

DOI: 10.11779/CJGE202103009

基于临近桩基保护要求的基坑变形控制指标研究

木林隆^{1,2}, 朱孟玺^{1,2}, 黄茂松^{1,2}, 康景文³, 纪智超³, 余行⁴

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610000; 4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 基坑开挖对临近桩基的保护一直是基坑工程的难题之一, 控制围护墙变形是防止临近桩基破坏的最主要措施, 而目前对于围护墙的变形控制标准主要是来源于统计结果, 并不能反映临近桩基的变形承受能力。通过基于位移控制的基坑开挖对临近桩基础影响两阶段分析方法, 建立基坑围护墙变形与桩基变形的关系, 并进一步通过对基坑与桩基的主要相关参数分析提出了变形影响因子。在此基础上, 基于临近桩基础角变形控制要求, 提出了基坑围护墙最大水平变形的控制指标与经济指标。

关键词: 基坑开挖; 允许变形; 桩基保护; 控制标准

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)03-0465-06

作者简介: 木林隆(1984—), 男, 副教授, 主要从事深基础与地下工程开挖方面的研究工作。E-mail: mulinlong@tongji.edu.cn。

Control criteria for deformation of foundation pits based on protection requirements of adjacent pile foundations

MU Lin-long^{1,2}, ZHU Meng-xi^{1,2}, HUANG Mao-song^{1,2}, KANG Jing-wen³, JI Zhi-chao³, YU Xing⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The protection of adjacent pile foundations is always a key concern of the foundation pit engineering in urban areas. Controlling the deformation of the retaining wall is the most effective way to prevent the damage of the adjacent pile foundations induced by the excavation. Lack of control criteria for deformation of retaining wall of an excavation usually leads to difficulties for engineers to design the support system for the excavation near the existing pile foundations. The current deformation control criteria for the retaining wall come from the statistics derived from the measured results, which cannot reflect the real deformation bearing capacity of the existing pile foundations. In this study, a two-stage analysis method is proposed to calculate the impact of an excavation on the adjacent piled raft foundation. The relationship between the deformation of the retaining wall and the deformation of the pile foundations is investigated. A deformation impact factor is proposed through a series of parametric study taking account of the dimensions of the foundation pit and pile foundations. Based on the deformation control requirements of the adjacent pile foundations, the control and economic criteria of the deformation of the retaining wall are proposed.

Key words: excavation of foundation pit; allowable deformation; protection of pile foundation; control criterion

0 引言

随着城市化建设的发展, 地面空间越来越匮乏, 中国进入了地下空间大开发的时代, 越来越多的基坑工程在建筑密集区开挖, 临近基坑建筑的保护成了基坑工程设计分析的重点^[1-3]。在软土城市地区, 大多数建筑均由桩基支承, 保护基坑临近深基础支承的建筑就需要对基坑开挖诱发的桩基变形进行控制。控制围

护墙变形可以有效地控制临近桩基变形, 制定基于临近桩基保护要求的基坑变形控制标准对基坑设计具有重大意义。

目前对于围护墙的变形控制标准主要是基于大量工程的实测结果统计而来^[4-5], 其仅代表在该变形状态

基金项目: 国家自然科学基金项目(51738010); 国家重点研发计划项目(2016YFC0800200); 上海市启明星计划项目(19QC1400500)
收稿日期: 2020-07-01

表 1 建筑物与地基类型组合的允许角变形

Table 1 Allowable angular distortion for different combinations of building and foundation types					
建筑物/地基类型	基坑工程技术规范 ^[5]	地基基础设计标准 ^[25]	Skempton 等 ^[26]	Finno 等 ^[27]	欧章煜等 ^[28]
砌体结构/条形基础	0.007	0.004	1/300	NA	1/2500
框架结构/独立基础	0.003	0.003	1/300	1/1000	1/500
框架结构/筏板基础	0.004	0.004	1/300	1/1000	1/500
框架结构/桩基	0.004	0.003~0.004	NA	1/1000	NA
高层建筑 HB* < 100 m	0.002~0.004	0.002~0.004	NA	NA	NA
桩基础 HB > 100 m	0.001~0.002	0.001~0.002	NA	NA	NA
塔楼 HB < 100 m	0.005~0.008	0.005~0.008	NA	NA	NA
桩基础 HB > 100 m	0.002~0.004	0.002~0.004	NA	NA	NA

