

文章编号: 1000-7598-(2007)06-1083-08

长期重复荷载作用下土体与邻近桩基相互作用研究

杨敏¹, 周洪波², 朱碧堂¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 广东省建筑设计研究院, 广州 510010)

摘要: 在前人研究的基础上, 基于临界状态土力学理论, 在 Carter 模型中引入临界重复应力的概念形成改进 Carter 模型; 该模型概念明确、参数简单, 可以合理地反映重复加卸载作用下土体主要特性。利用改进 Carter 模型, 编制平面应变有限元程序, 对长期重复加卸载作用下土体与邻近桩基相互作用进行系统分析, 探讨了长期重复加卸载作用下有桩和无桩时土体沉降和侧移的变化规律, 并讨论了软土屈服面衰减系数、临界重复应力水平、邻近桩基刚度等变化时桩土相互作用性状的变化, 得出一些有益的结论。

关键词: 长期重复荷载; 临界状态土力学; 被动桩; 相互作用; 有限元

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study on soil-pile interaction subjected to long-term repeated surcharge loads

YANG Min¹, ZHOU Hong-bo², ZHU Bi-tang¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. The Architectural Design and Research Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510010, China)

Abstract: The characteristics of soils under long-term repeated surcharge loads are discussed in detail by studying the relevant results reported in the references. The concept of introducing critical repeated stress level into the Carter Model is expounded based on the critical state soil mechanics; and the Carter Model is modified. The modified Carter Model can reflect reasonably the main characteristics of soils under long-term repeated surcharge loads. Then, the soil and pile foundation interaction under long-term repeated loading is analyzed in detail using the plane strain FEM program. In the program, the characteristics of soils under long-term repeated surcharge loads are simulated by the modified Carter Model. The law of settlements and displacements of soils and piles under long-term repeated loading is discussed; then the influences of several factors such as the magnitude of θ , critical repeated stress level and pile stiffness, etc., are discussed. Finally, some useful conclusions are drawn.

Key words: long-term repeated loading; critical state soil mechanics; passive pile; interaction; FEM

1 引言

1998年, 上海某工业房屋顶系统发生坍塌, 笔者^[1]通过对堆载作用下地基软土性状的研究, 指出由长期堆载甚至超载引起邻近桩基较大的侧向位移和位移累积是该房屋顶坍塌的主要原因。从该厂房桩基、土体与荷载的相对关系看, 属于被动桩与土体相互作用研究的范畴; 而从土体的受荷特性看, 在局部阶段内土体受到加卸载动态作用, 而从整个厂房的运行过程看, 则受到长期的准静态荷载作用。对于这类问题关键是以下两个问题的研究:

(1) 长期反复荷载作用下土体特性的研究; (2) 受

长期反复荷载作用土体与邻近桩基的相互作用特性研究。上述两类问题不仅在各类工业厂房中普遍存在, 在港口海岸桩基结构、低路堤邻近桩基构筑物、储存石油制品和化学溶剂用的储罐、水塔以及筒仓等方面也屡见不鲜。

各国学者研究表明, 黏性土在长期反复荷载作用下存在与常规静力荷载不同的特性, 主要表现在发生应变累积和孔压累积, 导致黏性土土体软化, 强度降低。在加卸载过程中存在临界循环应力比^[2], 表现出明显的荷载记忆特征。对长期重复荷载作用下土体与结构物相互作用进行分析, 关键在于确定土体累积塑性应变与应力水平、重复荷载作用次数

收稿日期: 2005-07-13 修改稿收到日期: 2005-10-21

基金项目: 上海市科委重点资助基础研究课题 (No. 02DJ14062); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20020247003)。

作者简介: 杨敏, 男, 1960年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程特别是桩基工程方面的教学与研究工作。E-mail: yangmin@mail.tongji.edu.cn

等的函数关系。Carter模型^[3]基于修正剑桥黏土模型,能够反映重复荷载饱和黏土一定特性,但是也存在较大的局限性。进行长期反复堆卸载作用下地基与邻近桩基的相互作用分析时,采用有限单元法相对模型试验和现场原型试验,可以考虑土体材料的非均质、非线性应力-应变关系,而且调节参数容易,能够对影响地基与邻近桩基相互作用的各种因素进行系统地对比分析,是进行长期反复堆卸载作用下地基与邻近桩基的相互作用研究的一种强有力的工具。

本文在Carter模型中引入临界重复应力的概念,形成改进的Carter模型。该模型概念明确、参数简单,可以更加合理地反映重复加卸载作用下土体主要特性。在此基础上,编制平面应变有限元程序,对长期重复加卸载作用下土体与邻近桩基相互作用进行系统的分析,探讨了长期重复加卸载作用下有桩和无桩时土体沉降和侧移的变化规律,并讨论了软土屈服面衰减系数、临界重复应力水平、邻近桩基刚度等变化时桩-土相互作用性状的变化,得出一些有益的结论。

