

# 上海湖沼平原地区邻近建筑堆填土 处理方案研究

孔令荣<sup>1,2</sup>, 魏建华<sup>1,2</sup>, 李 想<sup>1,2</sup>

(1. 上海勘察设计研究院(集团)股份有限公司, 上海 200093; 2. 上海市岩土工程专业技术服务平台, 上海 200093)

**摘要:** 目前关于受堆土影响的被动桩的研究, 主要关注被动桩桩身变形和桩身内力的分析, 较少关注如何采取措施减轻被动桩受堆土的影响。本文对上海湖沼平原地区某邻近建筑堆填土工程处理方案进行研究, 从控制堆土差异沉降及对邻近建筑物被动桩影响的角度, 采用二维平面应变有限元法, 进行考虑长期固结效应的桩土相互作用计算分析, 对比了不作特殊处理、边桩外挑方案、加大筏板外挑方案、单排桩方案和双排桩方案, 研究了既定的填土高度下不同处理方案的堆土工后沉降、差异沉降情况以及工程桩的桩身附加弯矩、附加剪力、桩身侧向位移情况。研究发现: 采用筏板外挑或单排桩方案, 可以显著降低工程桩桩身附加弯矩及剪力值, 但对邻近主体建筑区域堆土工后沉降减小效果不明显; 采用双排桩方案, 对控制邻近建筑物区域的路面沉降、差异沉降以及降低工程桩桩身附加弯矩值均有显著效果。

**关键词:** 软土; 堆土荷载; 被动桩; 差异沉降; 双排桩; 对邻近桩的影响

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)S1-0039-07

## Research on treatment schemes for filling soil adjacent to buildings in limnological plain subsoil area of Shanghai

KONG Ling-rong<sup>1,2</sup>, WEI Jian-hua<sup>1,2</sup>, LI Xiang<sup>1,2</sup>

(1. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Geotechnical Engineering Professional Technical Service Platform, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** At present, research on passive piles affected by filling soil mainly focuses on the analysis of pile deformation and internal forces, with less emphasis on measures to mitigate its impact on passive piles. From the perspective of controlling differential settlement of filling soil and influence on passive piles beneath adjacent buildings, this paper investigates the treatment schemes for filling soil project adjacent to a nearby building in limnological plain subsoil area of Shanghai. Two-dimensional plane strain finite element method was adopted considering the pile-soil interaction and the long-term consolidation effect. Different treatment schemes such as no special treatment, border pile overhanging scheme, enlarged raft overhanging scheme, single-row pile scheme and double-row pile scheme were selected to compare the additional bending moment, additional shear force and pile lateral displacement of the engineering pile under the given filling height. It is found that the additional bending moment and shear force of the pile can be significantly reduced by enlarged raft overhanging scheme or single-row pile scheme, but the reduction of filling-induced settlement near the building is not obvious. It is also found that the use of double-row pile scheme had significant effect on controlling road settlement and differential settlement in adjacent building areas, and reducing the additional bending moment of engineering piles.

**Key words:** soft soil; soil filling load; passive pile; differential settlement; double-row pile; impact on adjacent pile

## 0 引言

目前贴近既有建筑进行景观堆土的项目越来越多,一方面,堆土体自身会发生较大的工后沉降,易导致堆土体与既有建筑之间发生差异沉降,从而影响观感及使用。另一方面,堆土体对邻近既有建筑边桩也容易产生挤推影响。如何控制堆土体与既有建筑的差异沉降及其对既有建筑边桩的影响,是这类项目需要重点解决的问题。

关于受侧向堆载影响的被动桩分析,国内外学者在该领域已经进行了一定的研究<sup>[1-13]</sup>,但主要关注被动受荷桩的桩身变形情况以及桩身内力的分析,较少关注如何采取措施减轻被动受荷桩受堆土的影响。

本文主要采用有限元分析手段,从控制沉降和控制被动桩桩身内力的角度,系统性对比分析了不作特殊处理、边桩外挑方案、加大筏板外挑方案、单排桩方案和双排桩方案。分析结果表明,采

