下部出现正附加弯矩; 前桩附加弯矩最大值出现在隧道轴线附近, 且比后桩附加弯矩大得多; 前桩附加轴力随着隧道的开挖而增加, 且每步最大值在隧道轴线附近。后桩的轴力也随隧道的开挖而增加, 但每步最大值出现在桩顶附近。

关 键 词: 离心模型试验; 隧道; 群桩; 相互作用

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of effects of tunnel construction on pile group in expansive soil

MA Shao-kun^{1,2}, WONG K S³, LÜ Hu³, NG CHARLES W W³, ZHAO Nai-feng⁴

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China; 4. College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: A three-dimensional centrifuge model test was carried out to investigate tunnelling effects on pile group in expansive clay. A volume loss of 2% was controlled. During the test, ground settlement trough, additional settlement, additional bending moment and axial force of pile due to tunnelling were monitored. The results show that ground settlement troughs are affected obviously by the distance between the centre axis of pile group and tunnel face. The additional settlement of pile shows linear growth with the tunnel excavation from $-0.75D$ to $1.25D$; and it continues to settle even when the tunnel excavation reaches $1.25D$ away. The settlements of front piles and behind piles are different; and the pile cap tilts. Positive additional bending moment presents at the top of front pile while negative bending moment presents at the bottom. However, only positive additional bending moment occurs at the bottom for behind pile. Moreover, the maximum additional bending moment of the front pile occurs near the axis of tunnel; and it is much bigger than that of the behind pile. The additional axial force of the front pile increases with the tunnel construction and reaches maximum near the axis of tunnel. The additional axial force of the behind pile increases too; but it reaches maximum near the top of pile.

Key words: centrifuge model test; tunnel; pile group; interaction

1 引 言

隧道开挖会不可避免地引起地基的附加变形, 相应地引起相邻桩基础的附加轴力和弯矩及桩周边土体明显的应力松弛。目前已有许多学者对此进行了相关的监测、理论及数值分析。Mair^[1]监测了伦敦硬黏土地区隧道开挖对某 6 层建筑物钻孔灌注桩

基的影响, 结果显示, 桩基及地基均有相似的水平位移。Jacobsz^[2]监测了伦敦海峡铁路连接工程中隧道施工对桩基的影响。建议若有过大的地层损失时要进行桩的承载力的重新评估。姜忻良等^[3]监测发现: 在盾构开挖过程中, 隧道周围土体经历先挤压后应力释放的过程, 离隧道轴线越近的土体受施工扰动越大。Poulos 和 Chen^[4]设计了表格来估算隧道

收稿日期: 2012-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 51068002); 广西岩土力学与工程重点实验室资助课题(No. 10-046-14-1); 广西重点实验室系统性研究项目资助(No. 2012ZDX09); 南宁轨道交通有限责任公司科研项目资助; 香港政府研究资助局(No. 617608)。

第一作者简介: 马少坤, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 主要从事地下工程研究工作。E-mail: mashaokun@sina.com

开挖引起桩的附加弯矩、轴力及变形。李强等^[5]研究表明,隧道开挖引起桩侧呈负摩阻力状态,对桩基的受力非常不利。

同时,国内外学者也进行了大量的相关离心模型试验研究^[6]。Bezuijen 等^[7]研究了隧道施工对已有建筑桩基础的影响,结果表明,当桩与隧道掌子面相距 1 倍隧道直径以内时,桩会发生明显的附加沉降。Loganathan 等^[8]研究了隧道开挖对黏土地基的变形和相邻桩的影响,结果表明,桩趾位于隧道中心轴线附近时,隧道开挖引起的附加弯矩和侧向变形非常明显。Lee 和 Chiang^[9]发现,由于隧道开挖引起的地层损失,隧道附近的端承桩的承载力会明显降低并且产生很大的附加沉降。Ong^[10]研究了隧道对单桩和群桩的影响,分别测定了隧道开挖时桩的附加弯矩和轴力,得出桩的类型及桩台的水平约束对其附加弯矩和轴力影响明显。

但以上研究中一般只考虑隧道的一次性开挖效果,没有考虑开挖的空间效应。特别在膨胀土地基中的三维离心模型试验还鲜有研究。本文将着重进行膨胀土地基中隧道对群桩影响的三维离心模型试验研究。

