

堆载作用下邻近单桩响应的耦合与非耦合分析

Coupled and uncoupled analysis of adjacent monopile's response under surcharge loading

马迪

(陕西师范大学国有资产管理处, 陕西 西安 710119)

摘要: 本文介绍了两种计算堆载对邻近单桩影响的方法: 目前较常用的是将土和桩的响应分开求解的非耦合方法; 另一种为使用显式耦合欧拉-拉格朗日 (CEL) 技术建立数值分析模型。计算并比较了耦合/非耦合方法所得的桩基响应, 并分析其结果差异的原因。此外, 应用 CEL 耦合模型对堆载间距、强度、桩径进行参数敏感性分析得出: (1) 堆载距离单桩越近, 0~5 m 深度内桩的水平位移越大, 桩顶位置尤其突出。间距为 1.0 B 时弯矩最大值相对于间距 0.5 B 减小约 71%、间距为 1.5 B 时弯矩最大值相对于间距 B 减小约 57.3%; (2) 堆载强度增加, 桩身水平位移增加。堆载下沉深度为 0.05 B 时桩基弯矩最大值与下沉 0.1 B 基本一致, 只是弯矩最大值点深度增加; 堆载下沉深度为 0.15 B 时桩基弯矩最大值相对于下沉 0.1 B 增加约 88.3%; (3) 桩径由 0.375 m 增大到 0.75 m 可使桩顶位移减小 82%, 桩基相对弯矩 (M/EI) 最大值减小 73%。

关键词: 堆载; 耦合法; 非耦合法; 耦合欧拉-拉格朗日法; CEL; 数值分析; 土体变形

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 03-0007-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.007

MA Di

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

Abstract: This paper introduces two methods for calculating the effect of surcharge loading on adjacent monopile: the state-of-practice to this problem is an un-coupled approach by solving the soil and pile response separately; the other is an advanced 3D continuum finite element analysis methodology using explicit coupled eulerian lagrangian (CEL) technique, and calculates and compares the pile foundation responses obtained by coupled/un-coupled methods, and analyzes the reasons for the differences in their results. In addition, the CEL coupling model was applied to conduct parameter sensitivity analysis on the surcharge spacing, strength, and pile diameter. It was found that: (1) The closer the stacking distance is, the greater the horizontal displacement of the pile within a depth of 0-5 m, and the more prominent the pile top position. When the spacing is 1.0 B, the maximum bending moment decreases by about 71% relative to the spacing of 0.5 B, and when the spacing is 1.5 B, the maximum bending moment decreases by about 57.3% relative to the spacing of B. The surcharge strength increases, the horizontal displacement of the pile body increases. When the pile foundation sinking depth is 0.05 B, the maximum bending moment of the pile foundation is basically the same as the sinking depth of 0.1 B, but the depth of the maximum bending moment point increases. The maximum bending moment of the pile foundation increases by about 88.3% compared to the settlement of 0.1 B when the depth of pile settlement is 0.15 B. (3) Increasing the pile diameter from 0.375 m to 0.75 m can reduce the pile top displacement by 82%, and the maximum relative bending moment (M/EI) of the pile foundation reduce by 73%.

Keywords: surcharge loading; coupled method; uncoupled method; coupled eulerian-lagrangian method; CEL; numerical analysis; soil deformation

作者简介: 马迪 (1993—), 男, 硕士, 主要从事岩土工程研究等工作。

收稿日期: 2023-03-13

0 引言

目前,堆载对邻近桩基内力与变形的影响通常采用耦合法或非耦合法。下面给出两种方法的简短定义^[1]:

(1) 耦合法:桩和土体响应应用有限元法耦合计算。

(2) 非耦合法:①应用有限元法模型求出桩位处自由场(无桩情况)土体位移;②将所得土体位移施加于桩身,建立桩身挠曲微分方程求解桩身响应(这一步需要另外的程序,例如 LPILE)。

非耦合法又可称为两阶段法^[9],同济大学的梁发云团队^[10-11]在进行土体侧移作用下的桩分析时,主要采用假定桩周土体位移模式的两阶段分析法,采用了包括 LPILE 软件等多种方法进行了尝试。耦合法又可称为整体分析法,由于数值分析方法可以考虑复杂的边界条件和土层变化情况,无疑是一种实用有效的分析方法。姚国圣等^[12]采用 FLAC 3D 软件,分析了土体侧移作用的轴向受荷单桩的承载性状。结果表明:轴向荷载或土体侧向位移的增加对桩身弯矩和内力都会有显著影响。梁玉玮等^[13]针对某城际铁路由于侧向堆载而使桥墩产生变形的案例,利用 PLAXIS 3D 建立堆载-土-结构相互作用有限元模型,分析桩与土的沉降、桩身变形及弯矩、轴力分布规律。

