

# 邻近堆载作用下桥梁桩基内力与变形数值分析

Numerical Analysis of Internal Force and Deformation of Bridge Pile Foundation under Adjacent Surcharge Loading

马 迪

(陕西师范大学国有资产管理处, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 采用数值分析方法, 研究堆载对邻近桥梁桩基内力与变形的影响。使用耦合欧拉-拉格朗日法建立了堆载作用下某特大桥 654# 桥墩桩基三维有限元模型, 以桥墩轨道顶面横向位移实测值与计算值对比验证了模型的有效性。据此模型计算结果分析了邻近大量堆土情况下桩基的内力和变形特性: 各桩水平位移都在  $1/2L$  附近的淤泥质粉质黏土层达到最大值; 各桩  $1/6L \sim 2/3L$  范围内桩身产生附加弯矩的最大值为  $210 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ; 且在距堆载较近的桩基上部引起了负摩擦力, 进而产生了  $581 \sim 1368 \text{ kN}$  的附加轴力。结果表明堆载严重劣化了桩基的工作性能。可为主动防控堆载引发的墩台偏移等病害研究提供一种可行的方法。

**关键词:** 堆载; 桥梁桩基; CEL; 数值分析; 内力; 变形

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0059-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.011

MA Di

(State Owned Assets Management Department, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** In this paper, the influence of pile load on the internal force and deformation of adjacent bridge pile foundation is studied by numerical analysis. The CEL method was used to establish a three-dimensional finite element model of the pile foundation of a bridge. The validity of the model is verified by comparing the measured and calculated transverse displacement of the track top surface. Based on the calculation results of the model, the internal force and deformation characteristics of pile foundation near a large number of piles are analyzed: Each pile's maximum horizontal displacement appears at  $1/2L$  of the pile body. In the range of  $1/6L \sim 2/3L$  of each pile, a large additional bending moment was generated. The upper part of the pile closer to the surcharge has a negative frictional force, which in turn produces an additional axial force of  $581 \sim 1368 \text{ kN}$ . It is obvious that the surcharging load seriously deteriorates the pile foundation. It can provide a feasible method for active prevention and control of pier deflections caused by surcharge load.

**Keywords:** surcharge loading; bridge pile foundation; CEL; numerical analysis; internal force; deformation

## 0 引言

实际工程中的桥梁桩基, 不仅承受上部结构传

来的主动荷载, 还承受其他原因导致的被动荷载。例如邻近堆载致使很多桩基尤其是软土地区<sup>[1-3]</sup>的高铁线路桥梁桩基发生横向变形。

研究堆载对邻近桩基的影响问题, 目前常用的方法大体可分为三类: 现场试验研究、理论研究和有限元建模研究。针对这一问题, 应用传统拉格朗日有限元法建模计算, 得到的关于力的结果是符合要求的, 而位移结果较实际有较大差异<sup>[4]</sup>。近年来,

作者简介: 马 迪 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 岩土工程。

收稿日期: 2023-03-20

## 岩土力学

出现了一些专用于解决大变形问题的有限元方法, 其中比较常见的是任意拉格朗日-欧拉方法 (ALE)<sup>[5]</sup>、光滑粒子流体动力学方法 (SPH)<sup>[6]</sup>、耦合欧拉-拉格朗日方法 (CEL)<sup>[7]</sup>、材料点法 (MPM)<sup>[8]</sup> 和粒子有限元法 (PFEM)<sup>[9]</sup>。目前最广泛使用的是 CEL 方法, 它具有模拟多层土体大变形的能力<sup>[10]</sup>, 同时具有拉格朗日法和欧拉法的优点。应用该方法时一般将结构建模为拉格朗日单元, 将土体建模为欧拉单元, 计算过程中土体材料可以通过欧拉网格自由移动, 且欧拉网格在计算过程中始终保持不变形<sup>[4]</sup>, 减小了传统方法因网格畸变造成的影响。

结合典型软土区桥梁墩台偏移工程案例, 采用 CEL 法建模计算, 研究桩基内力与变形的分布与变化。为研究墩台偏移的变形机理提供一种可行的方法。

### 1 工程概况

某铁路客运专线特大桥墩 652#~660#, 由于邻近大量堆土发生了水平偏移, 其中 654# 桥墩偏移量最大, 达到 23.2 mm, 对线路运营安全造成了极大威胁 (见图 1)。以 654# 桥墩为例, 采用 CEL 有限元法, 建立邻近堆土作用下的桥墩三维有限元分析模型。