用双排隔离桩方案对于控制堆土区域与邻近建筑的差异沉降,以及减轻堆土对建筑物下被动桩基的影响最为有效。

## 1 工程概况

本项目位于上海市青浦区,总占地面积约 16.5 万 m<sup>2</sup>,分为 1~6 号共 6 个地块,拟建数幢 10~14 层(高度约 36.0~49.5 m)的高层公寓建筑、1 幢 11 层酒店(高度约 49.9 m)、多幢 2~3 层配套用房及 1~2 层地下室等。6 号地块及 1~4 号地块中间区域设置地下 2 层,其余区域均设置地下 1 层。

场地内部原存在较多深度为 2 m 左右的鱼塘,项目正式启动后,首先进行分层压实换填,然后进行工程桩及基础地下室施工,待地下室结构施工完成后,再沿地下室周边回填景观堆土,将地下室埋入堆土中,堆土厚度约 6~7 m。主楼工程桩采用 PHC500AB100 型管桩,桩长 28 m,桩间距 2 m。典型剖面图如图 1 所示。

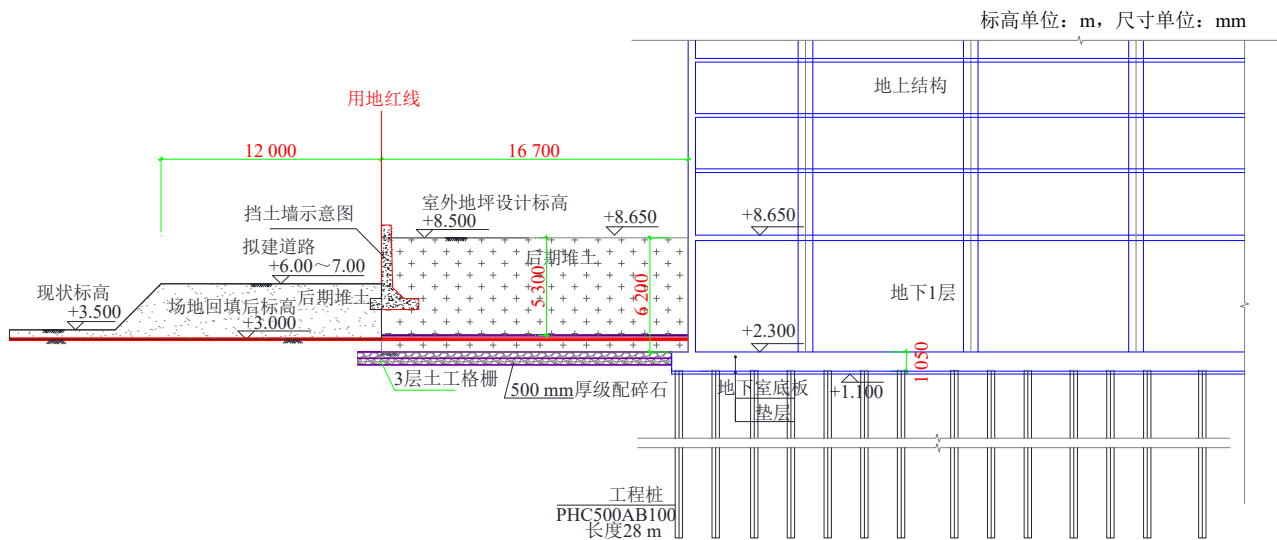


图 1 典型剖面图

Fig. 1 Typical profile of the project

### 1.1 地质条件

本项目场地的地貌类型为湖沼平原 I-1 区:浅部以素填土、浜填土为主,土性软弱;深部为上海典型的 Q<sub>3</sub> 系老土层第⑥层,分为若干亚层,其在青浦地区埋深一般较浅,顶埋深约 3~4 m。其中⑥<sub>1</sub>粉质黏土层,地基承载力较高,不透水,地下 2 层区域有分布;⑥<sub>2</sub>砂质粉土层,地基承载力较高,土性好,但土层厚度不均匀,部分区域分布,属微承压含水层;⑥<sub>3</sub>粉质黏土夹砂质粉土层土性一般,可塑,对高填土地基处理影响较大;⑥<sub>4</sub>层土性较好,可塑-硬塑。