LPILE 是国际上公认的专业计算机程序,它基于 p-y 曲线法分析横向受荷桩,使用有限差分法求解桩的挠曲微分方程,可计算桩的挠度、弯矩、剪切力和土体响应。用户可以输入土体位移随深度变化的曲线作为桩上的附加荷载,这个土体位移可以由任何作用产生的,例如由于斜坡失稳、地震期间的横向扩展和渗透力引起的土体位移。本章使用的土体位移是由 CEL 法模拟堆载作用产生的桩位处水平位移。

为对比上述两种分析方法计算结果的差别,探讨引起其差别的原因,本文首先应用 CEL 法建立堆载作用下的单桩分析模型,获得耦合分析法

的桩基响应。然后采用相同的参数建立无桩地基 CEL 模型,计算后提取桩位处土体位移,输入 LPILE 软件,计算可得非耦合分析法的桩基响应。最后基于 CEL 单桩模型进行了三种参数分析。

1 建立非耦合模型

本节首先采用 CEL 法建立模型模拟堆载下沉对土体的影响。然后提取土体横向位移,应用于 LPILE 软件,计算桩基响应。

1.1 CEL 堆载-土体模型

应用 CEL 方法建立了如图 1 所示的有限元模型。模型的土体中心线对应于第 2 节中的有桩模型的桩位处。堆载平面尺寸为 2 m×2 m,模型上部 1.5 m 的无材料区域允许下部土体抬升。Tho^[2]的研究表明,模型边界距堆载中心距离大于 4.5 B (B 为堆载宽度) 时,可消除边界效应,本模型尺寸按照这个原则设置。模型中心处采用 0.1 m 的细网格,最外侧采用 0.75 m 的粗网格以兼顾计算效率与精度。采用 8 节点六面体单元 (EC3D8R) 模拟欧拉土体区域,4 节点三维刚性单元 (R3D4) 模拟堆载。

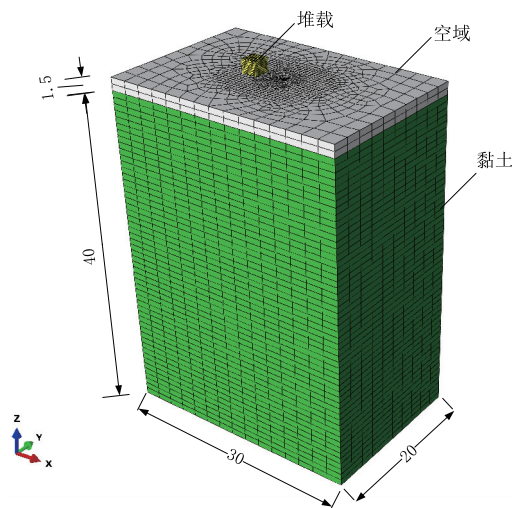


图 1 CEL 模型及网格划分 (单位: m)

Fig. 1 CEL model and mesh

采用 Mohr-coulomb 屈服准则描述土体行为,弹性模量取为 20 MPa,泊松比取 0.49,内摩擦角取 20°,这组参数取自于 Khodair^[3]的文章。