*注：HB为建筑高度。

下基坑与临近建筑处于安全状态，并不能真正体现临近桩基的变形承受能力。要实现基于临近桩基的变形承受能力的控制标准，首先需要通过评估基坑开挖对临近桩基础的影响建立基坑围护墙变形与桩基变形的关系。由于基坑及临近桩相互作用及系统变形的复杂性，目前评估基坑开挖对临近桩基的影响主要采用有限元方法^[6-9]。有限元分析能够考虑复杂的土体特性、几何特性及工况，然而其计算准确性往往依赖于输入土体模型参数^[10-11]。大量的研究表明，地质勘察报告推荐土体参数需进行修正才能使有限元计算结果与实测结果相对较为吻合^[12-13]。而对土体参数修正需要具备丰富的经验和较为复杂的技术，对设计施工单位而言有较高难度，需要一种简单的方法去估计基坑开挖对邻近建筑物的影响^[14-16]。国内外学者通过大量的试验研究提出了一些估算基坑开挖引起的围护墙及临近建筑变形的经验方法^[17-22]。然而，这些方法往往仅能计算围护墙、地表沉降及浅基础建筑的变形，无法分析基坑开挖对深基础的影响。张爱军等^[23]和木林隆等^[24]提出了基坑开挖对临近桩基础影响的两阶段分析方法，基坑开挖对临近桩基的影响具备了较为快速的分析方法。然而，这些方法均未对基于桩筏基础保护要求的基坑变形控制指标进行研究。

本文采用木林隆等^[24]提出的考虑土体小应变特性的基坑开挖诱发临近桩筏基础变形的分析方法，通过参数分析建立基坑围护墙变形与桩基变形的对应关系。基于临近桩筏最大允许变形，提出了基坑围护墙水平变形的控制指标。

1 桩筏基础允许变形

许多学者对建筑及基础的允许变形值进行了统计，如表 1 所示。建筑变形由其角变形控制，桩筏允许变形由上部结构允许变形决定，因而桩筏基础变形的关键参量为其转角或局部转角。在下文分析中，主

要分析基坑开挖诱发的临近桩筏基础角变形。

2 分析模型

本文采用木林隆等^[24]提出的基坑开挖对临近桩筏基础影响的两阶段分析方法进行分析，如图1所示。该方法考虑了土体的小应变特性，具有相对较为准确的分析精度和较快的分析速度，同时该方法具备可以分析分层地基中桩筏、群桩等优点，因此适合进行大规模的参数分析。该方法为位移控制方法，其位移输入边界条件为围护墙最大水平位移 u_{max} ，同时假设支护结构的刚度仅影响围护墙最大水平位移。分析结果可得到桩筏基础（完全刚性筏板）、高承台群桩及无承台群桩（完全柔性筏板）的角变形 δ （其中无承台群桩的角变形由前桩及后桩的沉降差得到），由此建立围护墙最大水平位移和桩基变形的“一一对应”关系。

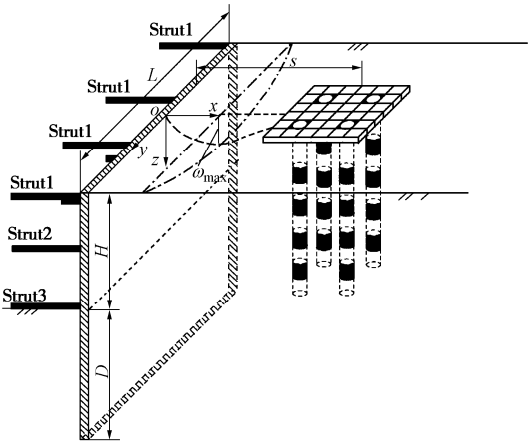


图 1 基坑诱发桩筏变形分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pile-raft deformation analysis induced by foundation pit