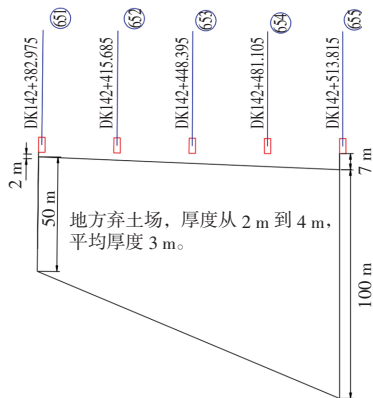


图 1 654# 桥墩邻近堆土示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the relationship between bridge piers and pile soil

### 2 数值分析模型建立

#### 2.1 计算区域及边界条件

模型计算区域水平向尺寸为 450 m × 300 m, 以水平面为 XY 面, 桥梁轴线 (线路前进方向) 为 Y

轴, 垂直方向为 Z 轴, 如图 2 所示。模型竖向尺寸为 73 m, 上部 0~40.5 m 较软土层 (淤泥、淤泥质粉质黏土、粉质黏土) 区域采用欧拉体模拟, 下部 40.5~73 m 较硬土层 (中砂、粉质黏土、细圆砾土和粉质黏土) 采用拉格朗日体模拟。边界条件: 对于下部拉格朗日土体固定侧面与底面垂直方向的位移。欧拉体的边界条件以材料流动速度定义, 因此对于模型的欧拉土体, 设置每个边界的垂直方向速度为 0。在桥墩外侧添加堆土并将其安置于模型的中心, 堆土底面近似呈梯形, 上边长 50 m, 下边长 100 m。堆土边缘最近处距桥墩为 3.8 m。堆土顺线路方向长 130.8 m, 由于没有坡度的准确数据, 堆土坡率取 1:1, 整体形状为台体。桥墩基础由 10 根桩与上部承台组成。桩长 61.5 m、直径 1 m。承台尺寸长 × 宽 × 高为 11.1 m × 7.4 m × 2.5 m。桩基布置如图 3 所示。

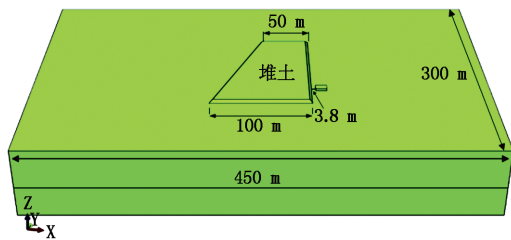


图 2 CEL 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

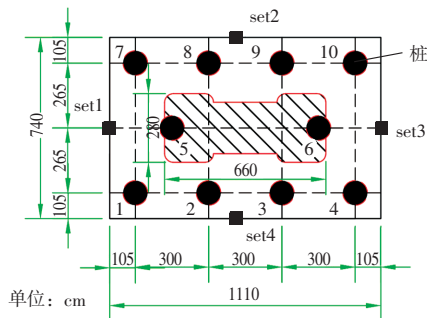


图 3 桩基布置图

Fig. 3 Pile foundations layout

#### 2.2 材料参数

桩身浇筑材料为 C40 混凝土, 采用 HRB235 钢筋, 配筋率为 0.5%, 参考《混凝土结构设计规范》<sup>[11]</sup> 可以计算得到桩的复合模量为  $3.34 \times 10^{10}$  Pa, 密度为  $2500 \text{ kg/m}^3$ , 泊松比为 0.17。上部承台弹性模量为  $3.5 \times 10^{10}$  Pa, 密度、泊松比与桩相同。地基土参数根据实测土层分布取值, 见表 1, 根据文献

