

DOI: 10.11779/CJGE201907018

# 地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应物理模拟及新进展

刘松玉<sup>1</sup>, 李洪江<sup>\*1</sup>, 童立元<sup>1</sup>, 张明飞<sup>2</sup>, 周志宏<sup>3</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 郑州航空工业管理学院土木建筑工程学院, 河南 郑州 450046;  
3. 江苏省建设工程设计施工图审核中心, 江苏 南京 210036)

**摘要:** 地下工程开挖卸荷引起的灾变问题一直是社会高度关注的问题之一, 近年来中国多地发生了由基坑开挖或隧道建设诱发的地面变形、桩基倾斜偏位及建筑物垮塌等灾害事故, 威胁人们的生命和财产安全。简要介绍传统地下工程开挖卸荷物理模拟存在的不足, 对比概述了近 20 a 间国内外有关基坑、隧道开挖对桩基影响的典型试验方法和试验装置(小比尺模型试验和离心机试验)。重点设计提出了一种地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应室内综合模拟试验装置, 并对模型设计原理及技术特点进行了分析, 同时开展了邻近基坑开挖对既有工程桩水平承载力影响及工程阻隔物对地下水阻挡作用影响两类问题试验研究。最后, 对卸荷桩未来的研究方向提出了一些建议和展望。

**关键词:** 地下工程开挖; 桩基; 模型试验; 气压加载; 卸荷桩

**中图分类号:** TU473      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2019)07-1329-10

**作者简介:** 刘松玉(1963—), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学与岩土工程教学与科研工作。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

## Model tests and new progress of pile response due to underground excavations

LIU Song-yu<sup>1</sup>, LI Hong-jiang<sup>1</sup>, TONG Li-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Ming-fei<sup>2</sup>, ZHOU Zhi-hong<sup>3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Civil Engineering and Architecture Institute, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China; 3. Jiangsu Provincial Construction Drawing Examination & Verification Center, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** The disaster from the unloading effects induced by underground excavations has always been one of the high-concern issues. In recent years, a series of ground deformation, pile foundation tilt, or building collapse cases have taken place in China, and sometimes they even threaten people's lives and property. The imperfection of the conventional model tests for simulating underground excavations is introduced, and the typical experimental test methods and test devices including small-scale and centrifuge models corresponding to excavation of foundation pit and tunneling in the past two decades are briefly compared. In this study, a new testing apparatus for pile load response undergoing underground excavations is proposed, and its design principles and technical characteristics are analyzed. Using the test boxes, the studies on the lateral pile response to adjacent excavation and the blocking effect of a barrier on the flow of groundwater are conducted. Finally, some suggestions and prospects about the future study on unloading piles are put forward.

**Key words:** underground excavation; pile foundation; model test; pneumatic loading; unloading pile

## 0 引言

随着城市化进程的加快, 城市地下空间开发带来的环境效应越来越严峻, 特别是基坑开挖、隧道掘进导致的既有工程桩破坏现象频发。如图 1 所示, 基坑开挖或隧道掘进会诱发周边土体产生应力释放和位移, 进而在邻近桩体内部产生附加应力和变形, 削弱桩基的正常服役能力。地下空间开挖卸荷效应已经成为工程人员必须考虑的热点问题, 也是科研工作者亟待解决的难点问题。近年来, 城市高密集区各种复杂型式的地下开挖工程不断涌现, 如超大规模集群式开

发基坑群与坑中坑、地铁盾构隧道穿越密集建筑群、既有建筑地下室增设等。面对上述问题, 已有的桩基承载理论已不能完全满足地下工程近接施工条件下的桩基设计要求, 仍沿用传统的分析方法指导设计和施工, 往往会导致重大工程事故。地下工程开挖卸荷既

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0800201); 江苏省建设系统科技项目(2014ZD66); 国家自然科学基金项目(51578146, 51878157); 江苏省自然科学基金项目(BK20181282)。

**收稿日期:** 2018-07-12

**\*通讯作者** (E-mail: lihongjiang55@126.com)

有桩基承载响应问题是一个复杂的桩-土-卸荷体相互作用问题, 英国、澳大利亚、新加坡、香港等一些国家/地区在该领域已经走在了世界的前列, 国内专家学者也进行了一些探索性工作。主要集中在以下几个方面: 针对土体开挖卸荷特性研究<sup>[1-4]</sup>, 在开挖引起的地层变形影响方面<sup>[5-8]</sup>, 在基坑开挖对邻近桩基础影响方面<sup>[7, 9-12]</sup>, 在隧道开挖对邻近桩基影响方面<sup>[13-18]</sup>, 在基坑开挖坑内工程桩竖向承载特性方面<sup>[8, 19-22]</sup>), 都取得了有益成果, 为今后相关研究奠定了基础。

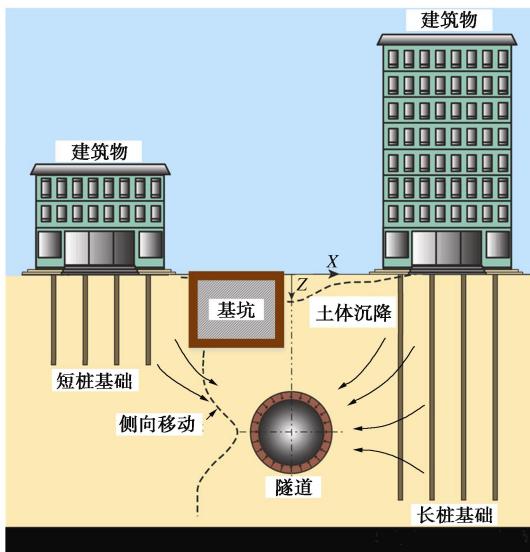


图 1 地下工程(基坑、隧道)开挖卸荷对桩基影响示意

Fig. 1 Impact of underground excavations (foundation pit and tunneling) on loading characteristics of piles

本文重点关注地下工程开挖卸荷物理模拟上存在的缺陷, 总结对比分析了国内外相关试验方法和试验装置及存在的问题, 设计提出了一种地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应室内综合模拟装置, 并对模型设计原理及技术特点进行了分析。最后指出卸荷桩研究上存在的不足和今后的方向, 以期促进国内卸荷桩相关科学的研究发展。