2 离心模型试验基本原理及设备

将原型尺寸 $1/n$ 的试验模型置于 ng 离心重力场中,试验模型自重增大 n 倍,则模型中每点所受到的应力与原型中相应点的应力相同,这就是离心机模型试验的相似性定律。若不考虑颗粒的尺寸效应,在相同的材料及边界条件下,离心模型所受应力与原型相符。表 1 列出了离心模型试验主要参数的相似性定律。

本次试验在香港科技大学土工离心机上完成,该离心机建成于 2001 年^[11],各项测试、监视设备齐全,可以实现多功能模拟。离心机主要技术性能如下:容量 $400\text{ g}\cdot\text{t}$,旋转半径为 4.2 m ,最大加速度为 $150g$ 。

表 1 主要物理量相似比关系

Table 1 Physical similarity ratios of centrifuge tests

物理量	相似比	物理量	相似比
加速度 a	N	沉降 s	n
线性尺度 L	$1/n$	应力 σ	1
面积 A	$1/n^2$	应变 ε	1
体积 V	$1/n^3$	力 F	$1/n^2$
时间(固结) t	$1/n^2$	密度 ρ	1
渗流速度 v	N	质量 m	$1/n^3$
渗透系数 k	N	弯曲刚度 EI	$1/n^4$

3 试验模型及地层损失的模拟系统

3.1 试验土样与试验模型

本试验中,采用广西地区膨胀土作为试验土体。最大干密度为 1.88 g/cm^3 ,塑性指数为 28.0,最优含水率为 12.9%。此次试验中,干密度为 1.60 g/cm^3 。

此次离心机试验的重力加速度为正常重力场下的 40 倍 ($40g$),故模型尺寸为现场的 $1/40$ 。试验模型总尺寸为 1.265 m (长) $\times 0.935\text{ m}$ (宽) $\times 0.75\text{ m}$ (高)。图 1 显示了模型断面示意图。本次试验材料的模型尺寸与原型尺寸如表 2 所示。

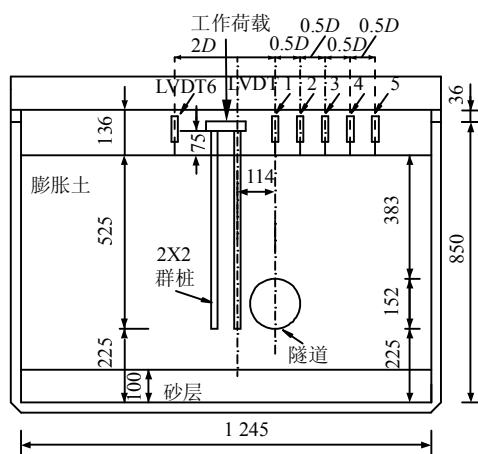


图 1 模型断面示意图 (单位: mm)

Fig.1 Sketch of centrifuge model (unit:mm)

表 2 原型尺寸与模型尺寸

Table 2 Prototype and model scales

参数	模型尺寸/mm	原型尺寸/m
隧道埋深	374	14.96
隧道外径	152	6.08
每段开挖长度	76	3.04
总开挖长度	380	15.20
单桩直径	20	0.80
插入土中长度	525	21.00
桩间间距	70	2.80
隧道与前桩间距	38	1.50
承台高	20	0.80
承台平面尺寸	120×120	4.8×4.8

本次试验中,隧道由 5 节水袋组成,以模拟 5 步阶段的开挖^[6]。5 节塑料水袋用金属框架组装在一起,用以固定水袋的位置。模型群桩由 4 根单桩组成,模型桩由铝管制成,单桩用承台连接。

3.2 地层损失的模拟系统

Jacobsz 等^[2, 12]成功地采用了排水法模拟隧道施工引起的地层损失。本试验同样采用该方法。即在离心机高速运转的过程中,逐步排出 1~5 号水袋中的预设好的水量,模拟预定的地层损失。试验设备工作原理示意图如下图 2 所示。

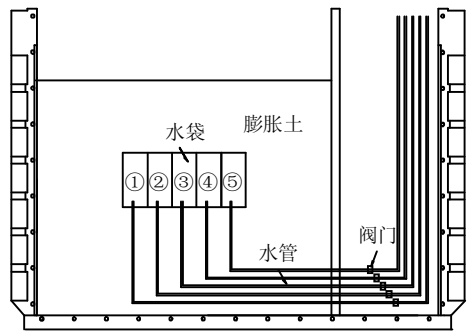


图 2 地层损失的模拟系统工作原理示意图
Fig.2 Sketch of working principle of simulation system for gound loss