[12] 将压缩模量换算为弹性模量。其中深度 40.5 m 以内第 1~3 层较软土采用欧拉体模拟, 40.5 m 以下

的硬土层均采用拉格朗日体模拟。各层土均采用摩尔-库仑本构模型。

表 1 土层参数表  
Table 1 Table of soil layer parameters

编号	名称	厚度 $h$ /m	天然密度 $\rho$ / ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	压缩模量 $E_s$ /MPa	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi$ /°	黏聚力 $c$ /kPa
1	淤泥	12	1 690	2.03	0.49	2.59	5.56
2	淤泥质粉质黏土	22.5	1 740	2.52	0.49	3.96	10.19
3	粉质黏土	6.0	1 850	3.96	0.49	6.58	18.39
4	中砂	4.0	1 800	30.00	0.30	28.00	0
5	粉质黏土	6.5	1 840	4.28	0.32	6.45	18.71
6	细圆砾土	9.0	1 980	35.00	0.30	35.00	0
7	粉质黏土	13	1 960	7.45	0.30	15.00	39.93

### 2.3 网格划分

综合考虑计算精度及计算量, 靠近桩基的土体采用 0.5 m 的细网格, 距离桩基较远的土体采用尺寸线性递增的网格。桩基网格沿水平方向的尺寸为 0.1 m, 沿深度方向为 1 m。桩基、拉格朗日土体和堆载采用实体三维 8 节点单元 (C3D8R) 进行离散, 欧拉土体采用欧拉三维 8 节点线性单元 (EC3D8R) 进行离散。网格划分情况如图 4、图 5 所示。

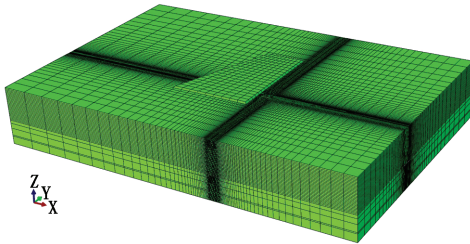


图 4 土体网格划分图  
Fig. 4 Soil meshing diagram

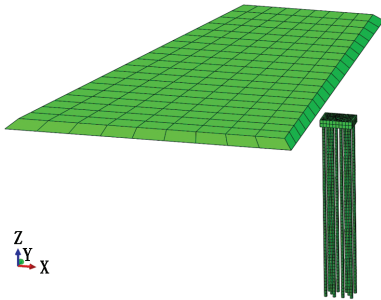


图 5 桩基及堆载网格划分图  
Fig. 5 Pile foundation and stacking meshing diagram

### 2.4 建立接触

对欧拉区域中的土体材料与拉格朗日单元之间施加通用接触 (General Contact), 法向为“硬接触”, 即桩土之间没有相互侵入; 切向使用罚函数, 其罚系数 (摩擦系数) 依据下式<sup>[13]</sup>确定:

$$\mu = K_0 \tan \delta \quad (1)$$

式中:  $K_0$  为静止土压力系数,  $K_0 = 1 - \sin \varphi$ ,  $\varphi$  为土层内摩擦角;  $\delta$  为界面摩擦角, 取值为  $\delta \in \left( \frac{1}{3}\varphi, \frac{2}{3}\varphi \right)$ 。

对拉格朗日土体中桩-土接触面上设置“面-面”接触, 接触面属性使用库仑摩擦模型, 摩擦系数同上。

### 2.5 施加初始应力及桥墩恒载

地基土的初始应力状态由以下步骤获得:

- (1) 通过修改关键字或直接在 inp 文件中添加下述语句: \* initial conditions, type = stress, geostatic;
- (2) 计算由于上部欧拉土体自重产生的压力, 将此压力均匀布置于拉格朗日土体的上表面;
- (3) 给土体施加重力以达到应力平衡状态。在地应力分析步之后添加一个显式分析步, 此分析步主要模拟桥墩恒载的施加。

根据相关工程资料进行计算, 654#桥墩自重荷载约 7 000 kN, 上部简支梁结构自重荷载为 8 368 kN, 加上其他附属结构荷载约为 5 120 kN, 则承台上部恒载为 20 488 kN。

## 3 数值模拟结果及分析

### 3.1 堆载-桩基距离

654#桥墩桩基在邻近堆土作用下的横向 (X 向) 水平位移云图如图 6 所示。654#桥墩在邻近堆土作用下向未堆土一侧偏移, 承台顶面横向偏移量为 23.3 mm, 承台横向转角为 0.000 2 rad (靠近堆载一侧沉降量大于对侧)。承台顶面至轨道高度为 16.38 m, 将该段简化为刚体考虑, 计算得到轨顶横向偏移量