第一阶段，由公式（1）和（2）计算基坑开挖引起的土体自由场位移：

$$u(x,y,z) = u_{max} a_x e^{-\left(\frac{3z-3H}{H+D}\right)^2 - \pi\left(\frac{y}{R}\right)^2 - \left(\frac{x/z-b_z}{c_x}\right)^2} \quad , \quad (1)$$

$$w(x,y,z)=\begin{cases}0.8u_{\max}a_z\left(\frac{x}{H}+0.5\right)e^{-\pi\left(\frac{y}{R}\right)^2-\left(\frac{z/x-b_z}{c_z}\right)^2}&(0\leq x\leq 0.5H)\\0.8u_{\max}a_z\left(-0.6\frac{x}{H}+1.3\right)e^{-\pi\left(\frac{y}{R}\right)^2-\left(\frac{z/x-b_z}{c_z}\right)^2}&(0.5H\leq x\leq 2H)\\0.8u_{\max}a_z\left(-0.05\frac{x}{H}+0.2\right)e^{-\pi\left(\frac{y}{R}\right)^2-\left(\frac{z/x-b_z}{c_z}\right)^2}&(2H\leq x\leq 4H)\end{cases}\quad (2)$$

式中 $u_{\max}$ 为挡土墙的最大横向挠度; $u(x,y,z)$ 和 $w(x,y,z)$ 分别为垂直于挡土墙平面内的水平和垂直土体位移; x,y,z 为图1中定义的笛卡尔坐标; $R=L[0.069\ln(H/L)+1.03]/2$ 为等效开挖长度; H,L,D 分别为开挖深度、挡土墙长度、埋深(见图1)。系数 a_x,a_z,b_x,b_z,c_x 和 c_z 为土体空间坐标和开挖深度的函数:

$$a_x=1+e^{-10.47\frac{z}{H}+0.76},\quad (3)$$

$$b_x=e^{-6.45\frac{z}{H}+2.76},\quad (4)$$

$$c_x=e^{-2.86\frac{z}{H}+2.64},\quad (5)$$

$$a_z=1+e^{-1.56\frac{x}{H}-1.68},\quad (6)$$

$$b_z=e^{-2.56\frac{x}{H}+1.02},\quad (7)$$

$$c_z=e^{-2.09\frac{x}{H}+1.75}。$$

在第二阶段,将土体位移作为虚拟荷载施加于桩筏基础上,建立桩筏基础平衡分析方程,求解桩筏基础的响应:

$$\begin{Bmatrix}E\\F\\0\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}A&B&-J^T\\C&D&R\\J&I&0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}P\\N\\EE\end{Bmatrix}。$$

式中 E 和 F 为桩土单元的被动位移矩阵; EE 为桩顶主动位移矩阵; A,B,C 和 D 为桩-桩,桩-土,土-土相互作用矩阵; P 和 N 分别为桩-筏、土-筏相互作用内力矩阵。矩阵具体形式可参见木林隆等^[24]。由于该分析方法仅能分析基坑开挖对临近刚性桩筏基础的影响,而实际桩筏基础筏板为弹性状态,因此本文采用计算基坑开挖对临近刚性桩筏基础、完全柔性桩筏基础(即无承台群桩)以及高承台群桩基础的影响来覆盖不同刚度的桩筏基础响应。该分析方法通过约束 P 和 N 的取值,可分别计算桩筏、高承台群桩及无约束群桩等基础的响应。如, $P\neq 0$ 及 $N\neq 0$ 为桩筏, $P\neq 0$ 及 $N=0$ 为高承台群桩, $P=0$ 及 $N=0$ 为无约束群桩基础。

3 方法验证

Mu 等^[29]采用有限元方法和简化方法分析了图 2 所示工况下基坑开挖诱发的桩基内力和变形,验证了

该方法计算基坑开挖诱发的桩基内力和变形的能力。针对该工况,本文计算了基础顶部角变形。土体参数可见 Mu 等^[29]。计算结果如表 2 所示,可见简化计算模型对基础顶部的角变形计算结果与有限元结果非常接近,采用该简化计算模型计算桩基角变形合理可行。