岩土力学

在初始步骤中定义了必要的接触和模型约束，并添加如下所述的后两个分析步骤：

(1) 初始步骤

接触设置采用通用接触。模型侧边界上将横向速度设置为零，而在下边界上限制垂直速度。定义必要的边界条件防止刚性堆载的平动和转动，并指定土体的初始应力状态。

(2) 施加重力荷载

在此步骤开始时给土体施加重力。在没有其他任何荷载的情况下继续计算几秒（分析步时间），以减少由于施加重力而产生的数值波动。

(3) 堆载作用

在数值模拟过程中，堆载将以 0.2 m/s 的速度下沉，Qiu 和 Grabe^[4]证明此速度可以保证计算过程为拟静态过程。

土体初始应力分布如图 2 所示，红色表示最小应力，蓝色表示最大应力，表示土体内部的应力随深度增加。

堆载引起的土体表面变形和土体附加应力分布如图 3 和图 4 所示。

从图 4 可以看到，由堆载引起的附加应力向下向四周扩散，且应力强度逐渐降低，影响深度约为 8 m。

提取不同堆载下沉深度对应的土体中心线处（对应于有桩模型的桩位处）土体位移，如图 5 所示。

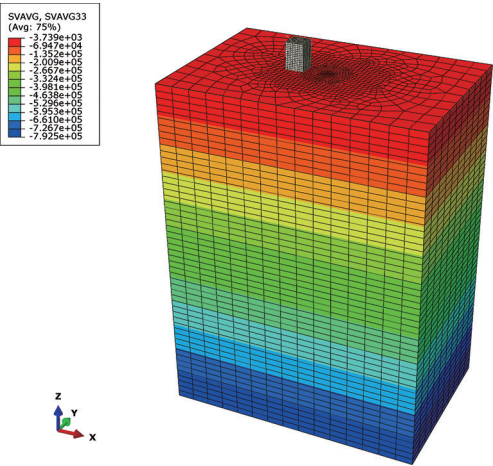


图 2 土体初始应力分布
Fig. 2 Initial stress distribution of soil

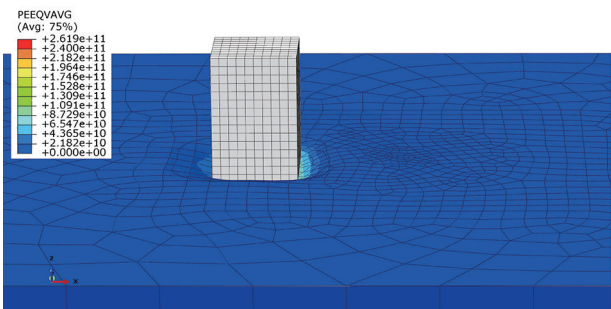


图 3 堆载引起的土体表面变形
Fig. 3 Deformation of the soil surface caused by stacking

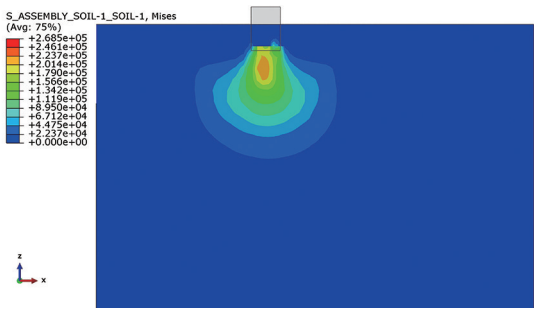


图 4 堆载引起的土中附加应力分布
Fig. 4 Distribution of additional stresses in soil caused by stacking

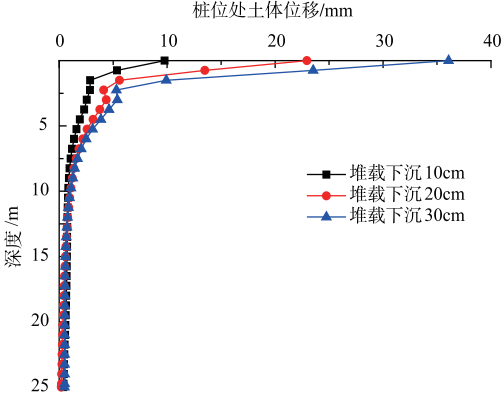


图 5 无桩模型不同堆载下沉深度对应桩位处的土体位移
Fig. 5 Soil displacement corresponding to different pile subsidence depths

由图 5 可知，以堆载下沉深度定性代表堆载强度大小。土体位移随堆载强度的增大而增大，且位移曲线均于地表处产生最大值并随着深度逐渐减小。

1.2 LPILE 模型

在 LPILE 软件中需要输入土层参数，通常包括不排水抗剪强度 c 、应力达到屈服应力的一半时的轴向应变 ε_{50} 、有效重度 γ ，对于岩石还需要单轴抗压强度 q_u 、岩体初始模量 E_r 、岩石质量指标 RQD 。而在 CEL 模型中无法直接应用这些参数。

Khodair^[3]通过多组试算得出在 LPILE 中采用表 1 所述参数,可以与在 CEL 模型中应用 1.1 节中所述土体参数得到最相近的结果。

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

土层	γ /kg/m ³	c /kPa	ε_{50}	q_u /MPa	E_r /GPa	RQD /%
黏土 1	2001.2	47.85	0.009			
黏土 2	1001.2	47.85	0.009			
软岩	2159.3			5.17	3.45	50