第⑥层以下为⑦砂质粉土夹粉质黏土层,呈中密状态,土性良好。土层物理力学参数见表 1,静力触探比贯入阻力  $P_s$  与深度关系图如图 2 所示。

### 1.2 需解决的工程问题

建筑物周边堆土后,地基的沉降以及堆土对主体建筑工程桩的附加影响是需要解决的工程问题。根据类似项目工程经验,工后沉降控制标准如下:堆土与建筑物邻近处 2~3 m 范围内的沉降暂按 10~15 cm 考虑;道路与地下室交界处沉降按 5~10 cm 考虑;道路沉降暂按 20 cm 控制。

表 1 土层物理力学参数

土层名称	静力触探比贯入阻力 $P_s$ /MPa	直剪固快黏聚力 $c$ /kPa	直剪固快内摩擦角 $\varphi$ /( $^\circ$ )
⑥ <sub>1</sub> 粉质黏土	1.95	34	16.5
⑥ <sub>2</sub> 砂质粉土	2.92	4	31.0
⑥ <sub>3</sub> 粉质黏土 夹砂质粉土	1.14	20	17.0
⑥ <sub>4.1</sub> 粉质黏土 夹砂质粉土	3.38	37	17.5
⑥ <sub>4.2</sub> 黏土夹砂 质粉土	3.42	34	16.0
⑥ <sub>4.3</sub> 粉质黏土	1.81	21	17.5
⑦ 砂质粉土夹 粉质黏土	11.81	4	31.5

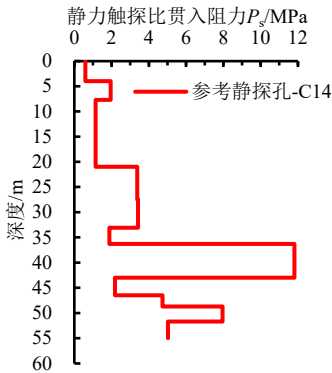


图 2 静力触探比贯入阻力  $P_s$  与深度关系图

Fig. 2 CPT cone resistance value  $P_s$  varies with depth

## 2 处理方案比选

### 2.1 处理方案

为了控制建筑物与堆土区域的差异沉降、降低堆土对工程桩的附加内力及变形影响, 将原先不考虑堆土影响的设计方案作为参照方案, 提出了多种控沉保护方案, 包括边桩外挑减沉方案、筏板外挑减沉方案、单排减沉隔离桩方案、双排减沉隔离桩方案, 详细设计思路、主要设计参数及平、剖面做法示意图见表 2。

### 2.2 计算分析

计算分析涉及土与结构的相互作用, 宜采用有限元软件进行分析, 本次选择采用在全球范围内具有较高知名度的 ZSOIL 专业岩土有限元分析软件进行二维平面应变计算分析, 模型尺寸大小为 100 m×60 m, 模型底部约束竖向位移及水平位移且设置为不透水边界, 模型两侧约束水平位移且设置为透水边界, 水头高度设置为堆土施工前原状地表以下 1.0 m。计算分析采用流固耦合方法, 以考虑时间对堆载体长期固结沉降的影响。此外, 针对土体, 采用对黏性土、粉土、砂土正常使用状态及极限状态 (SLS 及 ULS) 均适应性较好的小应变硬化土 (HSS) 本构模型<sup>[14]</sup>, 本次计算的小应变硬化土模型计算参数如表 3 所示。

表 2 处理方案

Table 2 Treatment schemes

方案	设计思路	主要设计参数	剖面做法示意图 (尺寸单位: mm)	平面做法示意图 (尺寸单位: mm)
参照方案	—	墙下布桩, 筏板外挑 1.0 m		
方案一	边桩外挑减沉	边桩外挑 0.5 m, 同时筏板外挑 1.0 m		