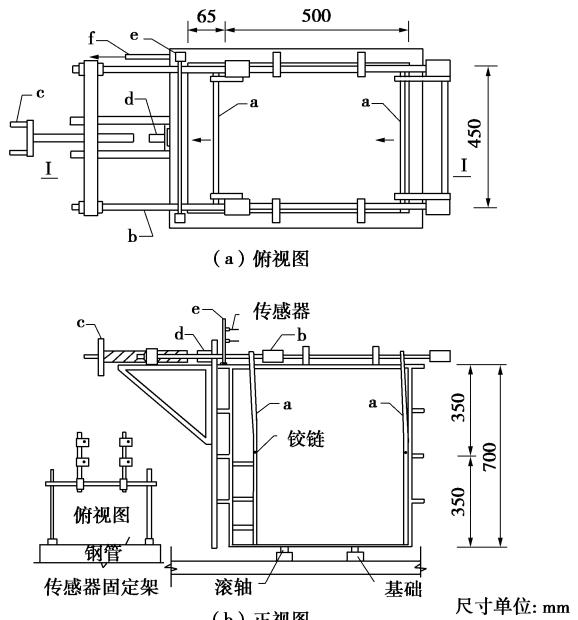
## 1 物理模拟方法与试验装置概述

地下工程开挖卸荷引起的既有桩基承载响应规律复杂, 研究的难点在于工程桩往往先于地下工程开挖埋入地下, 现场往往缺少传感器的埋设, 导致地下工程开挖过程中无法观测既有桩基的深部受力变形规律。目前的研究思路主要还是依据室内物理模拟试验, 包括小比尺 1g 模型试验和离心机试验。

### 1.1 基坑开挖卸荷模拟

基坑开挖卸荷往往伴随土体的侧向移动, 土体的移动会在桩身产生附加应力和位移, 通常称为被动桩问题。针对这一问题, Chen 等<sup>[23]</sup>最早采用室内模型试

验研究了土体运动位移下的群桩受力变形规律, 图 2 为其采用的模型装置原理图, 其借助于加载系统将力作用在钢板上, 然后钢板带动土体一起水平移动。由于作用力是通过整块钢板传递的, 该试验装置仅能模拟单一土体运动模式下的桩基响应问题。同样地, Pan 等<sup>[24]</sup>采用与 Chen 等<sup>[23]</sup>类似的模拟装置研究了软黏土中考虑土体运动的被动群桩极限土抗力问题, 指出桩间距在 5 倍桩径时依旧存在群桩效应, 群桩效应系数随桩间距的减小而减小。类似的还有 Guo 等<sup>[25]</sup>的试验装置。国内陈锦剑等<sup>[26]</sup>开展了坑底土体开挖卸荷单桩竖向承载特性室内模型试验研究, 其采用重块预堆载模拟基坑未开挖前的初始应力, 继而分级卸掉堆载重块并同时进行试桩试验(如图 3)。研究指出深开挖对坑底工程桩承载力的影响主要包括: 开挖段桩侧摩阻力的缺失和坑底以下一定深度范围内桩周土围压减小引起的桩侧摩阻力损失。调研发现, 国内外涉及室内



注: a-钢架; b-加载系统; c-绞轮; d-载荷元; e-传感器固定架; f-传感器

图 2 土体运动位移模拟装置原理图<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of soil movement simulation devices

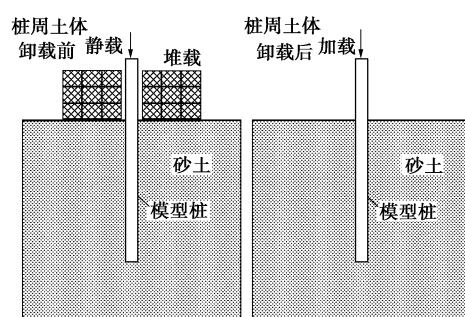


图 3 重块预堆载再卸载模拟坑底土开挖示意<sup>[26]</sup>

Fig. 3 Excavation simulation of bottom soil using heavy block preloading and unloading method

1g 卸荷试验模拟装置的研究非常少, 且已有的装置都是一种较为简单的近似模拟法。例如, 图 2, 3 的装置在分级开挖、成层开挖、动态开挖模拟等方面存在严重的技术缺陷, 试验装置都较为粗糙, 不能接近真实的开挖状态。对于采用重块预堆载再卸载的思路, 图 3 装置显然无法模拟深基坑、超深基坑的坑底卸荷桩基响应试验。

在离心机试验研究方面, 离心机能够克服模型试验的尺寸限制, 相关试验成果较多。Lyndon 等<sup>[27]</sup>较早开展了基坑开挖卸荷的离心机模拟, 初始加速度 1g, 然后通过不断增大加速度直至挡墙破坏, 但存在的问题是试验开挖过程难操作, 试验结果可靠性较低。Bolton 等<sup>[28-29]</sup>提出采用重流体模拟待开挖土体的方法, 具体选用  $ZnCl_2$  代替土体(装在一个乳胶袋内),  $ZnCl_2$  重度与土体重度相仿。在离心机运行过程中, 通过不断排出  $ZnCl_2$  液体来模拟土体开挖卸荷, 但液体的水平压力系数与静止土压力系数存在差别。Kimura 等<sup>[30]</sup>和 Loh 等<sup>[31]</sup>发展了新的离心机试验土体开挖模拟技术, 提出采用机器人挖掘机对高速运转中的土体进行开挖, 但由于受离心机机舱空间的限制, 未能获得广泛应用。目前国际上最常用的基坑开挖模拟方法仍然是重流体排移方法。采用  $ZnCl_2$  重流体排移法, Leung 等<sup>[32-33]</sup>先后考察了砂土中基坑开挖致土体运动对邻近单桩、群桩的影响。ONG 等<sup>[34]</sup>和 Leung 等<sup>[35]</sup>则研究了黏土中稳定挡墙和非稳定挡墙墙后单桩基础在土体开挖过程中的变形问题及挡墙-单桩相互作用问题。Ong 等<sup>[36]</sup>还研究了软黏土中不同尺寸、不同桩头约束条件、不同群桩配置(2, 4, 6 桩)下的卸荷群桩响应问题。ONG 等的离心机模型装置原理与传感器布设如图 4。图 5 为 Leung 等<sup>[35]</sup>采用 PIV 技术观测到的离心机仓内土体变形及单桩整体倾斜现象。Zheng 等<sup>[37]</sup>采用离心机试验考虑单桩桩土间弱摩擦和强摩擦, 研究了坑底开挖卸荷( $ZnCl_2$  排移法)对桩基竖向承载和侧壁摩阻力的影响规律。