## 岩土力学

为 20.0 mm。根据相关工程资料得 654#桥墩轨道顶面实测横向位移为 23.2 mm，两者误差为 3.2 mm，相对误差 13%，计算值与实测值比较接近。

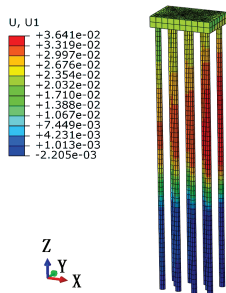


图 6 桩基横向位移云图  
Fig. 6 Lateral displacement diagram of pile foundation

堆载作用下 654#桥墩的桩身水平位移沿深度的分布曲线如图 7 所示，桩顶处因受承台的刚性约束，各桩水平位移一致，约为 23.3 mm；靠近堆载侧桩基位移小于远离堆载侧桩基位移，各桩水平位移都在 29 m 深度附近的淤泥质粉质黏土层达到最大值，其中 10#桩水平位移最大，达到 36.4 mm；1#桩最小，为 30.4 mm；各桩水平位移主要位于桩身中上部的软土层，进入中砂层后各桩桩身水平位移较小，在 0 ~ 3.2 mm 之间。

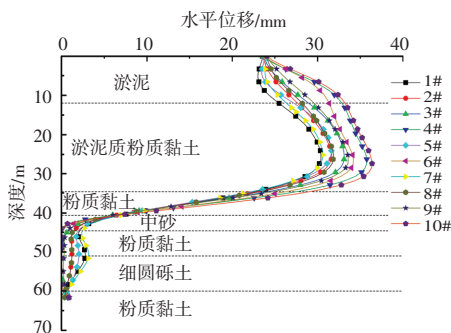


图 7 桩身水平位移沿深度的分布曲线  
Fig. 7 The distribution curve of the horizontal displacement of the pile body along the depth

### 3.2 桩基、桩侧土竖向位移

由堆土后承台顶面的竖向位移与未堆土之前位移值相减，得承台顶面在邻近堆载作用下的附加竖向位移为 3.0 mm。邻近堆土作用下桩基竖向位移曲线如图 8 所示。在邻近堆土作用下 654#桥墩各桩竖向位移沿深度的变化趋势基本一致，桩顶处竖向位移量为 11.2 ~ 13.2 mm，桩端处竖向位移量为 5.4 ~ 13.9 mm；离堆土越近，桩身竖向位移越大，即 1#、

7#桩最大，4#、10#桩最小。桩侧 set1 ~ set4 点向下一一定深度土体的竖向位移随深度变化的曲线如图 9 所示。在 0 ~ 4 m 深度内土体产生隆起，最大值为 40 mm；在 4 m 深度以上，距离堆载最近的 set1 沉降量最大，于 6 m 深度处产生最大沉降值 24 mm；距离堆载较远的 set2 ~ set4 中 set3 的沉降量最小，set2、set4 居中。总体来看，距离堆载越远土体沉降量越小。

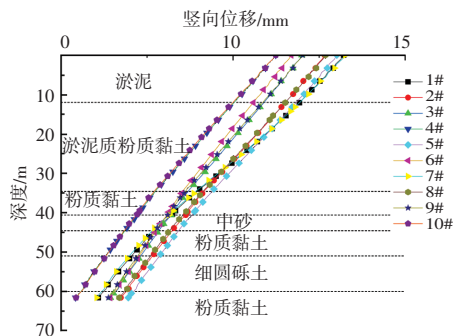


图 8 桩身竖向位移随深度的分布曲线  
Fig. 8 The distribution curve of vertical displacement of pile body with depth

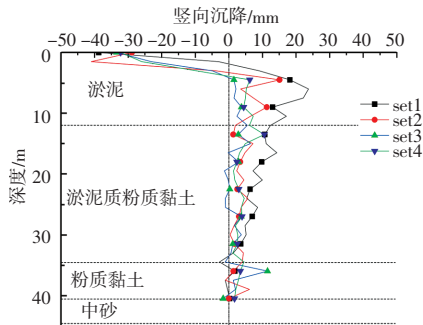


图 9 set1 ~ set4 竖向沉降曲线  
Fig. 9 set1 ~ set4 vertical settlement curves

### 3.3 桩侧摩阻力

对各桩桩侧摩阻力进行定量分析，如图 10 所示。1#、5#、7#桩身上部出现了负摩阻力，离堆土越近，桩身负摩阻力越大。其中 1#、7#桩的侧摩阻力最大值为 -4 kPa，5#桩最大值为 -1.5 kPa；从图中可看出 1#、5#和 7#桩的中性点约位于 1/3L 处（深度 22 m），其余桩均未出现侧摩擦力，这与上述定性研究结论基本一致。桩身摩阻力在淤泥层和淤泥质粉质黏土层随深度的增加而增加，7#桩在淤泥质粉质黏土中的侧摩阻力最大，达到 8.9 kPa。进入粉质黏土层后，各桩桩身侧摩阻力均呈现减小的趋势。由此可知，邻近堆载对 654#桥墩桩基摩阻力的影响范围主要位