在 LPILE 中输入表 1 土层参数、桩基参数和由 1.1 节中 CEL 无桩模型求得的桩位处土体位移,就建立好了桩-土相互作用的模型。计算后提取桩基横向位移,此位移于第 2 节与耦合法计算所得位移进行对比。

2 建立耦合模型

在 1.1 节无桩 CEL 模型的基础上于模型中心处添加一根单桩,土体参数和堆载参数与无桩模型完全相同。图 6 为模型中使用桩基的示意图,桩长 25 m,直径 0.75 m,采用线弹性模型描述桩的行为,弹性模量取 35 GPa,泊松比取 0.15,将桩底部施加固定约束。计算后提取桩基横向位移,此位移于第 3 节与非耦合法计算所得位移进行对比。

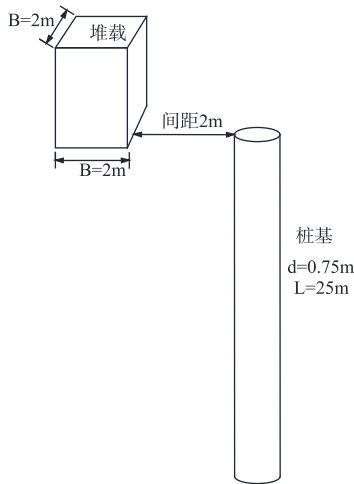
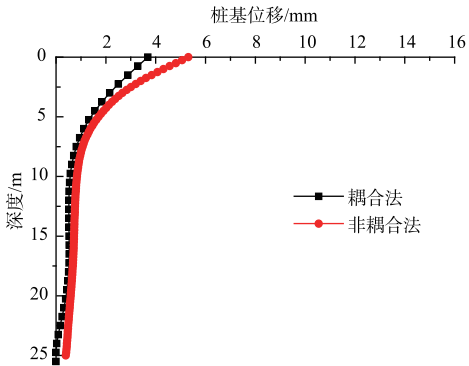


图 6 模型示意图
Fig.6 Model diagram

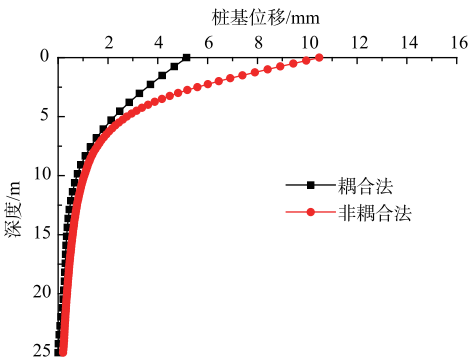
3 耦合与非耦合分析结果对比

本节将非耦合法与耦合法计算结果进行比较,并找出两者产生结果差异的原因。

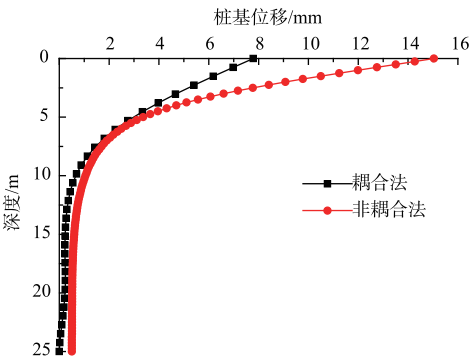
图 7 (a)、7 (b)、7 (c) 分别为堆载下沉 10 cm、20 cm、30 cm 所得耦合法和非耦合法桩身水平位移对比图。可知非耦合法与耦合法计算桩身水平位移规律一致,但在深度 5m 内非耦合方法比耦合方法计算的位移值大,随着堆载下沉,两者差值逐渐增加。



(a) 堆载下沉 10 cm



(b) 堆载下沉 20 cm



(c) 堆载下沉 30 cm

图 7 堆载不同下沉深度对应的桩身位移
Fig.7 Pile displacement corresponding to different sinking depths of stacking

图 8 给出了不同堆载下沉深度对应的非耦合法与耦合法计算所得桩顶水平位移的比值。可以

岩土力学

看出：在堆载下沉 10 cm 时非耦合法桩顶位移计算值约为耦合法的 1.4 倍；堆载下沉 20 cm 时，该比值约为 2.0；堆载下沉 30 cm 时，该比值约为 1.95。即随着堆载的下沉，非耦合法计算的桩顶位移值大致稳定在耦合法计算值的 2 倍左右。