2 土体改进 Carter 模型

2.1 Carter 模型

当饱和黏土在卸荷后,再加荷时将出现新的累积变形。在土体本构模型理论中一般通过弹性卸载阶段屈服面位置和形状的改变来进行描述,如多屈服面模型和边界面模型。

Carter 等人于 1982 年基于修正剑桥模型,提出了一种简单的运动硬化规律来反映土体的卸载屈服特性。在 Carter 模型中,修正剑桥黏土屈服面形状保持不变,屈服面大小由先期固结压力确定,如图 1 所示。当应力状态位于屈服面内时,土体处于弹性状态;当应力状态达到屈服面后,土体进入屈服状态。随着加载的进行,屈服面按照修正剑桥模型变化规律不断扩张。当应力点位于当前屈服面内时,虽然土体处于弹性状态,但视加载和卸载情况,屈服面表现出不同的变化规律:加载时($dp_y \geq 0$),当前屈服面保持变化;卸载时($dp_y < 0$),屈服面按照等向硬化的方式缩小,椭圆中心在 p 轴上发生运动硬化,即硬化参数 p_c 在卸荷过程中不断减小。

Carter 假设弹性卸载时(当土体为弹性($p_y < p_c$)和 $dp_y < 0$),满足下列关系:

$$\frac{dp_c}{p_c} = \theta \frac{dp_y}{p_y} \quad (1)$$

式中: θ 为屈服面衰减参数。

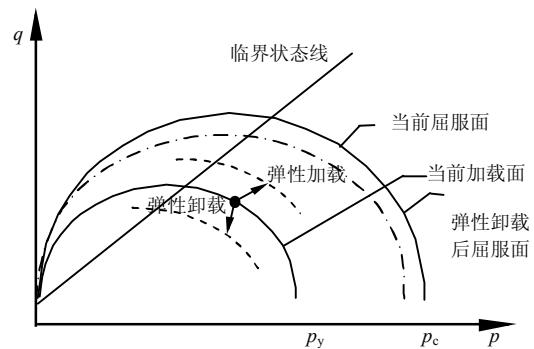


图1 Carter模型屈服面与加载面示意图

Fig.1 The yield surface of Carter model

当土体处于弹性加载阶段时, $dp_y \geq 0$, 屈服面保持不变, 即

$$dp_c / p_c = 0 \quad (2)$$

与多屈服面模型和边界面模型相比, Carter 模型不仅能够反映卸载引起的土体屈服和重复荷载作用下孔隙水压力和塑性应变的累积效应, 而且避免了数值分析过程中每个荷载循环内大量的循环迭代过程, 这对分析研究具有大量重复荷载作用次数的桥梁码头、工业厂房内堆卸载问题、交通荷载路基问题是十分重要的。不过, Carter 模型没有反映临界重复应力^[4]和土体材料的荷载记忆特性, 需要对此加以改进。

2.2 Carter 模型的改进

对 Carter 模型的分析表明, 卸荷量较大或 θ 值过大, 都将得到较低的等效先期固结压力, 过大地估计了卸载反向屈服效应。引入如下假设:

(1) 当应力从较高的水平卸载到临界重复应力水平以下时, 仅有临界应力水平以上的卸载部分引起屈服面的收缩, 小于临界应力水平的卸载应力部分不引起屈服面的收缩。

由文献[4], 临界重复应力水平 r_c 定义为

$$r_c = q_c / c_u \quad (3)$$

式中: q_c 为三轴试验中轴向临界重复偏应力; c_u 为土体不排水抗剪强度。Wroth^[5]基于临界状态土力学理论指出, 土体的不排水强度可按下式确定:

$$\frac{c_u}{p'} = \frac{M}{2} \left(\frac{R}{r} \right)^A \quad (4)$$

式中: R 为超固结比; r 对于剑桥模型取 2.72, 对于修正剑桥模型取 2.0; $A = (\lambda - \kappa) / \lambda$; 其他符号的定义见文献[5]。

将(4)代入(3)式, 可得

$$q_c = r_c c_u = r_c \frac{M p'}{2} \left(\frac{R}{r} \right)^A \quad (5)$$

(2) 当应力水平从小于临界应力水平条件下发生卸载时, 土体表现为弹性卸载。为了分析重超

固结黏土的反复荷载效应, 本文在修正剑桥模型中引入 Hvorslev 面^[6]和无拉边界面, 考虑临界重复应力作用, 构成了改进 Carter 模型, 如图 2 所示。