于桩身上部的淤泥层和淤泥质粉质黏土层。

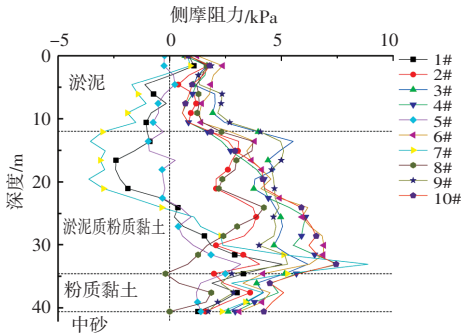
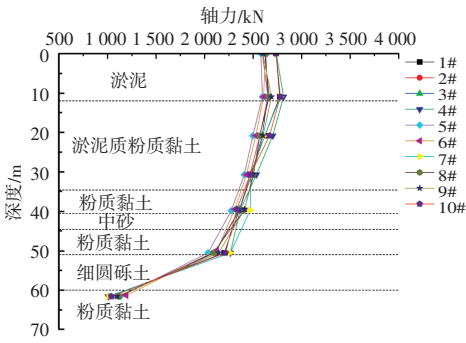


图 10 桩侧摩阻力随深度分布曲线

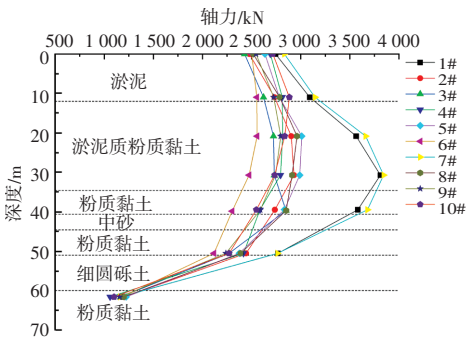
Fig. 10 Pile side friction distribution curve with depth

### 3.4 桩身轴力

堆土前后桩身轴力沿深度分布曲线如图 11 所示。堆土前桩身轴力沿深度逐渐减小，上部软土层的桩身轴力沿深度的减小幅度较小，下部坚硬土层的桩身轴力减小幅度较大。



(a) 堆土作用前



(b) 堆土作用后

图 11 堆土作用前后桩身轴力

Fig. 11 Axial force of pile body before and after piling soil

堆土前后桩身轴力沿深度的分布规律变化较大。堆土前，桩身轴力沿深度逐渐减小，角桩（1#、4#、7#、10#桩）桩身轴力最大，边桩（2#、3#、8#、9#桩）桩身轴力次之，中心桩（5#、6#桩）桩身轴力最小；堆土后，靠近堆土一侧的基桩（1#、5#、7#

桩）桩身轴力在深度 30 m 处达到最大值，分别为 3 810、2 989 和 3 844 kN，桩顶轴力最大值处，桩身轴力随深度的增加而增大，轴力最大值点至桩端，桩身轴力随深度的增加而减小；其余桩的桩身轴力在桩顶处为 2 600 kN 左右，在 0~20 m 深度内略有增加，在 20~40 m 深度内以每延米 4~16 kN 的幅度减小，在 40 m 深度以下的坚硬土层以每延米 58~80 kN 幅度减小；1#、7#桩桩端处轴力较未堆载时增加约 13.6%，其余桩桩端处轴力增加值在 1.0%~8.4% 之间，由此可知堆载作用会显著增大靠近堆载一侧基桩的桩端轴力。综上所述，邻近堆载将会在邻近软土层内的桩身上部引起负摩擦力，其中性点深度大致位于  $1/3L$  处。由堆载引起的各桩新增轴力达到 581~1 368 kN，轴力最大值出现在  $1/2L$  处。