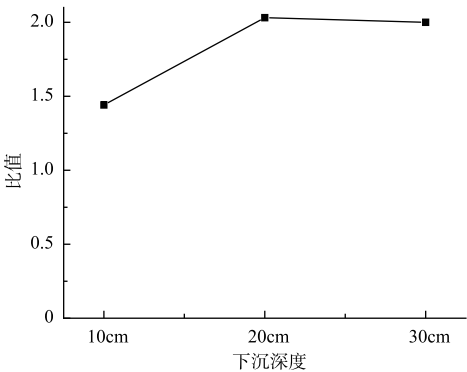


图 8 非耦合法与耦合法计算桩顶位移比值
Fig. 8 The ratio of the top displacement of the uncoupled method and the coupling method

究其原因，LPILE 使用了 Winkler 弹簧^[14]计算方法，这种模型基于这样一种假设，即可以将堆载和土体之间的相互作用以及土体和桩之间的相互作用这两个方面独立解决。其使用的桩位处土体位移是在没有桩的情况下进行计算的，意味着只考虑自由场位移，忽略了桩刚度的影响。随后将此土体位移应用于 Winkler 弹簧的末端，弹簧反作用力将土体位移引起的荷载传递到桩上，并计算桩的响应，此处的力-位移曲线是土体参数和桩参数的函数（进行了必要的简化假设，并未考虑桩周围土体的流动）。

而耦合法 CEL 模型计算时可同时考虑桩土之间的接触、摩擦和桩周围的土体流动，如图 9 所示，模型桩周土体的速度场非常明确的展现了桩周土体的流动现象，由此可知耦合法所得结果小于非耦合法是合理的。

4 基于耦合法的参数敏感性分析

由上一节可知，耦合法模型的计算结果比非耦合法更符合实际情况。本节基于第 2 节中的耦合 CEL 单桩模型进行三种参数分析，探究堆载间距、堆载强度与桩基直径对单桩的影响。

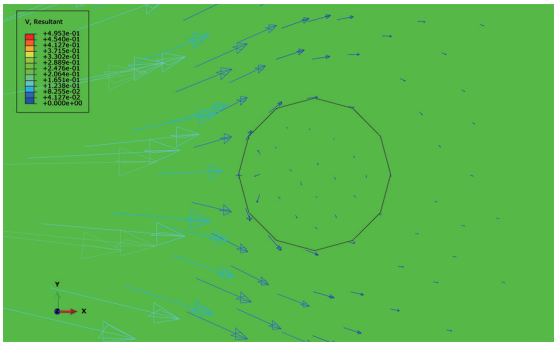


图 9 CEL 耦合模型桩周土的速度场
Fig. 9 The velocity field of the soil around the pile of the CEL model

4.1 堆载-桩基距离

对于实际工程中的邻近堆载与桩基相互作用问题中，堆载与桩基的间距是一个关键因素。由于没有量化间距的系统方法，本节使用间距与堆载宽度（ $B=2\text{m}$ ）的比值代替实际间距。

应用第 2 节中建立的模型，分别计算堆载间距为 $0.5B$ 、 B 、 $1.5B$ 对应的桩基响应，堆载下沉深度均为 $0.15B$ 。计算所得桩身位移、弯矩曲线如图 10 所示。

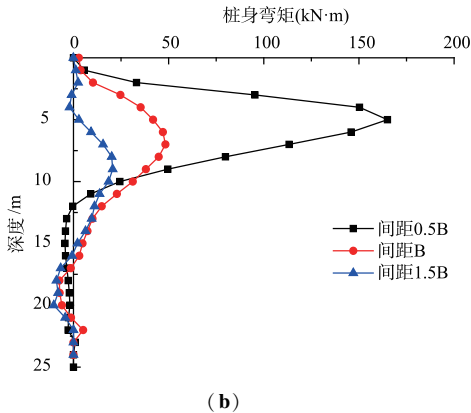
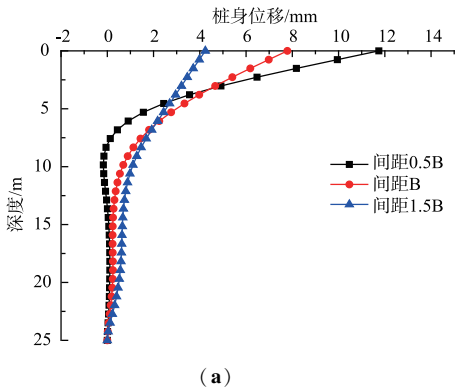


图 10 桩身水平位移与桩身弯矩图
Fig. 10 Horizontal displacement and bending moment of pile body