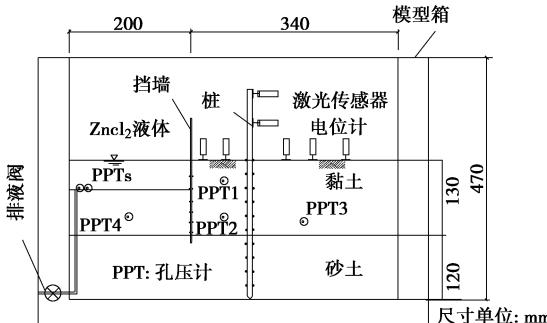


图 4 离心机试验装置及传感器布设<sup>[34-35]</sup>

Fig. 4 Centrifuge test devices and layout of sensors

表 1 汇总了国内外基坑开挖典型模拟试验方法、试验类型及其关注的主要科学问题。可以看出, 目前有关基坑开挖卸荷的模拟仍旧过度依赖离心机试验, 但离心机试验费用昂贵, 操作难度大, 而且离心运转过程中很难准确模拟基坑开挖的回弹效应, 再者, 离心试验的土体粒径效应, 桩-土尺寸比, 桩界面粗糙问题等都是未能很好解决的问题。因此, 合理有效的室内模拟装置及开挖卸荷模拟方法亟待提出。

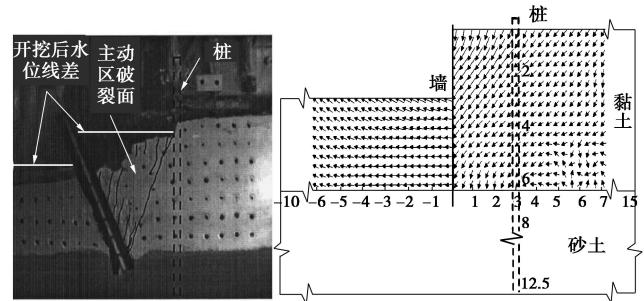


图 5 开挖过程中桩-土变形及土体剪应变分布<sup>[35]</sup>

Fig. 5 Pile-soil deformations and soil shear strains during excavation

表 1 基坑开挖典型模拟试验比较

Table 1 Typical model tests of excavation of foundation pits

试验	桩型	模拟方法及关注的科学问题	文献来源
室内 1g 群桩试验	群桩	采用侧向加载系统改变土体位移模式, 分析了土体运动位移下的群桩受力变形规律	Chen 等 <sup>[23]</sup>
离心机 单桩	单桩	采用 $ZnCl_2$ 排液法模拟基坑开挖, 研究砂土中基坑开挖致土体运动对邻近单桩影响	Leung 等 <sup>[32]</sup>
室内 1g 群桩试验	群桩	通过模型箱侧向施加载荷, 改变土体的运动位移, 考察土体移动作用下的桩土相互作用规律及极限土抗力取值大小	Pan 等 <sup>[24]</sup>
离心机 群桩	群桩	采用 $ZnCl_2$ 排液法模拟基坑开挖, 研究砂土中无支护基坑开挖致土体运动对邻近群桩影响, 同时模拟桩顶自由和有承台约束的双桩、四桩和六桩群桩基础的卸荷响应规律	Leung 等 <sup>[33]</sup>
离心机 单桩	单桩	采用 $ZnCl_2$ 排液法配合 PIV 技术, 研究黏土中稳定挡墙后单桩基础在墙前土体开挖过程中的变形问题及挡墙-单桩相互作用问题	ONG 等 <sup>[34]</sup>
离心机 单桩	单桩	采用 $ZnCl_2$ 排液法配合 PIV 技术, 明确了非稳定挡墙后单桩对土体开挖卸荷的响应规律, 并与稳定挡墙下的桩基变形规律对比	Leung 等 <sup>[35]</sup>

续表 1

离心机	采用 $ZnCl_2$ 排液法分析软黏土中不同尺寸、不同桩头约束条件、不同群桩配置 ONG 桩 (2,4,6 桩) 的群桩基础对开挖卸荷的响应问题
	属坑底卸荷模拟, 采用重块预堆载模拟初步地应力, 然后卸掉表层土重块进行试桩试验, 对比考察上部土体开挖卸荷条件下单桩承载力异同及承载特性
室内 1g 单桩试验	采用重流体 $ZnCl_2$ (密度 $1.53 \text{ kg/m}^3$ ) 逐次抽离模拟顶部土体的开挖卸荷过程。分别考察开挖卸荷效应对强摩擦桩、弱摩擦桩竖向承载和侧壁摩阻力的影响。弱摩擦桩等 <sup>[37]</sup> 采用光面铝管, 强摩擦采用环氧树脂黏砂粒
	Zheng 等 <sup>[36]</sup>
离心机	1.2 隧道卸荷模拟
	隧道开挖对邻近桩基影响的研究始于 20 世纪 70 年代 Morton 等 <sup>[38]</sup> 所做的模型试验。由于隧道开挖卸荷对邻近桩基的影响涉及到各类参数间的相互耦合影响, 已有理论分析很难对其进行完整的解析 (多为三维问题向二维问题简化解及三维问题半解析解)。因此, 合理采用室内试验对桩基承载性能及桩 - 隧道 - 土体相互作用规律进行模拟是主要手段。国内外学者从小尺度模型和离心机模型等方面做了探索工作, 取得了一些有益观点。

Loganathan 等<sup>[39]</sup>采用西澳大学离心机研究了隧道开挖掘进对单桩、 $2 \times 2$  群桩 (桩间距  $2.5 \text{ m}$ ) 的影响规律, 试验模型缩尺  $1/100$ , 离心加速度  $100g$ 。模拟 3 种试验工况, 隧道中心轴线与地表距离分别为  $15, 18, 21 \text{ m}$ , 桩长  $18 \text{ m}$ , 桩径  $0.8 \text{ m}$ 。

Lee 等<sup>[40]</sup>采用室内小比尺模型结合数字成像技术观测桩 - 土 - 隧道的相互作用现象, 详细介绍了试验过程及试验设备材料, 给出了隧道开挖卸荷的土体影响范围。图 6 为试验过程中的平面二维模型照片及拍摄到的桩基动态响应规律图。