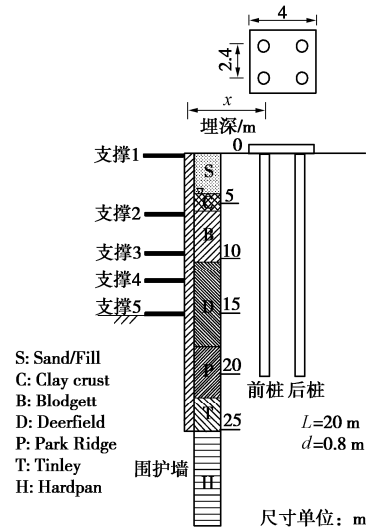


图 2 基坑对临近桩筏基础影响分析工况

Fig. 2 Synthetic case study of response of piled-raft adjacent to a braced excavation

表 2 桩顶角变形

Table 2 Calculated angular distortion		
桩型	有限元	本文方法
群桩	0.002	0.0019
桩筏	0.0018	0.0017

4 影响因素分析

根据分析方法相关输入参数及设计中对基坑诱发临近桩筏基础变形控制的关键设计参数,本文着重分析:开挖深度 H (m)、基坑长度 L (m)、土体弹性模量 E_s (MPa)、桩弹性模量 E_p (MPa)、桩长 l (m)、桩径 d (m)、开挖距离 s (m)、桩间距 s_0 (m) 对基坑变形及桩筏基础变形对应关系的影响。

模型的基本参数如表 3 所示,在此基础上分别设置分析参数的数值为基准参数的 0.5, 1, 2 和 4 倍进行参数分析。如,针对土体模量进行参数分析时,围护墙最大水平位移与桩基角变形的关系如图 3 所示。可见,随着围护墙最大水平位移的增加,桩基角变形增加。同时随着土体弹性模量的增加,桩筏基础角变形随着基坑最大水平位移增加的速度增加。经归一化如图 4 (a) 所示,随着土体模量的增加,桩筏基础、高承台群桩角变形随围护墙最大水平位移增加的速率增加,而无约束群桩的角变形随围护墙最大水平位移增加的速率减小。

表 3 参数研究中的基准参数

Table 3 Baseline parameters in parametric study

参数	开挖深度 H/m	埋深 D/m	基坑长度 L/m	土体弹性模 量 E_s/MPa	土体泊 松比 ν_s	桩弹性模 量 E_p/GPa	桩泊松 比 ν_p	桩长 l/m	桩径 d/m	开挖距 离 s/m	桩间距 s_0/m
取值	10	10	40	24	0.5	30	0.167	25	0.8	3.2	2.4