由图 10 可知, 单侧堆载作用下, 从桩身位移曲线的形式来看, 桩顶水平位移最大, 由上到下逐渐减小。堆载距离桩基越近, $0 \sim 5 \text{ m}$ 深度内桩的水平位移越大, 桩顶位置尤其突出。随着堆载距离的增加, 桩顶水平位移由 11.74 mm 减小到 7.79 mm 和 4.24 mm 。堆载间距的变化对桩身弯矩会产生较大影响, 桩身弯矩随间距的增加而减小。堆载间距 $0.5 B$ 、 B 、 $1.5 B$ 对应的桩基弯矩最大值分别为 $165 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $48.32 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $20.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 分别位于深度 5 m 、 8 m 、 8.5 m 处, 即弯矩最大值点深度随着堆载距离的增大而增加。间距为 B 时桩基弯矩最大值相对于间距 $0.5 B$ 减小约 71% 、间距为 $1.5 B$ 时桩基弯矩最大值相对于间距 B 减小约 57.3% , 即随着堆载距离的增加, 桩基弯矩的最大值非线性减小, 且间距越大, 弯矩最大值的变化量越小。如图 11 所示, 桩顶水平位移与间距大致呈反比关系。深度 $5 \sim 25 \text{ m}$ 范围内桩基变形均小于 3 mm 。

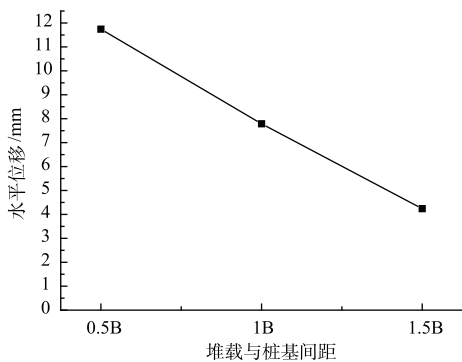


图 11 桩顶水平位移随间距变化图

Fig. 11 Horizontal displacement of pile top with spacing

4.2 堆载强度

由于没有量化荷载的系统方法, 本节以堆载的下沉深度定性代表堆载强度。计算所得堆载下沉深度为 $0.05 B$ 、 $0.1 B$ 和 $0.15 B$ 时的桩身水平位移与弯矩分布分别如图 12、图 14 所示。

由图 12 可知, 从桩身位移曲线来看, 桩的水平位移总体趋势一致, 由桩顶至桩底水平位移逐渐减小。随着堆载下沉深度增加, 桩周土体的水平变形越大, 导致了桩基水平位移的增加。深度 $0 \sim 8 \text{ m}$ 范围内桩基变形较大, 这与图 4 所示堆载

引起的附加应力影响深度一致, $8 \text{ m} \sim 25 \text{ m}$ 范围内桩基变形均小于 1 mm 。堆载下沉深度越大, $0 \sim 8 \text{ m}$ 深度内桩基水平位移越大; 与之相反, $8 \text{ m} \sim 25 \text{ m}$ 深度范围内桩身位移随着堆载下沉深度的增加而减小。

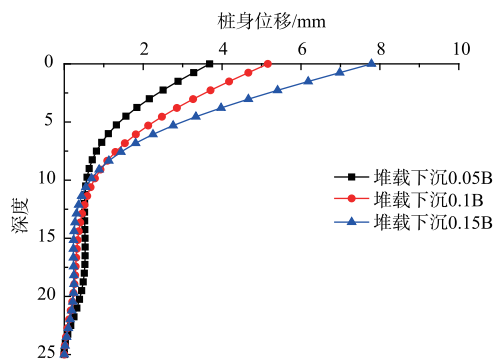


图 12 桩身水平位移曲线

Fig. 12 Horizontal displacement curve of the pile body

堆载下沉深度为 $0.05 B$ 、 $0.1 B$ 和 $0.15 B$ 时的桩顶水平位移分别为 3.68 mm 、 5.16 mm 和 7.79 mm , 从图 13 可以看出, 桩顶水平位移随堆载下沉深度的增加呈非线性增加趋势。