续表

方案	设计思路	主要设计参数	剖面做法示意图 (尺寸单位: mm)	平面做法示意图 (尺寸单位: mm)
方案二	筏板外挑减沉及隔挡	筏板外挑 1.5 m		
方案三	筏板外挑减沉及隔挡	筏板外挑 2.0 m		
方案四	单排桩减沉及隔离	采用单排 PHC500 AB100 预制管桩 减沉隔离, 桩间距 2 m, 桩长 12 m		
方案五	双排桩减沉及隔离	采用双排 PHC500 AB100 预制管桩 减沉隔离, 桩间距 3 m, 桩长 12 m		

表 3 小应变硬化土模型计算参数

Table 3 Calculation parameters for hardening soil model with small strain

土层名称	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	含水率/ %	孔隙 比 e	水平渗透系 数 k <sub>h</sub> /(m/d)	垂直渗透系 数 k <sub>v</sub> /(m/d)	幂指 数 m	有效内 摩擦角 φ'/(°)	有效黏 聚力 c'/ kPa	侧限压缩 模量 E <sub>oed</sub> / MPa	割线模 量 E <sub>50</sub> / MPa	卸荷模 量 E <sub>ur</sub> / MPa	初始切线 模量 G <sub>0</sub> /MPa
① <sub>1</sub> 填土	18.0	30.0	0.914	0.5	0.1	0.95	24	10	2.00	2.4	10.5	20.2
⑥ <sub>1</sub> 粉质黏土	19.6	24.2	0.679	0.000 1	0.000 02	0.95	28	15	5.34	5.8	28.9	55.5
⑥ <sub>3</sub> 粉质黏土 夹砂质粉土	18.8	30.8	0.844	0.005	0.001	0.95	25	12	3.96	4.0	20.0	38.5
⑥ <sub>4-1</sub> 粉质黏土 夹砂质粉土	19.8	23.0	0.646	0.05	0.01	0.95	28	20	9.42	12.0	50.0	57.7

续表

土层名称	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	含水率/ %	孔隙 比 <i>e</i>	水平渗透系 数 <i>k<sub>h</sub></i> /(m/d)	垂直渗透系 数 <i>k<sub>v</sub></i> /(m/d)	幂指 数 <i>m</i>	有效内 摩擦角 $\phi'$ (°)	有效黏 聚力 <i>c'</i> / kPa	侧限压缩 模量 <i>E<sub>oed</sub></i> / MPa	割线模 量 <i>E<sub>50</sub></i> / MPa	卸荷模 量 <i>E<sub>ur</sub></i> / MPa	初始切线 模量 <i>G<sub>0</sub></i> /MPa
⑥ <sub>4.2</sub> 黏土夹砂 质粉土	18.8	30.8	0.844	0.000 1	0.000 02	0.95	28	15	5.43	7.5	30.0	46.2
⑦砂质粉土夹 粉质黏土	19.1	25.0	0.690	0.1	0.02	0.70	31	5	27.20	30.0	120.0	138.5

桩体采用 Beam 结构单元, 弹性模量取 30 GPa, 泊松比为 0.25; 结构底板采用 Continuum 实体单元, 弹性模量取 30 GPa, 泊松比为 0.25。计算模型如图 3 所示, 计算分析步骤包括: 初始地应力生成、工程桩及隔离桩激活施工、基坑开挖、主体结构激活施工、堆土施工。堆载体通过采用分布线荷载的方式进行简化模拟, 荷载最大值设为 110 kPa, 堆载施工时间假定为 1 个月。14 层主楼区域的竖向荷载采用均布荷载施加于底板面上, 荷载大小按 15 kPa/层, 即总荷载 210 kPa 考虑, 并考虑部分地上结构刚度的影响。由于堆载体自身在施工期间须经过分层碾压处理, 压实度要求达到 0.92, 且堆载体内分层设置土工格栅、堆土体下设置排水碎石垫层, 因此, 分析中假定堆载体自身的工后沉降较小, 可不予考虑。