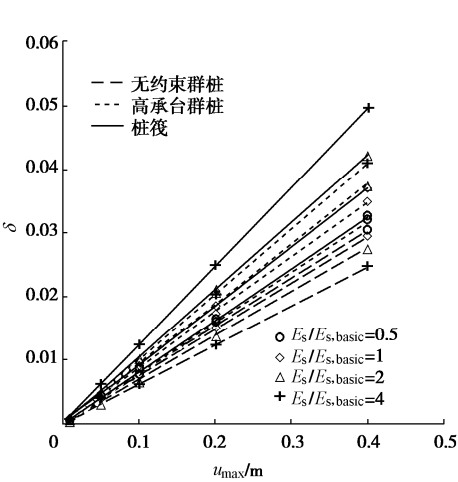


图 3 土体模量对 $u_{max} - \delta$ 关系影响

Fig. 3 Influences of soil modulus on $u_{max} - \delta$ relation

同理，对其余参数进行计算，并进行归一化，可得到各参数对 $u_{max} - \delta$ 关系的影响曲线（图 4）。如图所示，归一化桩基角变形随桩体模量、桩长的增大而减小，随着建筑基础与开挖距离的减小而减小。相比之下，当土体较硬或开挖深度、长度较大时，角变形变大。由于复杂的土 - 结构相互作用，上述一般规则也有例外。例如，当土体刚度变小（见图 4（a））或桩体刚度变大（见图 4（b））时，对应于无约束群桩的角变形增加。这是因为与桩筏基础相比，无约束群桩中的桩可以独立地变形，周围土体相对于桩的刚度减小时将减弱土体对桩基的支承作用，使桩与桩之间的不均匀沉降更接近与相应位置的土体沉降，而使桩桩不均匀沉降增加。同时可以发现，桩间距及桩围护墙距离对群桩的角变形影响要比对桩筏基础的角变形影响显著；而其余因素对于桩筏基础的变形影响较群桩基础更为显著。

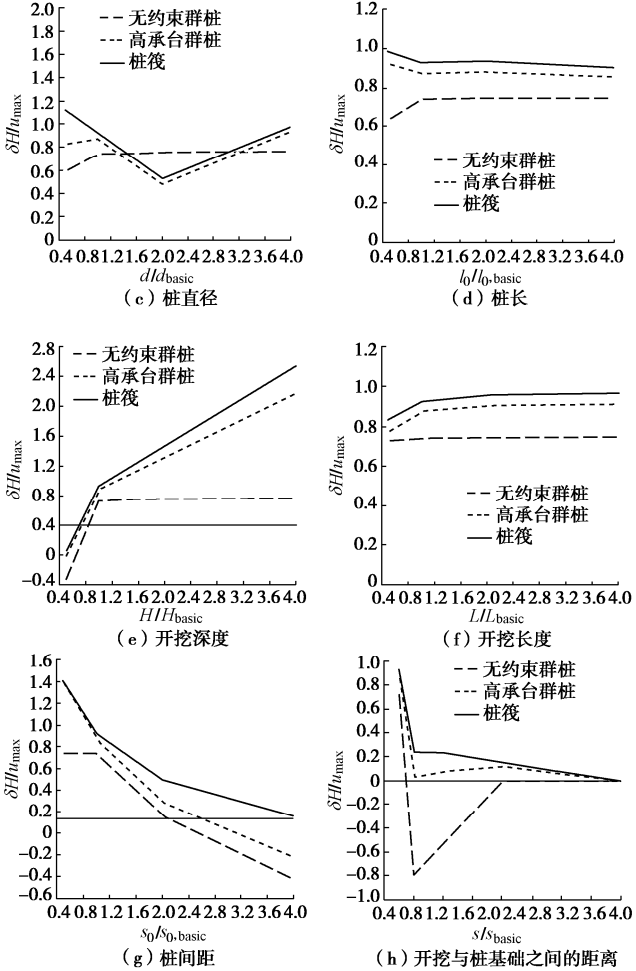


图 4 归一化角变形的变化

Fig. 4 Variation of normalized angular distortion

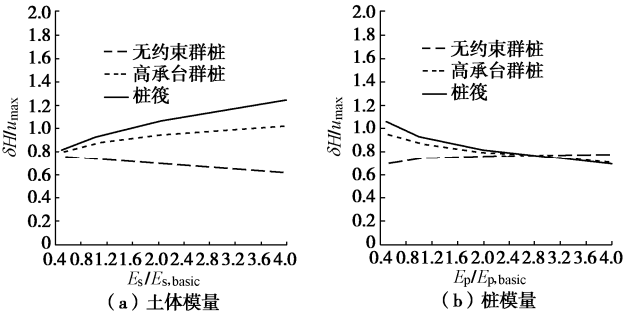
5 围护墙变形控制标准

基于图4所示影响规律，对基坑诱发桩基变形的主要因素（开挖深度 H 和长度 L 、土体弹性模量 E_s 和桩 E_p 、桩长 L 、直径 d 、间距 s_0 和与开挖距离 s ）进行归一化，得到变形影响因子：

$$I_f = \frac{E_p d l s_0 s^2}{E_s L H^4} \quad (10)$$

变形影响因子与归一化的桩基角变形的关系，如图5所示。可见，本文分析的165个案例的数据均在一个区域内，其相应的上下边界的方程为

$$\left| \frac{\delta H}{u_{max}} \right| = -\frac{3}{5} \lg(I_f) + \frac{2}{5} \quad (11)$$



$$\left| \frac{\delta H}{u_{\max}} \right| = -\frac{3}{5} \lg(I_f) + \frac{3}{2} \quad (12)$$