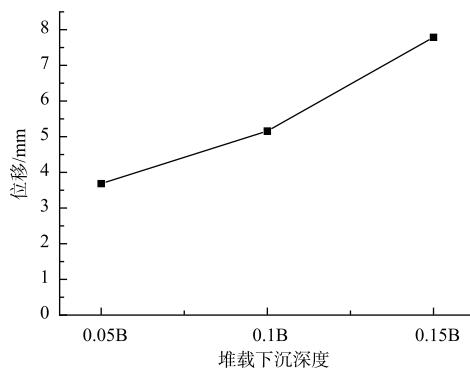


图 13 桩顶水平位移变化

Fig. 13 Horizontal displacement of pile roof

由图 14 可知, 桩身弯矩随堆载下沉深度的增加而增加。堆载下沉量 $0.05 B$ 、 $0.1 B$ 、 $0.15 B$ 对应的桩基弯矩最大值分别为 $25.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $25.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $48.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 分别位于深度 6 m 、 8 m 、 8.1 m 处, 即弯矩最大值点深度随着堆载下沉深度的增大而增加。堆载下沉深度为 $0.05 B$ 时桩基弯矩最大值与下沉 $0.1 B$ 基本一致, 只是弯矩最大值点深度增加; 堆载下沉深度为 $0.15 B$ 时桩基弯矩最大值相对于下沉 $0.1 B$ 增加约 88.3% , 且

岩土力学

最大值深度变化不大。由此可得堆载下沉深度较浅时, 桩基弯矩最大值变化不大, 但最大值点深度增加; 堆载继续下沉, 桩基弯矩最大值急剧增大, 且弯矩最大点的深度基本不变。

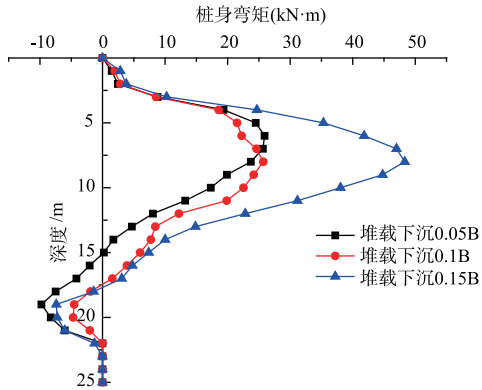


图 14 桩身弯矩曲线
Fig. 14 Pile bending moment curve

4.3 桩基直径

桩基直径常因设计因素的组合而变化。随着桩基直径的增加, 由于堆载引起的土体位移作用在桩身上的侧向荷载也会相应增加。此外, 桩的抗弯刚度 (EI) 也会随桩基直径的增加而显著增加。本节研究桩基直径对桩身水平位移与桩身弯矩的影响。选用的桩直径分别为 0.375 m、0.75 m, 后者的抗弯刚度 (EI) 是前者的 16 倍。

计算所得桩身位移曲线如图 15 所示。将桩基弯矩相对桩抗弯刚度 (EI) 进行了归一化处理, 其结果如图 16 所示。

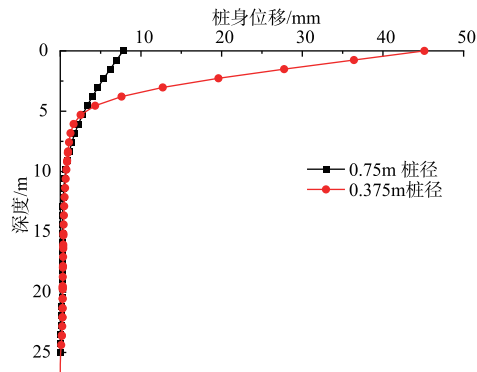


图 15 桩身位移曲线
Fig. 15 Pile displacement curve

从图 15 可以看出: 两种直径的桩在相同的堆载条件下位移均从桩顶到桩端逐渐减小。直径

0.375 m 桩的位移最大为 45 mm, 直径 0.75 m 桩最大为 8 mm。桩径增大一倍可使桩顶位移减小 82%。

从图 16 可以看出: 直径 0.375 m 桩的相对弯矩最大为 0.0011, 直径 0.75 m 桩最大为 0.0003。桩径增大一倍可使桩基相对弯矩最大值减小 73%。

这意味着在高度非线性的土-桩相互作用下, 采用直径较大的桩可以很大程度减小由于堆载引起的桩基响应。

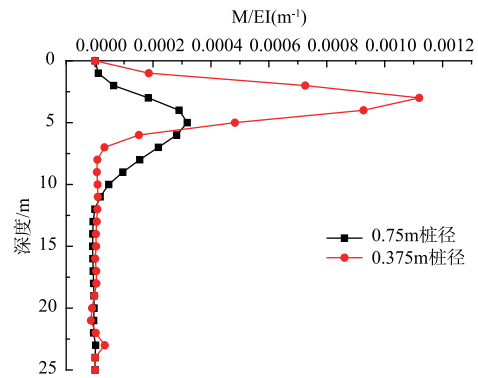


图 16 桩基相对弯矩曲线
Fig. 16 The relative bending moment curve of the pile

5 结论

本文以堆载作用下邻近单桩的响应为研究背景, 采用 Khodair^[3] 提供的土体参数建立了 CEL 耦合单桩模型, 并使用 CEL 无桩地基模型结合 LPILE 软件进行计算, 对比邻近堆载作用下耦合分析法与非耦合分析法计算结果的差异。然后基于 CEL 耦合模型探讨了堆载-桩间距、堆载强度和桩直径对桩身内力和变形的影响。主要结论如下:

(1) 建立堆载作用下无桩地基 CEL 模型, 提取桩位处土体自由位移, 将此横向位移输入 LPILE 软件, 并设置土体、单桩参数, 计算可得非耦合分析法的桩身位移。在上述 CEL 模型中添加单桩并进行计算, 可得耦合分析法的桩身位移。

(2) 将耦合分析与非耦合分析所得桩身位移进行对比, 结果表明: 两者规律基本一致, 但 5 m 深度范围内非耦合法计算结果比耦合法大, 随着堆载强度增加, 前者桩顶位移值大致为后者的 2 倍左右。

从计算原理上分析,主要是由于非耦合法计算桩身响应时需要进行必要的简化假设,例如不考虑桩土之间的接触、摩擦和桩周围的土体绕流,由此可知耦合法可以提供更可靠的桩身响应。

(3) 应用 CEL 耦合分析方法,进行了堆载间距、堆载强度和桩径三种参数的影响分析,结果如下:

堆载距离单桩越近,0~5m 深度内桩的水平位移越大,桩顶位置尤其突出。随着堆载距离的增加,弯矩最大值非线性减小,且间距越大,弯矩最大值的变化量越小;桩身弯矩最大值对应深度随着堆载距离的增大而增加,堆载间距 0.5 B、1.0 B、1.5 B 时分别位于深度 5 m、8 m、9 m 处;

堆载强度增加,桩身水平位移增加。堆载强度较小时,随着堆载的下沉,弯矩最大值变化不大,对应深度增加;堆载继续增大,弯矩最大值急剧增大,但对应深度基本不变;

桩径由 0.375 m 增大到 0.75 m 可使桩顶位移减小 82%,桩基相对弯矩 (M/EI) 最大值减小 73%。表明在高度非线性的土-桩相互作用下,采用直径较大的桩可以很大程度减小由于堆载引起的桩基响应。

参 考 文 献

- [1] ARSLAN, HAYDAR & WONG, P. C. Advanced continuum modeling of pile response to jack-up spudcan penetration [C]. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2014: 506-513.
- [2] THO K K, LEUNG C F, CHOW Y K, et al. Eulerian finite element simulation of spudcan-pile interaction [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50 (6): 595-608.
- [3] KHODAIR Y, ABDEL M A. Numerical analysis of pile-soil interaction under axial and lateral loads [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2014, 8 (3): 239-249.
- [4] QIU G, JÜRGEN GRABE. Numerical investigation of bearing capacity due to spudcan penetration in sand overlying clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49 (12): 1393-1407.
- [5] 马迪. 基于 CEL 方法的堆载对邻近桥梁桩基影响研究 [D]. 中南大学, 2020.
- [6] 陈柯星. 软土地堆载对邻近桩基影响的试验及数值研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [7] 魏丽敏, 李双龙, 杜猛, 等. 基于 CEL 法的静压管桩挤土效应数值分析 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (4): 28-38.
- [8] 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.
- [9] HARRY G. P. Approximate computer analysis of pile groups subjected to loads and ground movements [J]. International Journal for Numerical and Analysis Methods in Geomechanics, 1999, 23: 1021-1041.
- [10] 梁发云, 张浩. 开挖土体侧移作用下被动单桩能量变分分析方法 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (s1): 19-23.
- [11] 梁发云, 韩杰, 李镜培. 基坑开挖引起的土体水平位移对单桩性状影响分析 [J]. 岩土工程学报, 2008 (s1): 260-265.
- [12] 姚国圣, 梁发云, 李镜培, 等. 土体侧移作用下轴向受荷单桩承载性状数值分析 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2011, 39 (1): 1-6.
- [13] 梁玉玮, 边学成, 董亮. 侧方堆载作用下高架桥群桩基础变形分析 [J]. 铁道建筑, 2017, 57 (9): 5-12.
- [14] MATLOCK, H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay [C]. Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, 1970 (4), 577-594.