试验中，目标地层损失率为 2%，每个水袋体积为 $1.38\times10^6\text{ mm}^3$ ，则设计排水体积为 $2.76\times10^4\text{ mm}^3$ ，根据水管内径为 2.5 mm，得到排出水的长度为 5 620 mm。试验结束后，测得水管中水位与设计长度分别相差-35、+65、+20、+10、+15 mm。由此可得，5 个开挖阶段中，实际地层损失率分别为 1.99%、2.02%、2.01%、2.00%、2.00%。均控制在 5%以内。

4 数据监测

试验中共布置了 10 个位移传感器（LVDT），其中 6 个布置在地基模型表面（如图 1 所示），4 个布置在桩顶。桩弯矩及轴力测点布置见图 3，共 36 组应变计（SG）。表 3 中列出了传感器的相关参数。

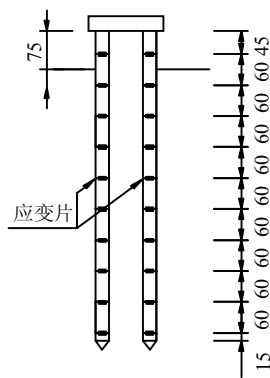


图 3 桩弯矩及轴力应变片布置（单位：mm）
Fig.3 Layout of strain gauges for bending moment and axial force (unit:mm)

表 3 试验中用的传感器

Table 3 Different transducers in tests				
传感器	类型	型号	输入电压	量程
LVDT	位移传感器	Marco Sensor's PR series	DC10 V	0~80 mm
SG	应变计	TML-GFLA-3-70	DC 5 V	0%~3%

5 模型制备

将试验土样晒干、碾碎，然后过 2 mm 的筛，筛后的土样与水按含水率 18%充分拌匀并闷 24 h 以上。

先在模型箱的底部安装好排水管后，均匀撒一层砂，约 100 mm 厚。称好一定的土样，按设计密度均匀击实约 50 mm 厚，再将击实面凿毛进行下一层土的击实。

当模型制备至隧道及桩底设计高度时，将隧道模型和群桩模型按照设计的间距固定于土平面上，如图 4 所示。完成安放模型隧道和模型群桩之后，继续制备模型，直至模型的设计高度 750 mm。



图 4 隧道与桩相对位置
Fig.4 Relative position between tunnel and pile

6 试验流程

试验分为以下 6 个阶段：①离心机加速度升至 40g；②地表沉降的稳定；③在桩顶逐步施加荷载至工作荷载：O'Neill 和 Reese^[13]曾把桩沉降为 5%倍桩径所对应的荷载为极限荷载，根据经验可把沉降为 2%所对应的荷载作为工作荷载，根据先期 $P-s$ 测试结果，工作荷载为 1 500 N(相当于原型 2 400 kN)；④分 5 步分别将水袋 1~5 中的水排出，以分别模拟隧道的 5 步开挖；⑤开挖完成后孔隙水压的消散及桩基长期沉降（该步成果将与后期试验对比再做论述）；⑥将离心机加速度降至 1g。试验流程所用时间见表 4。

表 4 试验阶段时间

Table 4 Experimental durations for every stage	
事件	模型时间/min
升至 40g	10
数据稳定	240
隧道开挖	10
长期效应	1200
降 40g 回到 1g 状态	30

7 试验结果及分析

文中除特定说明外, 试验结果均已换算为原型尺寸结果。

7.1 地表沉降

图 5 为开挖阶段的地表沉降变化图。可以看出, 地表沉降随开挖的进行逐渐增大。5 步开挖中, 第 2、3、4 步开挖引起地表沉降较大, 约占总沉降的 80%。第 1、5 步引起的沉降较小。隧道开挖完成后, 沉降槽呈正态曲线分布, 最大沉降发生在隧道的轴线处, 最大沉降值为 18.0 mm。距离隧道两倍直径处, 地表沉降为 6.3 mm。由于左侧无法布置和右边一样多位移传感器, 故难以看出桩的存在对沉降槽的影响, 但从离隧道中心线 $\pm 2D$ 两点处的位移来看, 位移受桩基影响较少。