### 3.5 桩身弯矩

桩身弯矩沿深度的分布曲线如图 12 所示。在邻近堆土作用下桩身弯矩主要出现在淤泥质粉质黏土层，下部硬土层的桩身弯矩较小。各桩弯矩最大值均出现于  $1/2L$  (30 m) 深度处，其中 4#、10#桩弯矩最大，为 210 kN·m；5#桩弯矩最小，为 154 kN·m。可见该邻近堆载对  $1/6L$ ~ $2/3L$  范围内位于软土层的桩身弯矩影响较大。

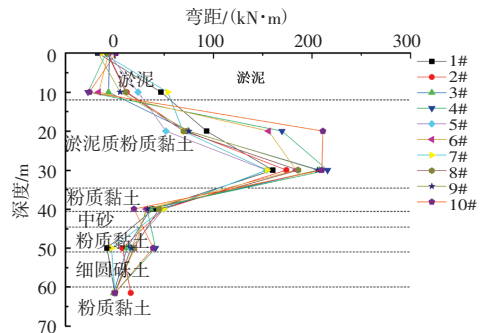


图 12 桩身弯矩沿深度分布曲线图

Fig. 12 Pile bending moment along the depth distribution curve

## 4 结论

采用 CEL 方法建立堆载作用下某高速铁路桥墩桩基及承台的三维有限元模型，分析了桩基的变形和内力分布规律，得主要结论如下：

(1) 距离堆载越远土体桩基、桩侧土竖向位移越小；桩基摩阻力的影响范围主要位于桩身上部的淤泥层和淤泥质粉质黏土层；桩身轴力沿深度的减

## 岩土力学

小幅度较小, 下部坚硬土层的桩身减小幅度较大。

(2) 堆载在桩身上部引起了负摩擦力, 进而导致桩身产生新增轴力, 最大达 1368 kN。上部软土层内的桩基产生了较大弯矩, 远离堆土一侧桩基最大弯矩值约为靠近堆土一侧的 1.4 倍。

(3) 堆载严重劣化了桩基的工作性能, 引发了墩台偏移, 对行车安全构成威胁。

文内所应用方法可为研究堆载问题、主动防控墩台偏移病害提供一种可行的途径。

### 参 考 文 献

- [1] BIAN X C, LIANG Y W, ZHAO C, et al. Centrifuge testing and numerical modeling of single pile and long-pile groups adjacent to surcharge loads in silt soil [J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 25: 100399.
- [2] 陈维家, 刘维正, 林震宇. 真空-堆载预压联合管桩-土工格室在堆场深厚软基处理中的应用 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17 (7): 1699-1709.
- [3] WANG L Z, CHEN K X, HONG Y, et al. Effect of consolidation on responses of a single pile subjected to lateral soil movement [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52 (6): 769-782.
- [4] FAN Y F, WANG J H. Lateral response of piles subjected to a combination of spudcan penetration and pile head loads [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 156: 468-478.
- [5] SARRATE J, HUERTA A, DONEA J. Arbitrary Lagrangian - Eulerian formulation for fluid-rigid body interaction [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, 190 (24-25): 3171-3188.
- [6] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars [J]. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 1977, 181 (3): 375-389.
- [7] NOH W F. CEL: A time-dependent, two-space-dimensional, coupled Eulerian-Lagrange code [R]. Lawrence Radiation Lab., Univ. of California, Livermore, 1963.
- [8] KAJAJI I K J. Formulation of a dynamic material point method (MPM) for geomechanical problems [M]. 2013.
- [9] ONATE E, IDELSOHN S R, DEL P F, et al. The particle finite element method—an overview [J]. *International Journal of Computational Methods*, 2004, 1 (2): 267-307.
- [10] QIU G, GRABE J. Numerical simulation of the deep penetration process of spudcans into sand overlying clay using the extended hypoplastic models [C] //The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012.
- [11] 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] 舒武堂, 李国胜, 蒋涛. 武汉地区淤泥质软土、粘性土的压缩模量与变形模量的相关关系 [J]. *岩土工程界*, 2004, 7 (7): 29-30.
- [13] 孟振, 陈锦剑, 王建华. 基于修正剑桥模型的软黏土中沉桩过程欧拉-拉格朗日耦合模拟分析 [J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51 (3): 263-268.

<http://www.fmhzhly.com/>