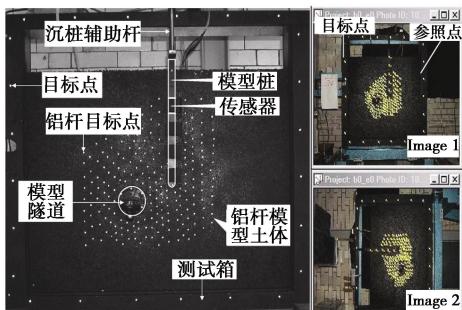
图 6 平面二维试验模型及桩基变形数字成像拍摄<sup>[40]</sup>

Fig. 6 Digital images of 2D test model and pile deformation

Mohamed 等<sup>[41]</sup>同样采用较为精细的室内小比尺试验研究了软黏土中柔性衬砌隧道 - 桩 - 土相互作用问题。重点模拟了隧道的掘进和衬砌支护过程, 考察了邻近桩基与衬砌的相互作用, 测量了桩基与隧道不同距离时衬砌应力与桩身应力的变化规律。如图 7 (a), 隧道衬砌是一个由厚度为  $0.25 \text{ mm}$ , 长  $0.4 \text{ m}$ , 宽  $0.3 \text{ m}$  的铝板围成的圆筒, 铝筒有足够的弹性和刚度去反映“衬砌”的变形。隧道掘进靠油压千斤顶通过螺纹杆顶进一个钢套管模拟旋转开挖掘进, 钢套管外径  $152 \text{ mm}$ , 内径  $150 \text{ mm}$ , 长  $405 \text{ mm}$ 。基于该试验装置, Mohamed 等研究指出, 隧道 - 桩 - 土相互作用强影响范围为桩与隧道侧壁间距小于一倍隧道直径范围, 与 Lee 等<sup>[42]</sup>的研究结论相一致。

孙庆等<sup>[43]</sup>采用离心机试验研究了隧道开挖对邻近桩基受力变形的瞬时和长期影响, 指出隧道开挖引起的桩身最大轴力和弯矩都发生在隧道起拱线附近, 且开挖对桩基造成的长期影响 (流变) 不容忽视。

Ng 等<sup>[44]</sup>则开展了双隧道与邻近桩基相互作用的离心试验研究, 模拟了 3 种情况下干砂中双排隧道对桩的影响: 单隧道在桩底, 双隧道在桩底, 双隧道在桩半腰, 对 3 种条件下的土层沉降及桩身弯矩进行了描述。隧道模型 (见图 7 (b)) 采用装满水的圆柱形橡胶袋, 通过卸掉袋中的水进行每一步的掘进模拟。相邻橡胶袋间设刚性的分节装置, 保证每一节可以独立作业, 且开挖每一步都控制地层损失比为  $1\%$ 。文中指出当双隧道位于桩半腰位置时, 第二隧道开挖对桩身弯矩的影响可以忽略。

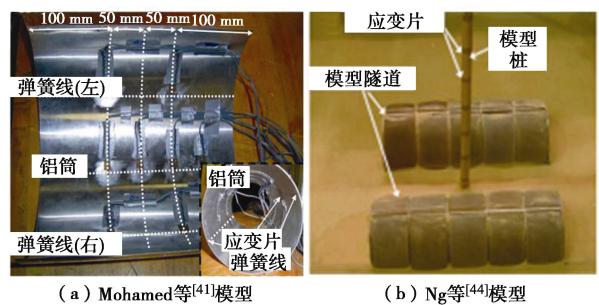


图 7 两种隧道模拟方法

Fig. 7 Two kinds of tunnel simulation methods

马少坤等<sup>[45]</sup>采用离心机试验研究了膨胀土地基双隧道开挖对群桩的承载影响, 指出双隧道共同作用形成的沉降槽可以看作每个独立隧道形成沉降槽的叠加。两个隧道开挖引起的前后桩弯矩规律类似, 最大附加弯矩均出现在拱冠附近。马少坤等<sup>[46]</sup>还进一步研究了地下水位循环变化时隧道开挖卸荷对群桩的长期影响, 得到了桩身长期附加弯矩和附加轴力的变化规律。

其他相关试验研究还有: Ghahremannejad 等<sup>[47]</sup>、Meguid 等<sup>[48]</sup>的 1g 模型试验; Bezuijen 等<sup>[49]</sup>、Hergarden 等<sup>[50]</sup>、Grant 等<sup>[51]</sup>、Ran 等<sup>[52]</sup>、Jacobsz 等<sup>[53-54]</sup>、Chiang 等<sup>[55]</sup>、Ong 等<sup>[56]</sup>的离心机模型试验。表 2 对国内外学者常采用的隧道开挖模拟典型试验方法进行了汇总归纳。

表 2 隧道开挖模拟试验方法

Table 2 Summary of simulation methods for tunnel excavation

试验类型	核心模拟方法	文献来源
离心机	通过一个特殊的、可以调节直径大小的圆形装置模拟隧道的开挖掘进过程	Bezuijen 等 <sup>[49]</sup>
离心机	隧道通过一个内附橡胶模的圆形腔体实现, 圆形腔体内充有压缩空气, 通过卸除高压气体模拟隧道的开挖掘进	Grant 等 <sup>[51]</sup>
离心机	隧道模型采用水袋进行模拟, 通过控制水袋排水量来控制地层损失量	Jacobsz 等 <sup>[53]</sup>
离心机	通过不同规格的气袋来模拟隧道开挖; 气袋内部气压可以调整大小以模拟不同程度的开挖地层损失	Chiang 等 <sup>[54]</sup>
室内 1g 试验	隧道衬砌是一个由厚度为 0.25 mm, 长 0.4 m, 宽 0.3 m 的铝板围成的圆筒, 铝筒有足够的弹性和刚度去反映“衬砌”的应变; 靠油压千斤顶通过螺纹杆顶进一个钢套筒模拟隧道开挖掘进, 钢套管外径 152 mm, 内径 150 mm, 长 405 mm	Mohamed 等 <sup>[41]</sup>
离心机	模型隧道的内部是高密度的聚苯乙烯泡沫, 隧道衬砌由铜箔制成; 模型隧道的内部插入两根管子, 分别用来提供和排出丙酮溶液, 丙酮溶液用来溶解聚苯乙烯泡沫, 继而模拟开挖卸荷	孙庆等 <sup>[43]</sup>
离心机	隧道模型采用装满水的圆柱形橡胶袋, 通过卸掉袋中的水进行每一步的掘进模拟; 相邻橡胶袋间设刚性的分节装置, 保证每一节可以独立作业	Ng 等 <sup>[44]</sup>
室内 1g 试验	模型隧道由 5 节塑料水袋组成, 以模拟五步开挖, 五节水袋用金属框架组装在一起, 用以固定水袋的位置	马少坤等 <sup>[45]</sup>