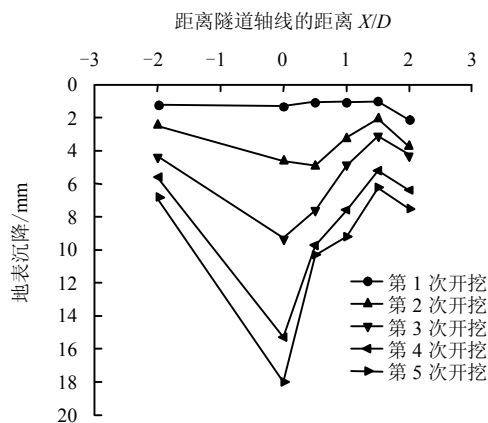


图 5 不同开挖阶段的地表沉降槽

Fig.5 Ground settlements in different stages

7.2 隧道施工对群桩的影响

7.2.1 桩顶附加沉降

图 6 为开挖引起的桩顶附加沉降。可以看出, 桩顶附加沉降随着隧道开挖的进行而增加。第 1 步引起的桩顶附加沉降较小, 后 4 步开挖引起的桩顶附加沉降相近。开挖完成后桩顶中心的附加沉降值为 17.6 mm。LP4 处测得的沉降值最大, 为 20.3 mm。这是因为隧道开挖引起隧道轴线附近土体围压的降低, 隧道底部回弹而造成前桩桩底的应力松弛, 承载力下降, 故前桩有更大的附加沉降, 从而引起桩顶倾斜。另外, 当隧道开挖至 $1.25D$ 以后, 桩依然沉降明显, 这比 Ng 和 Lee^[14]数值分析得出的主要影响区域 ($\pm 1D$) 更大, 可能是因分段开挖而具有一定的长期效应。Ran^[15]在离心试验中也发现, 地基在隧道完成很长时间后仍然有明显的沉降。

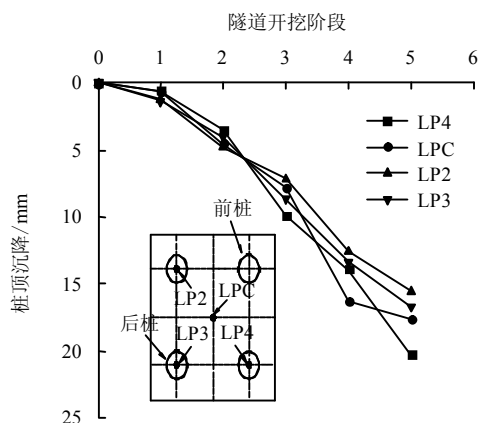


图 6 隧道开挖引起的桩顶附加沉降

Fig.6 Additional settlements of pile top induced by excavation of tunnel

7.2.2 附加弯矩

文中以产生桩与隧道临近一侧受拉的弯矩为正, 受压为负。

图 7 为隧道开挖引起前桩的附加弯矩。可以看出, 桩的上部分出现负弯矩而下部分出现正弯矩, 弯矩最大值出现在隧道的轴线附近, 为 $202.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。这主要是因为隧道的开挖引起隧道附近土体的应力松弛, 从而使右侧土体对桩产生水平挤压作用。而桩可看作是一条弹性地基梁, 下端可看作简支, 上端由于存在加载装置而具有一定的约束, 故下端弯矩接近为 0, 而上端具有一定的负弯矩。在 5 步开挖中, 第 2 步开挖引起的弯矩最大, 约占最终弯矩的 80%。后 3 步开挖对桩造成的弯矩很小。

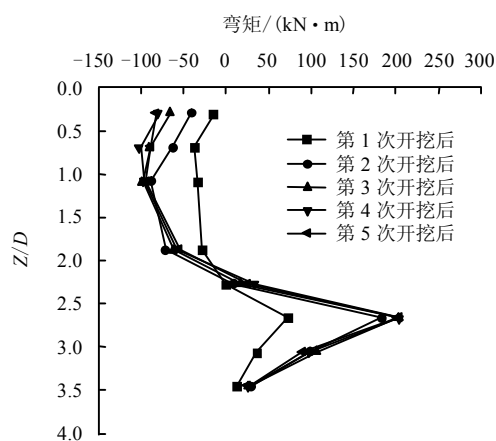


图 7 隧道开挖引起前桩的弯矩

Fig.7 Tunnelling-induced bending moment on the front pile

图 8 为开挖引起后桩的附加弯矩图, 可以看出, 在桩的上部分 ($Z/D < 1.9$), 没有出现明显的弯矩。在桩的下部分, 出现正弯矩。最大值为 $58.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$,