由此可见, 当桩筏基础的允许变形 ($\delta_{\text{allowable}}$) 已知时, 基坑围护墙的允许水平位移 ($u_{\text{allowable}}$) 最大值由下边界确定, 设计变形值需小于等于下边界计算值。而上边界则确定了基坑围护墙的允许水平位移的最小值。由于变形控制的越小, 对临近桩筏基础的影响越小, 因此该上边界非严格控制指标, 而变形值大于上边界规定的值时可以充分利用临近桩筏基础的允许变形。一般而言允许变形值越大造价相对越低, 从而达到节约造价的目的, 因此可以定义此上边界为经济控制指标。因此, 基坑围护墙允许水平位移的控制范围可由下式确定:

$$u_a = \left(\frac{H}{-\frac{3}{5} \lg(I_f) + \frac{3}{2}} \sim \frac{H}{-\frac{3}{5} \lg(I_f) + \frac{2}{5}} \right) \delta_a \quad (13)$$

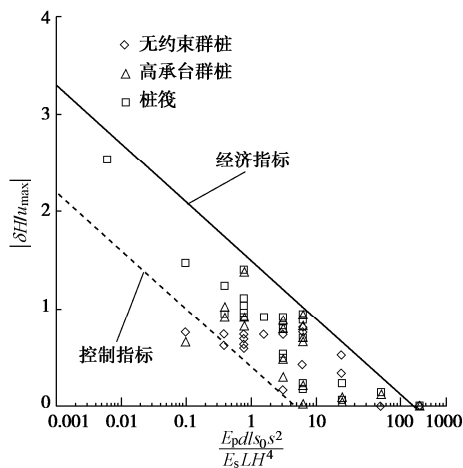


图5 基坑变形控制标准

Fig. 5 Deformation control criteria for foundation pits

6 结 语

本文采用基坑开挖对临近桩筏基础影响的位移控制两阶段分析方法, 对带支撑基坑开挖诱发临近桩筏基础变形的关键影响和设计参数进行了参数分析, 建立了围护墙最大水平位移与桩筏基础角变形之间的“一一对应”关系。分析了各影响因素对桩筏基础角变形与围护墙最大水平位移比值的影响规律, 提出基坑开挖诱发临近桩基础变形影响因子, 进而建立了基于临近桩筏基础的最大允许角变形的基坑围护墙变形的控制指标和经济指标, 可为基于临近桩基保护的基坑变形控制标准制定提供重要的参考。由于分析模型的限制, 该控制指标仅针对带支撑的基坑, 且由于实践工程为保护临近建筑一般无法使临近桩筏基础真正达到临界破坏状态, 无法获得临界状态的实际工程监测数据对该指标进行验证, 该指标应用于制定实践控

制标准需要大量实测数据检验。

参考文献:

- [1] OU C Y, LIAO J T, CHENG W L. Building response and ground movements induced by a deep excavation[J]. Géotechnique, 2000, **50**(3): 209 - 220.
- [2] TAN Y, HUANG R, KANG Z, et al. Covered semi-top-down excavation of subway station surrounded by closely spaced buildings in downtown shanghai: building response[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, **30**(6): 04016040.
- [3] FINNO R J, VOSS F T, ROSSOW E, BLACKBURN J T. Evaluating damage potential in buildings affected by excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(10): 1199 - 1210.
- [4] 徐中华, 王卫东. 深基坑变形控制指标研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(3): 619 - 626. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Deformation control criteria of deep excavations[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(3): 619 - 626. (in Chinese))
- [5] 基坑工程技术规范: DG/TJ08—61—2018[S]. 2018. (Technical Code for Excavation Engineering: DG/TJ08—61—2018 [S]. 2018. (in Chinese))
- [6] FINNO R J, LAWRENCE S A, ALLAWH N F, et al. Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991, **117**(6): 934 - 955.
- [7] 杨 敏, 周洪波, 杨 焯. 基坑开挖与临近桩基相互作用分析[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(4): 93 - 96. (YANG Min, ZHOU Hong-bo, YANG Ye. Numerical analysis of pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(4): 93 - 96. (in Chinese))
- [8] ILIADELIS D. Effect of Deep Excavation on An Adjacent Pile Foundation[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [9] 陈福全, 汪金卫, 刘毓毓. 基坑开挖时临近桩基形状的数值分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1971 - 1976. (CHEN Fu-quan, WANG Jin-wei, LIU Yu-chuan. Numerical analysis of pile response due to braced excavation-induced soil lateral movement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(7): 1971 - 1976. (in Chinese))
- [10] NG C W, LINGS M L. Effects of modeling soil nonlinearity and wall installation on back-analysis of deep excavation in stiff clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(10): 687 - 695.

- [11] FINNO R J, CALVELLO M. Supported excavations: observational method and inverse modeling[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(7): 826 – 836.
- [12] CALVELLO M. Inverse Analysis of Supported Excavations Through Chicago Glacial Clays[D]. Evanston: Northwestern University, 2002.
- [13] HASHASH Y M A, SONG H, OSOULI A. Three-dimensional inverse analyses of a deep excavation in Chicago clays[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, 2011, **35**: 1059 – 1075.
- [14] SCHUSTER M, KUNG G T C, JUANG C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(12): 1823 – 1835.
- [15] LIANG R, XIA T, HUANG M, et al. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, **81**: 167 – 187.
- [16] ZHENG G, YANG X, ZHOU H, et al. Simplified prediction method for evaluating tunnel displacement induced by laterally adjacent excavations[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, **95**: 119 – 128.
- [17] 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.
- [18] GOH A T C, 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.
- [19] ONG D E L, 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.
- [20] MANA A L, CLOUGH G W. Prediction of movement for braced cuts in clay[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1981, **107**(6): 759 – 777.
- [21] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// *Design and Performance of Earth Retaining Structure*, Geotechnical Special Publication No. 25, ASCE, 1990, New York: 439 – 470.
- [22] KUNG G C, JUANG C H, HSIAO E L, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(6): 731 – 747.
- [23] 张爱军, 莫海鸿, 李爱国, 等. 基坑开挖对邻近桩基影响的两阶段分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, **32**(增刊 1): 2746 – 2750. (ZHANG Ai-jun, MO Hai-hong, LI Ai-guo, et al. Two-stage analysis method for behavior of adjacent piles due to foundation pit excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(S1): 2746 – 2750. (in Chinese))
- [24] 木林隆, 黄茂松. 基坑开挖引起的周边土体三维位移场的简化分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(5): 1 – 8. (MU Lin-long, HUANG Mao-song. Simplified method for analysis of soil movement induced by excavations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(5): 1 – 8. (in Chinese))
- [25] 地基基础设计标准: DGJ08—11—2018[S]. 2018. (Foundation Design Code: DGJ08—11—2018[S]. 2018. (in Chinese))
- [26] SKEMPTON A W, MACDONALD D H. The allowable settlements of buildings[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1956, **5**(6): 727 – 768.
- [27] FINNO R J, BRYSON L S. Response of building adjacent to stiff excavation support system in soft clay[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2002, **16**(1): 10 – 20.
- [28] 欧章煜, 谢百钧. 深开挖邻产保护之探讨[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(增刊 1): 509 – 517. (OU Chang-yu, HSIEH Pio-go. Building protection measures in deep excavations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(S1): 509 – 517. (in Chinese))
- [29] MU L, CHEN W, HUANG M, et al. Hybrid method for predicting the response of a pile-raft foundation to adjacent braced excavation[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, **20**(4): 04020026.