## 2 开挖卸荷试验装置设计与原理

目前开挖卸荷模型研究总体以离心机试验为主, 离心机成本昂贵, 很多工程设计单位无法开展相关试验, 这就给科学的研究带来了局限。适于常规地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应模拟辅助装置亟待提出。然而存在的问题是, 已有相关文献涉及的基坑模拟装置, 受模型装置高度的限制, 土体卸荷量不够, 无法准确模拟深基坑、超深基坑开挖卸荷效应, 对于基坑侧面开挖效应的模拟也未有合适的方法。

图 8 在为克服已有装置的缺陷下, 研制提出的地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应综合模拟装置。该装置由主箱体和副箱体及配套设备构成, 主箱体尺寸为 1.5 m×0.8 m×1.2 m, 副箱体尺寸为 0.76 m×0.5 m×1.0 m。两个箱体体量适中, 可以在室内自由摆放。

该试验装置的最大特点是采用气压/水压加卸载, 联合主箱顶面加卸载和副箱侧面加卸载实现不同基坑开挖卸荷路径及卸荷工况的模拟。隧道开挖卸荷的模拟则可以仅在主箱体内完成, 模拟方法可参照表 2 中的方法。主箱体侧面还设有水位观测计, 可以监测成层土内不同深度下的水位变化。如图 8, 主、副箱体的顶部设有注气口及气压表、调压阀的安装口, 借助外接气泵通过注气口向箱体内注气, 箱体内部气压的高低由气压表和调压阀联合控制。气压直接作用在水体(或 ZnCl<sub>2</sub> 液体)上进而对土体边界加载, 轻松实现初始地应力状态模拟, 分级或者一次性卸除气压则可以实现开挖卸荷全过程的模拟。

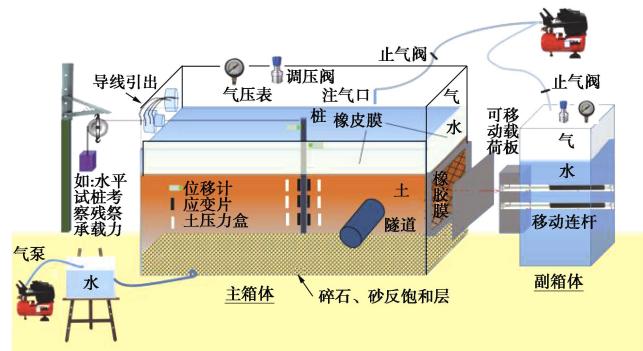


图 8 地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应试验装置

Fig. 8 Schematic diagram of new test apparatus for pile load response simulation undergoing underground excavations

副箱是一个能耐高压的有机玻璃体, 如图 9, 可实现与主箱体开口一侧的吻合对接, 对接一侧为一组可移动的金属载荷板。载荷板共 12 片, 每片载荷板平整黏贴在一张防漏水/气橡胶膜上, 防漏水/气橡胶膜与副箱的有机玻璃板紧密贴合, 使副箱成为一个完全密闭的力学机构。12 片载荷板组成加卸荷模块, 每片载荷板均固定有 2 根移动连杆, 移动连杆一端与载荷板后侧面固定, 一端穿过副箱体的后侧面, 载荷板靠移动连杆在水平方向前后移动。载荷板—移动连杆的水平移动遵循副箱内部的压强高低(外接气泵对水体表面施加气压), 压强增加, 载荷板向前移动, 压强降低, 载荷板水平回缩。在副箱后侧有机玻璃板的背面设置有固定移动连杆水平运动的夹片, 夹片可以同时实现单个载荷板的固定和多个载荷板的同步固定。12 块载荷板可以单独移动, 也可以几块板组合在一起进行工作, 更可以 12 块板整体移动。在实际模拟工况中, 可通过控制夹片松紧来实现 12 块载荷板模块的梯度性、有序性变化, 继而模拟不同路径(不同开挖深度、开挖宽度、不同位移模式等)的基坑开挖卸荷。每片载荷板上可黏贴薄膜式压力传感器, 可实时测量载荷板与主箱侧向土体接触面的接触应力, 实现对土体侧向

加卸载边界的有效控制，配合 PIV 技术对卸荷土体变形场进行可视化描述。另外，本模型试验在材料选型上要充分遵循相似比关系（例如模型桩与原型桩之间关系）。图 10 为主副箱体气密性、水密性现场检验情况，现场测试结果表明该试验装置最大注气可达 2~3 个大气压，可以模拟超深基坑（深度大于 10 m）的开挖卸荷状态。本试验装置亦可实现土体堆载、开挖联合降水、土体流动侧移等对桩基影响的物理模拟。

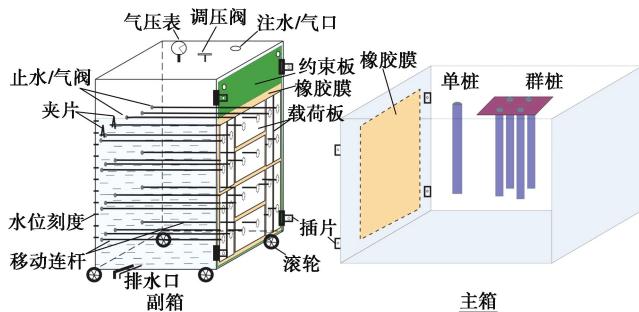


图 9 副箱体结构及工作原理

Fig. 9 Structure and working principle of auxiliary box



图 10 试验装置气/水密封性情况现场检验

Fig. 10 Field photos of air and water seal tests

### 3 试验结果讨论

采用上述模型试验装置，分别开展了案例一：邻近基坑开挖卸荷后桩基水平承载力损失程度和案例二工程阻隔物对地下水阻挡作用影响相关室内模型试验研究。限于篇幅，具体模拟过程不作展开。