仅为前桩的 25%左右。在 5 步开挖的过程中, 第 4 步与第 5 步引起的桩的弯矩最大, 这主要是因为前桩的遮拦作用, 后桩所受影响滞后且减小。

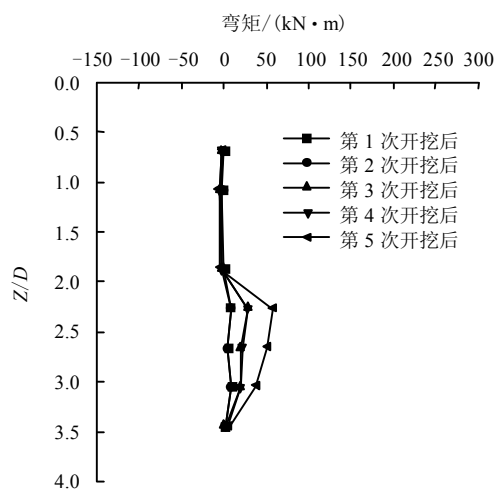


图 8 隧道开挖引起后桩的弯矩
Fig.8 Tunnelling-induced bending moment on the behind pile

7.2.3 附加轴力

图 9 为开挖引起的前桩的附加轴力。可以看出, 桩的轴力因为隧道的开挖而增加。每步开挖引起的附加轴力在隧道轴线附近达到最大值, 然后随着深度的增加而减小, 这主要是因为隧道开挖使隧道轴线以上土体产生应力松弛而下降, 此时桩侧摩阻力表现为负摩擦力, 轴力增大。而隧道轴线以下土体发生应力回弹, 此时桩侧摩阻力表现为正摩擦力, 轴力减小。另外, 第 1 步和第 2 步开挖引起的轴力变化很小。第 3 步开挖引起的轴力增加最为明显。隧道开挖完成时, 最大附加轴力为 80 kN, 约增加 13%。

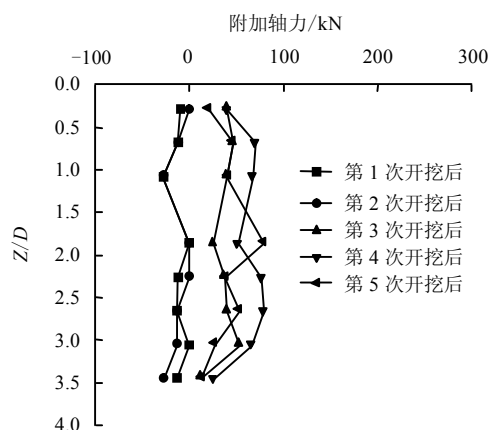


图 9 隧道开挖引起的前桩轴力的变化
Fig.9 Axial forces of the front pile induced by excavation

图 10 为开挖引起的后桩的附加轴力。与前桩的附加轴力相似, 但后桩的轴力一直到第 5 步开挖还在增大, 相对前桩明显地具有滞后现象, 这主要也是由于前桩遮拦效应。附加轴力最大值为 120 kN, 约增加 20%。与前桩不同的是, 附加轴力最大值出现在桩顶处, 并随深度的增大而减小。

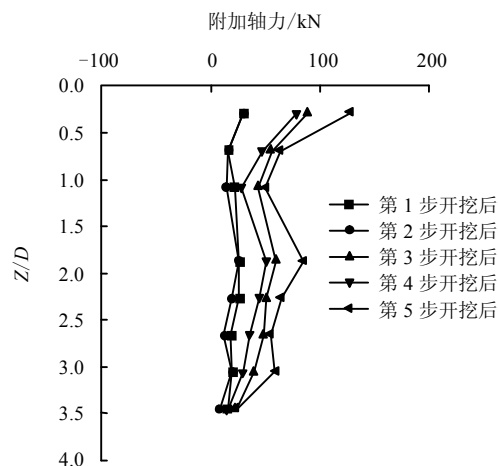


图 10 隧道开挖引起后桩轴力的变化
Fig.10 Axial forces of the behind pile induced by excavation

7 结 论

- (1) 隧道开挖沉降槽空间效应明显。
- (2) 隧道开挖从 $-0.75D$ 至 $1.25D$ 时, 桩沉降呈线性增长, 隧道开挖至 $1.25D$ 以后, 桩依然沉降明显。桩帽出现倾斜。
- (3) 随着隧道开挖的进行, 前桩上部出现负弯矩而下部出现正弯矩, 弯矩最大值出现在隧道的轴线附近, 为 $202.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。后三步开挖对桩造成的弯矩很小。与前桩不同的是, 后桩仅在下部出现正弯矩, 没有明显的负弯矩出现, 最大值为 $58.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 仅为前桩的 25%左右。
- (4) 前桩附加轴力随着隧道的开挖而增大, 且每步最大值在隧道轴线附近, 约增加 13%。后桩的轴力也随临近隧道的开挖而增加, 但每步最大值在桩顶附近, 约增加 20%。