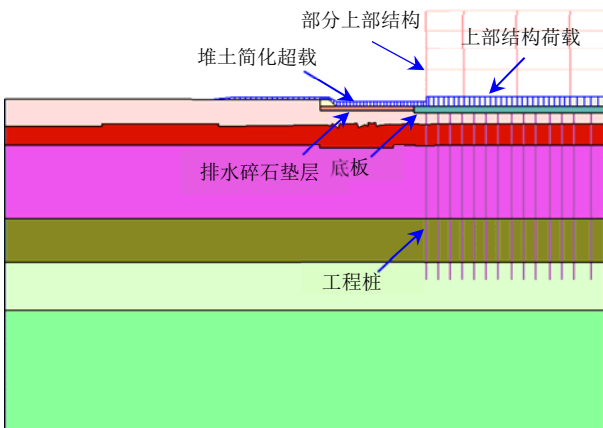


图 3 计算模型  
Fig. 3 Calculation model

### 2.3 计算结果分析

图 4 为参照工况下堆土区域不同深度位置总沉降, 其中总沉降量为堆土施工期的沉降及工后沉降的总和。可以看出堆土期间的瞬时沉降约占总沉降量的 40%。堆土的影响深度约为 20 m 左右, 主要压缩层为③层及其以上地层。

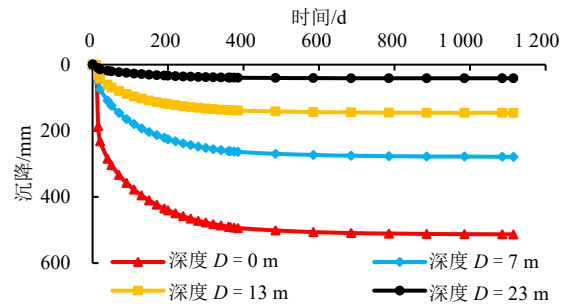


图 4 堆土区域不同深度位置总沉降  
Fig. 4 Total settlement at different depths in the filling area

根据《先张法预应力混凝土管桩》(23G409)<sup>[15]</sup>, PHC500AB100 管桩如作为工程桩使用, 则其桩身受弯承载力设计值不宜超过 178 kN·m (允许开裂) / 138 kN·m (不允许开裂), 桩身受剪承载力设计值不宜超过 233 kN; 如其作为隔离桩使用, 则其桩身弯矩标准值不宜超过桩身极限受弯承载力 (210kN·m), 桩身极限受剪承载力不宜超过 271 kN。

图 5 为各方案的堆土边主楼最外排桩桩身弯矩, 可以看出, 除方案四及方案五以外, 其余方案主楼近堆土边最外排桩的桩身弯矩均超出了桩身不允许开裂的弯矩限值。

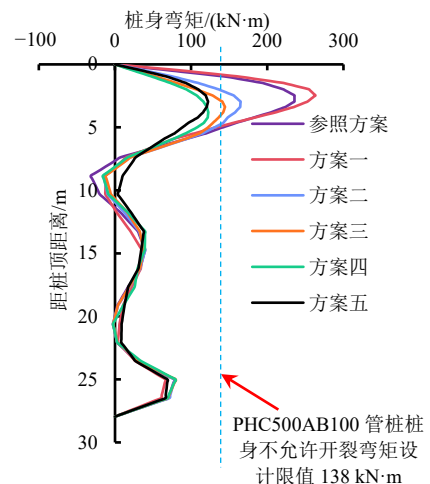


图 5 堆土边主楼最外排桩桩身弯矩  
Fig. 5 Bending moment of border piles adjacent to the filling area

表4为各方案下,堆土工后沉降及近主体建筑区域堆土工后沉降、工程桩的桩身附加变形及附加弯矩和剪力情况、减沉隔离桩的桩身弯矩情况。对比各方案可以看出:(1)如不采取措施,堆土导致的工程桩桩身附加弯矩会超过桩身受弯承载力设计值,且堆土产生的最大沉降达到26 cm;(2)采用方案一(边桩外挑方案),沉降稍有控制,但近主体建筑区域堆土工后沉降值仍然超过20 cm,且堆土导致的工程桩桩身附加弯矩仍会超过桩身受弯承载力设计值;(3)采用方案二或方案三(筏板外挑方案),沉降改善不显著,但工程桩桩身附加弯矩及剪力值均显著降低,均未超过桩身受弯或受剪承载力设计值;(4)采用方案四(单排减沉隔离桩方案),比较方案一和三,工程桩桩身附加弯矩及剪力值均显著降低,且减沉隔离桩自