#### 3.1 案例一

本文试验装置主-副箱拼接后，副箱 12 块载荷板通过联动机制可以实现不同层次的侧向卸荷作用。本试验通过控制 12 块载荷板的卸荷顺序实现不同基坑开挖深度对桩基水平承载的影响研究，得到了既有桩基在邻近基坑开挖卸荷不同深度条件下的水平承载力损失程度。试验中，土体为淤泥质粉质黏土，塑性指数 18.7；模型桩材质为 UPVC 桩，桩长 1000 mm，有效入土深度 700 mm，直径为 32 mm，壁厚 3 mm。

图 11 (a), (b) 分别为试验得到的基坑开挖深度

一半和全挖深情况下的水平承载力对比结果。图 11 (a) 显示，基坑开挖一半深度（对应 12 块载荷板的上部 6 块板卸荷）后，桩基水平承载力发生明显的衰减，桩顶试桩加载-位移曲线刚度较未开挖时减小，开挖卸荷后桩基临界水平承载力降低约 40%。实际桩基工程设计阶段必须充分考虑后期邻近基坑开挖卸荷对既有建筑桩基水平承载力的影响，给出设计富余。

图 11 (b) 为全挖深（对应 12 块载荷板全部卸荷）情况下，考虑不同加载方向的试桩水平承载力对比结果。图中 #3 桩桩顶加载方向为背离基坑开挖侧，#4 桩桩顶加载方向为指向基坑开挖侧。研究结果表明：基坑全挖深后，桩基水平承载力 (#4 桩) 较挖深一半时桩基承载力 (#1 桩) 进一步降低，临界水平承载力较自由场地（未开挖 #2 桩）降低约 70%。同时注意到，当桩顶水平加载方向为背离基坑开挖侧时 (#3 桩)，桩基水平承载力降低并不明显。因此，实际桩基工程设计阶段应充分考虑桩基真实受力方向或后期可能的开挖卸荷方向，进而给出合理的桩基水平承载力设计值。

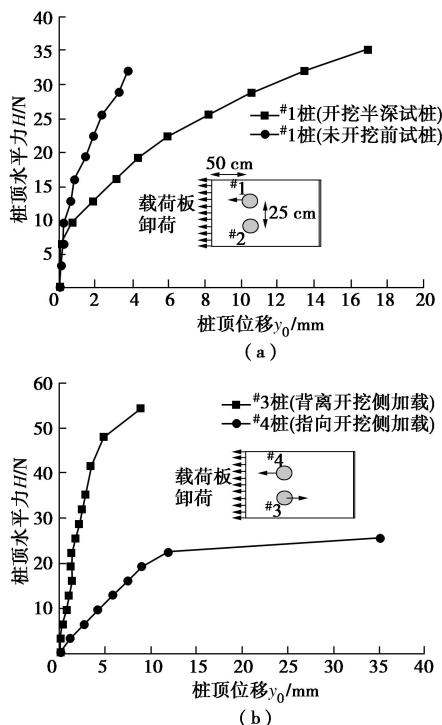


图 11 侧向基坑卸荷致使桩基水平承载力损失程度对比

Fig. 11 Losses of lateral pile capacity subjected to adjacent excavation unloading

#### 3.2 案例二

本试验装置的主箱体还可以作为独立箱体开展多种工程问题研究。本文采用主箱体开展了不同含水层类型（潜水和承压水）中，工程阻隔物对地下水流动的阻挡作用研究。试验用砂土模拟潜水含水层，砂土

上覆 100 mm 厚黏土共同模拟承压含水层。其中, 砂土和黏土之间铺设土工布, 土工布上方设置普通塑料纸, 下侧铺设双层塑料薄膜, 具体参见文献[57]。

图 12 为模型试验和数值分析得到的不同含水层中阻隔物对地下水阻挡作用的影响规律。图中, 量纲为“1”阻挡作用  $S_{BD}$  的定义为  $(\Delta h_B - \Delta h_N)/(ai_N) \approx (\Delta h_B - \Delta h_N)/\Delta h_N^{[57]}$ , 其中  $a$  为阻隔物厚度,  $i_N$  为天然水力梯度。

由图 12 可知, 模型试验结果与数值模拟结果基本保持一致。研究结果显示: 随着阻隔物插入比的增大, 阻挡作用逐渐加强, 量纲为“1”阻挡作用  $S_{BD}$  曲线上升, 逐渐趋缓, 并在插入比约为 0.4 时,  $S_{BD}$  升至 1。曲线的凹凸性有两个较为明显的拐点, 分别为插入比约为 0.2~0.3 和 0.7~0.8。即当插入比  $< 0.2~0.3$  时, 未能形成有效的隔水边界, 阻隔物对渗流场的影响基本可以忽略; 当插入比  $> 0.7~0.8$  时, 阻隔物能够形成有效的隔水边界, 其对渗流场具有明显的阻挡效应。

同时发现, 含水层类型对阻挡作用也有影响, 阻隔物在潜水中的阻挡作用小于承压水中的阻挡作用, 但二者趋势基本一致。随着插入比的增大, 阻挡作用受含水层类型的影响逐渐增大, 当插入比  $< 0.7$  时, 潜水层阻挡作用  $S_{BD}$  值较承压水层  $S_{BD}$  值略小 10%, 当  $0.7 \leqslant$  插入比  $< 0.9$  时小 20% 左右, 当插入比大于 0.9 时小 70%。工程实际中, 应该重视不同含水层类型下的阻挡作用差异性特征, 进而合理地开展工程设计。

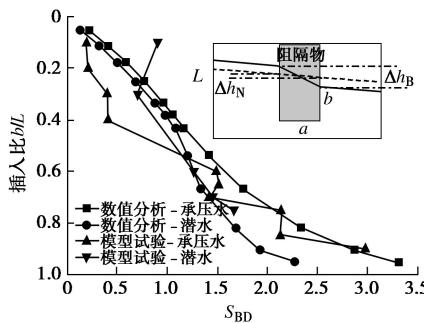


图 12 不同含水层类型下阻隔物对地下水阻挡作用

Fig. 12 Barrier effects on flow of groundwater in various aquifer layers

## 4 结论与展望

随着城市化进程的加快, 地下空间开挖卸荷问题变得越来越突出, 地下工程近接施工带来的既有桩基承载安全性和服役稳定性问题更加严峻。目前国内外在地下工程开挖卸荷模拟装置特别是小比尺试验装置研发及模拟手段上暴露出了不足, 也限制了卸荷桩相关科学的研究。本文从物理模拟试验装置入手, 强调地下工程开挖卸荷模拟的重要性, 对比分析了国内外相