参 考 文 献

- [1] MAIR R J. Developments in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations[C]// Proceedings of Institution of Civil Engineers, Civil Engineering. London: Thomas Telford Ltd., 1993: 27—41.
- [2] JACOBSZ S W. The effects of tunneling on piled

- foundations[D]. UK: University of Cambridge, 2002.
- [3] 姜忻良, 赵志明, 李圆. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1542—1544.
- JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-ming, LI Yuan. Analysis and calculation of surface and subsurface settlement trough profiles due to tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1542—1544.
- [4] POULOS H G, CHEN L T. Pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(4): 670—677.
- [5] 李强, 王明年, 李德才, 等. 地铁车站暗挖隧道施工对既有桩基的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 184—190.
- LI Qiang, WANG Ming-nian, LI De-cai, et al. Effects of subsurface construction of metro station tunnel on existing pile foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 184—190.
- [6] NG C W W, HU L, PENG S Y. Three-dimensional centrifuge modelling of the effects of twin tunnelling on an existing pile[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2013, 35: 189—199.
- [7] BEZUIJEN A, VAN DER SCHRIER J. The influence of a bored tunnel on pile foundations[C]//Proceedings of the International Conference Centrifuge 94. Singapore: Taylor & Francis, 1994: 681—685.
- [8] 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.
- [9] LEE C J, CHIANG K H. Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44(10): 1224—1241.
- [10] ONG C W. Centrifuge model study of tunnel-soil-pile interaction in soft clay[D]. Singapore: National University of Singapore, 2009.
- [11] NG C W W, VAN LAAK P, TANG W H, et al. The Hong Kong Geotechnical Centrifuge[C]//Proc. 3rd Int. Conf. Soft Soil Engineering. Hong Kong: A.A.Balkema, 2001: 225—230.
- [12] JACOBSZ S W, STANDING J R, MAIR R J, et al. Centrifuge modeling of tunneling near driven piles[J]. **Soils and Foundations**, 2004, 44: 49—56.
- [13] O'NEILL M W, REESE L C. Drilled shaft: Construction procedures and design methods[M]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1999.
- [14] NG C W W, LEE G T K. Three-dimensional ground settlements and stress-transfer mechanisms due to open-face tunneling[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42(4): 1015—1029.
- [15] RAN X. Tunnel pile interaction in clay[D]. Singapore: National University of Singapore, 2004.

桩基工程与动测技术 500 问

著译者: 刘兴禄等, 16 开本, 318 页, 平装, 定价: 58 元, 出版单位: 中国建筑工业出版社, 版次: 第 1 版, 出版时间: 2013 年 9 月, 标准书号: ISBN 978-7-112-15262-9, 征订号: 23247。

内容简介: 本书《桩基工程与动测技术 500 问》是在《桩基工程与动测技术 200 问》的基础上仍以问答形式编写。全书分九个部分共 546 问。包括: 桩基的岩土工程勘察 20 问; 桩基设计与施工 58 问; 桩基计算 58 问; 基桩的动测技术 151 问; 静-动试桩法 5 问; 声波透射法 13 问; 桩的质量检验与验收 18 问; 综合选择和填空题 233 道; 综合选择和填空题参考答案。

桩的动测技术是知识面广、多科学交叉的一门科学。全书动测方面的内容占 2/3, 以基本概念为主, 深入浅出, 简明实用, 对检测人员提高技术水平和实践中的检测结果正确判断有很大帮助。

目录: 第 1 章 桩基的岩土工程勘察 (20 问); 第 2 章 桩基设计与施工 (58 问); 第 3 章 桩基计算 (58 问); 第 4 章 基桩的动测技术 (151 问); 第 5 章 静-动试桩法 (5 问); 第 6 章 声波透射法 (13 问); 第 7 章 桩的质量检验与验收 (18 问); 第 8 章 综合选择和填空题 (223 道, 带*为多选题); 第 9 章 综合选择和填空题参考答案。参考文献。索引。

读者对象: 本书可供从事桩的检测、桩基设计、注册岩土工程师考生和监理等人员参考, 也可供大专院校的岩土工程方面师生学习。

(摘自 中国建筑书店)