身也未达到其极限破坏荷载,但其对近主体建筑区域堆土工后沉降最大值改善效果不明显;(5)采用方案五(双排减沉隔离桩方案),相较于方案一和三,工程桩桩身附加弯矩及剪力值均显著降低,减沉隔离桩自身所受弯矩值较方案四进一步显著降低,安全富余度更大,且其对近主体建筑区域堆土工后沉降最大值控制在10 cm以内,改善效果明显。因此,从控制差异沉降及保护工程桩角度,采用方案五最佳。

进一步地,地表工后沉降如图6所示,对各方案的地表工后沉降情况进行了对比,主体建筑区域工后沉降约5 cm,堆土区域最大工后沉降约30 cm,采用双排减沉隔离桩方案对差异沉降控制效果最为显著,其可在邻近建筑物区域形成约5~7 m的沉降缓冲带,避免产生“断崖式”错台差异沉降。

表4 计算结果汇总表

Table 4 Summary of calculation results

方案	堆土工后沉降最大值/cm	近主体建筑区域	工程桩桩身附加弯	工程桩桩身附加剪	工程桩桩身附加	减沉隔离桩桩身弯
		堆土工后沉降最大 大值/cm	矩设计值最大值/ (kN·m)	力设计值最大值/ kN	侧向位移最大值/ cm	矩标准值最大值/ (kN·m)
参照方案	32.2	26.0	225	135	2.6	—
方案一	30.6	22.8	263	182	2.8	—
方案二	30.7	24.6	155	72	2.4	—
方案三	30.7	22.2	136	53	2.4	—
方案四	30.0	21.8	119	55	2.2	181
方案五	30.5	9.8	113	74	2.5	138

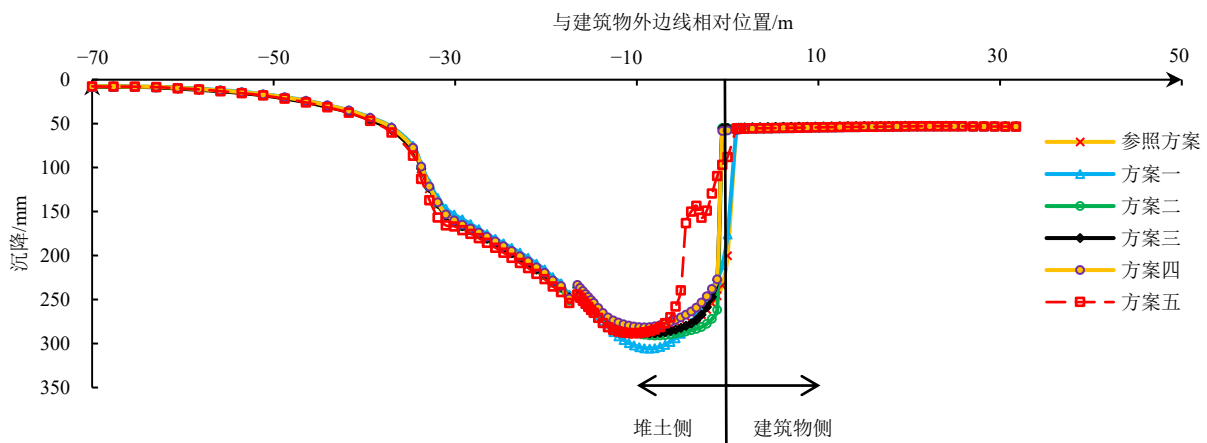


图6 地表工后沉降

Fig. 6 Post-construction ground settlement

### 3 结论

本文对上海湖沼平原地区某邻近建筑堆填土工程处理方案进行研究,从控制堆土差异沉降及对

邻近建筑物桩基影响的角度,比较了不作特殊处理、边桩外挑方案、筏板外挑方案、单排减沉隔离桩方案和双排减沉隔离桩方案,研究了既定的填土高度下,不同方案的堆土工后沉降、差异沉降情况以及



工程桩的桩身附加弯矩、附加剪力、桩身位移, 主要结论如下:

(1) 对于上海市青浦地区, 高度 6~7 m、超载约 110 kPa 的建筑边堆土, 虽然挖除浅层软弱土至第⑥层老土, 地基承载力能够满足要求, 但是无论是建筑物周边沉降, 还是堆土对建筑物下边桩的影响均较大, 需要设计合理的处理方案。

(2) 采用筏板外挑或单排减沉隔离桩方案, 可以显著降低工程桩桩身附加弯矩及剪力值, 但对近主体建筑区域堆土工后沉降改善效果不明显。

(3) 采用双排减沉隔离桩方案, 对控制邻近建筑区域的路面沉降、差异沉降以及降低工程桩桩身附加弯矩值均有显著效果。可以预见, 如采用多排隔离桩, 则可更大范围地改善堆土区域工后沉降。

## 参考文献

- [1] 杨敏, 周洪波. 承受侧向土体位移桩基的一种耦合算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4491-4497.  
YANG Min, ZHOU Hong-bo. A coupling analytical solution of piles subjected to lateral soil movements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4491-4497.
- [2] 周东, 刘汉龙, 仇文岗, 等. 被动桩侧土体位移场的透明土模型试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2686-2694.  
ZHOU Dong, LIU Han-long, ZHANG Wen-gang, et al. Transparent soil model test on the displacement field of soil around single passive pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2686-2694.
- [3] 宋修广, 李信, 万立尧, 等. 堆载作用下被动桩的水平受力及位移分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 56-62.  
SONG Xiu-guang, LI Xin, WAN Li-yao, et al. Analysis of lateral force and displacement for passive piles under surcharge load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2): 56-62.
- [4] 刘敦平, 蒯行成, 赵明华. 软土运动作用下被动桩桩-土水平相互作用的三维有限元分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 18-24.  
LIU Dun-ping, KUAI Xing-cheng, ZHAO Ming-hua. 3-D finite element analysis on pile-soil horizontal interaction of passive pile under soft soil movement action[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 18-24.
- [5] 梁发云, 李彦初. 土体侧移模式对邻近桩基性状影响的三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 2): 399-403.  
LIANG Fa-yun, LI Yan-chu. Numerical analysis for effects of lateral soil movement on adjacent piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 399-403.
- [6] POULOS H G. Ground movements-a hidden source of loading on deep foundations[J]. DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute, 2007, 1(1): 37-53.
- [7] 尹骥. 侧向堆载对管桩桩身侧向变形影响试验研究[J]. 地基处理, 2022, 4(增刊): 99-104.  
YIN Ji. Experimental research on the lateral deflection of PHC pile due to adjacent surcharge[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(S): 99-104.
- [8] 袁文豪, 阙云, 王荣. 基于土体 HSS 本构模型的堆载对邻近桩基的性状分析[J]. 东莞理工学院学报, 2023, 30(3): 115-119.  
YUAN Wen-hao, QUE Yun, WANG Rong. Characteristic analysis of surcharge on adjacent pile foundation based on soil HSS constitutive model[J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2023, 30(3): 115-119.
- [9] 杨吉新, 王金川, 陈天驰, 等. 一种单侧堆载作用下桩基侧向位移计算方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(3): 556-560, 567.  
YANG Ji-xin, WANG Jin-chuan, CHEN Tian-chi, et al. Calculation method of lateral displacement of pile under single-side surcharge load[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2023, 47(3): 556-560, 567.
- [10] 李琳, 马荣, 李敬梅, 等. 土体侧移作用下桩基侧向土压力的群桩效应[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 561-570.  
LI Lin, MA Rong, LI Jing-mei, et al. The group effect on the lateral earth pressure of piles subjected to lateral soil movement[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 561-570.
- [11] 张超凡. 考虑土体非线性时被动桩内力和变形特性计算[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(1): 127-133.  
ZHANG Chao-fan. Calculation of internal force and deformation characteristics of passive pile considering soil nonlinearity[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(1): 127-133.
- [12] 范坚. 侧向堆载下基于位移法的桥桩承载性状分析[D]. 南京: 东南大学, 2020.