关试验装置的特点, 设计提出了新的地下工程开挖卸荷综合模拟试验装置, 开展了邻近基坑开挖对既有工程桩水平承载力影响及工程阻隔物对地下水阻挡作用影响两类问题研究。同时, 鉴于地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应问题的复杂性, 今后应加强以下 4 个方面的研究。

(1) 地下工程开挖卸荷对桩基影响计算手段多为数值方法, 应加强基础试验的研究, 开展室内辅助小尺度试验或者条件允许时开展原型观测试验。

(2) 有关土体运动致桩基被动受荷目前多采用复杂的有限元、边界元或两阶段方法, 理论方法积累较少, 需进一步发展有效实用的简化计算方法。

(3) 加强卸荷土体的现场原位测试技术 (CPTU/DMT 等) 研究, 建立卸荷土体原位测试参数与桩基承载性能间的关系, 提出基于原位测试参数的地下工程开挖卸荷桩基承载力损失快速预测方法, 为工程设计提供依据。

(4) 关注特殊开挖环境下的既有桩基承载安全稳定性, 对诸如“坑中坑”开挖, 地下增层开挖, 交叉隧道穿越等新问题亟待提供针对性分析方法和安全控制技术。

## 参考文献:

- [1] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, THURAIRAJAH A. Yielding of clays in states wetter than critical[J]. Géotechnique, 1963, **13**(3): 211~240.
- [2] YIN Z Y, CHANG C S. Stress-dilatancy behavior for sand under loading and unloading conditions[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, **37**(8): 855~870.
- [3] 刘国彬, 贾付波. 基坑回弹时间效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 1): 3040~3044. (LIU Guo-bin, JIA Fu-bo. Test research on time effect of foundation pit rebound[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S1): 3040~3044. (in Chinese))
- [4] 贾 坚, 谢小林. 上海软土地区深大基坑的卸荷变形及控制[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊 1): 376~380. (JIA Jian, XIE Xiao-lin. Deformation and control measures of deep and large excavation in Shanghai soft clay area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S1): 376~380. (in Chinese))
- [5] OU C, HSIEH P, CHIOU D. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, **30**(5): 758~767.

- [6] CUI Y, KISHIDA K, KIMURA M. Prevention of the ground subsidence by using the foot reinforcement side pile during the shallow overburden tunnel excavation in unconsolidated ground[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, **63**: 194 – 204.
- [7] 黄茂松, 王卫东, 郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. *土木工程学报*, 2012, **45**(6): 146 – 161. (HUANG Mao-song, WANG Wei-dong, ZHENG Gang. A review of recent advances in the underground engineering and deep excavations in soft soils[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, **45**(6): 146 – 161. (in Chinese))
- [8] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. *土木工程学报*, 2016, **49**(6): 1 – 24. (ZHENG Gang, ZHU He-hua, LIU Xin-rong, et al. Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, **49** (6): 1 – 24. (in Chinese))
- [9] GOH A, WONG K S, TEH C I, et al. Pile response adjacent to braced excavation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(4): 383 – 386.
- [10] ONG D E L, LEUNG C F, CHOW Y K. Time-dependent pile behaviour due to excavation-induced soil movement in clay[C]// Proc 12th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Massachusetts Institute of Technology. Boston, 2003.
- [11] LEUNG C F, LIM J K, CHOW Y K. Behaviour of pile due to excavation-induced soil movement in clay[C]// 15th Int Conf on Soil Mech and Geotechnical Engineering. Istanbul, 2001.
- [12] POULOS H G, CHEN L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(2): 94 – 99.
- [13] NG C W W, HONG Y, SOOMRO M A. Effects of piggyback twin tunnelling on a pile group: 3D centrifuge tests and numerical modelling[J]. *Géotechnique*, 2015, **65**(1): 38 – 51.
- [14] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, **124**(9): 846 – 856.
- [15] CHEN L T, POULOS H G, LOGANATHAN N. Pile responses caused by tunneling[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, **125**(3): 207 – 215.
- [16] 杨敏, 靳军伟. 桩基础与既有地铁隧道相互影响的研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2016, **37**(8): 90 – 100. (YANG Min, JIN Jun-wei. Research progress on interaction of pile foundation with nearby existing subway tunnel[J]. *Journal of Building Structure*, 2016, **37**(8): 90 – 100. (in Chinese))
- [17] 郑俊杰, 章荣军, 潘玉涛, 等. 考虑开挖卸荷及变形耦合效应的被动桩分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(4): 606 – 614. (ZHENG Jun-jie, ZHANG Rong-jun, PAN Yu-tao, et al. Analytic method for passive piles considering excavation- induced unloading effects and deformation coupling effect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(4): 606 – 614. (in Chinese))
- [18] 张治国, 徐晨, 宫剑飞. 考虑桩侧土体三维效应和地基剪切变形的隧道开挖对邻近桩基影响分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(5): 846 – 856. (ZHANG Zhi-guo, XU Chen, GONG Jian-fei. Influence of tunneling on deflection of adjacent piles considering shearing deformation of foundation and 3D effects of lateral soils beside piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(5): 846 – 856. (in Chinese))
- [19] 龚晓南, 王继成, 伍程杰. 深基坑开挖卸荷对既有桩基侧摩阻力影响分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, **41**(6): 70 – 76. (GONG Xiao-nan, WANG Ji-cheng, WU Cheng-jie. Effect of unloading on the shaft resistance of existing piles due to deep excavation[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2014, **41**(6): 70 – 76.(in Chinese))
- [20] 胡琦, 凌道盛, 陈云敏, 等. 深基坑开挖对坑内基桩受力特性的影响分析[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(7): 1965 – 1970. (HU Qi, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min, et al. Study of loading characters of pile foundation due to unloading of deep foundation pit excavation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(7): 1965 – 1970. (in Chinese))
- [21] 陈锦剑, 吴琼, 王建华, 等. 开挖卸荷条件下单桩承载力特性的模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(增刊2): 97 – 100. (CHEN Jin-jian, WU Qiong, WANG Jian-hua, et al. Model tests on bearing capacity of single pile influenced by excavation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(S2): 97 – 100. (in Chinese))
- [22] 杨敏, 逯建栋. 深开挖基坑回弹引起的坑中桩受力与位移计算[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, **38**(12): 1730 – 1735. (YANG Min, LU Jian-dong. A calculation of behavior of underpinning pile subjected to excavation of deep foundation pit[J]. *Journal of Tongji University (natural science)*, 2010, **38**(12): 1730 – 1735. (in Chinese))
- [23] CHEN L T, POULOS H G, HULL T S. Model tests on pile

- groups subjected to lateral soil movement[J]. Soils and Foundations, 1997, **37**(1): 1 - 12.
- [24] PAN J L, GOH A, WONG K S, et al. Ultimate soil pressures for piles subjected to lateral soil movements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(6): 530 - 535.
- [25] GUO W D, GHEE E H. Model tests on single piles in sand due to soil movement[C]// Proc 18th Australasian Conf on the Mechanics of Structures and Materials. London, 2004: 997 - 1003.
- [26] 陈锦剑, 王建华, 范巍, 等. 抗拔桩在大面积深开挖过程中的受力特性分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 402 - 407. (CHEN Jin-jian, WANG Jian-hua, FAN Wei, et al. Behavior of up-lift pile foundation during large-scale deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 402 - 407. (in Chinese))
- [27] LYNDON A, SCHOFIELD A N. Centrifugal model test of a short-term failure in London clay[J]. Geotechnique, 1970, **20**(4): 440 - 442.
- [28] BOLTON M D, POWRIE W. The collapse of diaphragm walls retaining clay[J]. Géotechnique, 1987, **37**(3): 335 - 353.
- [29] BOLTON M D, POWRIE W. Behaviour of diaphragm walls in clay prior to collapse[J]. Géotechnique, 1988, **38**(2): 167 - 189.
- [30] KIMURA T, TAKEMURA J, HIRO-OKA A, et al. Excavation in soft clay using in-flight excavator[C]// Proc Int Conf Centrifuge 94. Singapore, 1994.
- [31] LOH C K, TAN T S, LEE F H. Three-dimensional excavation tests in the centrifuge[C]// Proc Int Conf Centrifuge 98. Rotterdam, 1998.
- [32] LEUNG C F, CHOW Y K, SHEN R F. Behavior of pile subject to excavation-induced soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(11): 947 - 954.
- [33] LEUNG C F, LIM J K, SHEN R F, et al. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(1): 58 - 65.
- [34] ONG D E, LEUNG C E, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay I: stable wall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(1): 36 - 44.
- [35] LEUNG C F, ONG D E, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. II: Collapsed wall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(1): 45 - 53.
- [36] ONG D, LEUNG C F, CHOW Y K. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement in very soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(10): 1462 - 1474.
- [37] ZHENG G, PENG S Y, NG C W, et al. Excavation effects on pile behaviour and capacity[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(12): 1347 - 1356.
- [38] MORTON J D, KING K H. Effects of tunneling on the bearing capacity and settlement of piled foundations[C]// Proc Tunneling 79, IMM. London, 1979.
- [39] LOGANATHAN N, POULOS H G, STEWART D P. Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations[J]. Géotechnique, 2000, **50**(3): 283 - 294.
- [40] LEE Y, BASSETT R H. Influence zones for 2D pile-soil-tunnelling interaction based on model test and numerical analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, **22**(3): 325 - 342.
- [41] MEGUID M A, MATTAR J. Investigation of tunnel-soil-pile interaction in cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(7): 973 - 979.
- [42] LEE G T, NG C W. Effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(2): 193 - 201.
- [43] 孙庆, 杨敏, 冉侠, 等. 隧道开挖对周围土体及桩基影响的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, **39**(7): 989 - 993. (SUN Qing, YANG Min, RAN Xia, et al. Test study on tunneling-induced soil movement and pile responses[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, **39**(7): 989 - 993. (in Chinese))
- [44] NG C W W, LU H, 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.
- [45] 马少坤, WONG K S, 吕虎, 等. 膨胀土地基中隧道施工对群桩影响研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(11): 3055 - 3060. (MA Shao-kun, WONG K S, LÜ Hu, et al. Study of effects of tunnel construction on pile group in expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(11): 3055 - 3060. (in Chinese))
- [46] 马少坤, 邵羽, 吕虎, 等. 地下水位循环变化时隧道开挖对群桩的长期影响研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(6): 1563 - 1568. (MA Shao-kun, SHAO Yu, LÜ Hu, et al. A

- study of the long-term influence of twin tunneling on the existing pile group under cyclic variation of groundwater level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1563 – 1568. (in Chinese))
- [47] GHAREMANNEJAD B, SURJADINATA J, POON B, et al. Effects of tunneling on model pile foundations[C]// Proc 6th Int Conf on Physical Modelling in Geotechnics. Leiden, 2006.
- [48] MEGUID M A, MATTAR J. Investigation of tunnel-soil-pile interaction in cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(7): 973 – 979.
- [49] BEZUIJEN A, Van der SCHRIER J. The influence of a bored tunnel on pile foundations[C]// Proc Int conf Centrifuge 94. Singapore, 1994.
- [50] HERGARDEN H, Der POEL I, Van der SCHIIR J S. Ground movements due to tunneling: Influence on pile foundations[C]// Proc Int Symp on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London, 1996.
- [51] GRANT R J, TAYLOR R N. Centrifuge modelling of ground movements due to tunnelling in layered ground[C]// Proc of the Int Symp on Geotech Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Mair, 1996.
- [52] RAN X, LEUNG C F, CHOW Y K. Centrifuge modelling of tunnel-pile interaction in clay[C]// Proceedings of Underground Singapore. Singapore, 2003: 256 – 263.
- [53] JACOBSZ S W. The effects of tunnelling on piled foundations[R]. London: University of Cambridge, 2003.
- [54] JACOBSZ S W, STANDING JR, MAIR R J, et al. Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 49 – 56.
- [55] CHIANG K, LEE C. Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(10): 1224 – 1241.
- [56] ONG C W. Centrifuge model study of tunnel-soil-pile interaction in soft clay[M]. Singapore: National University of Singapore, 2009.
- [57] 张明飞. 地下水位变动诱发地铁隧道变形机理及其与地铁隧道相互影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. (ZHANG Ming-fei. Deformation mechanism of subway tunnel induced by groundwater level variation and its interaction with tunnel[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

《岩土工程学报》编辑部