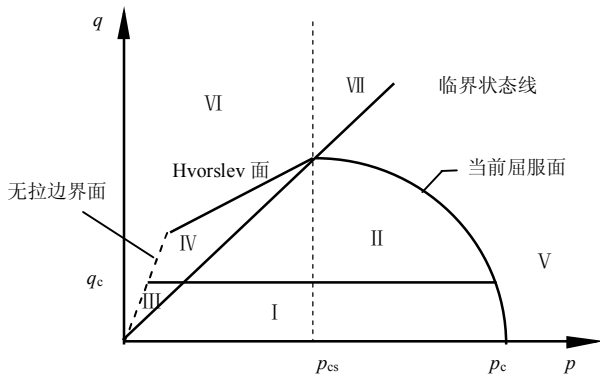


图 2 改进 Carter 模型屈服面

Fig. 2 The yield surface of Modified Carter model

由当前屈服面 (Roscoe 面)、临界状态线、Hvorslev 面、无拉边界面和临界重复应力线可将 $p-q$ 空间划分为 7 个区域, 其性质如下:

I 区: $p_y < p_c, q < M p, q < q_c$, 土体处于弹性状态。当加载时, 土体为弹性加载; 当土体卸载到该区域时, 土体为弹性卸载, 并且土体不发生反向塑性流动和屈服面的收缩。

II 区: $p_y < p_c, q < M p, q > q_c$, 土体处于弹性状态。当加载时, 土体为弹性加载; 当在该区域发生卸载时, 土体为弹性卸载, 但同时土体发生反向塑性流动和屈服面的收缩。

III 区: $p_y < p_{cs}, q > M p, q < q_c$, 土体处于弹性或软化状态。 p_{cs} 为当前屈服面与临界状态线交点的平均法向应力。当 $\Delta p_y > 0$ 时, 土体为弹性状态, 如果土体在该区域发生弹性卸载, 将不发生反向塑性流动和屈服面的收缩; 当 $\Delta p_y < 0$ 时, 土体为软化状态。

IV 区: $p_y < p_{cs}, q > M p, q > q_c$, 土体处于弹性或软化状态。当 $\Delta p_y > 0$ 时, 土体为弹性状态, 如果土体在该区域发生弹性卸载时, 则发生反向塑性流动和屈服面的收缩; 当 $\Delta p_y < 0$ 时, 土体为软化状态。

V 区: $p_y > p_c, q < M p$, 土体发生硬化, 屈服面扩张, 应力状态不存在。

VI 区: $p_y < p_{cs}, q > M p$, 土体发生软化, 屈服面收缩, 应力状态不存在。

VII 区: $p_y > p_{cs}, q > M p$, 土体发生硬化, 屈服面扩张, 应力状态不存在。

改进 Carter 模型与修正剑桥模型屈服准则相同, 流动规律和硬化规律相同, 弹性增量和弹塑性应力-应变关系相同。唯一的区别在于将弹性卸载 (p_y 下降) 与屈服面相关联, 以反映由卸载引起的

反向塑性流动。虽然在卸载过程中土体仍为弹性模型, 但通过屈服面的缩小和后续较大的荷载作用可得到等效的累积塑性变形, 避免了多屈服面和边界面模型中每个荷载循环内的弹塑性迭代过程。同时, 上述模型可以体现土体的荷载记忆原理。大强度记忆原理通过屈服面的不断扩张进行记忆, 当前屈服面即反映了当前受到的较大的荷载水平, 而且也反映了土体当前的塑性应变状态。较大荷载后的重复作用小荷载将引起屈服面的不断降低, 反映了小荷载的累积作用效应; 并通过引入临界重复应力, 当应力水平低于该值时, 并不引起屈服面和土体结构的变化, 因此, 体现了零强度记忆原理。

改进 Carter 模型继承剑桥黏土模型参数少、能够反映土体密度特性对土体性状影响的优点, 而且还能方便地考虑黏土的卸载特性。因此, 可方便地应用于重复加卸载地基与结构物的相互作用分析。

3 有限元分析信息及计算方案的选择

根据改进 Carter 模型, 编制了平面应变有限元程序, 对长期重复加卸载作用下土体与邻近桩基相互作用进行系统的分析, 探讨了长期重复加卸载作用下有桩和无桩时土体沉降和侧移的变化规律, 并讨论了软土屈服面衰减系数、临界重复应力水平、邻近桩基刚度等变化时桩土相互作用性状的变化。

3.1 有限元信息及计算方案的选择

3.1.1 土体材料信息

Bransby 和 Springman^[7]对堆载-土体-桩基相互作用问题进行分析时, 将土层简化成两层, 上层为软土, 下层为较硬软土层或中密砂质土层。由于本文研究课题来源于上海某厂房的坍塌事故, 对上海地区而言, 其基本土层大致为表层为一较硬层, 其下为一定厚度的软土层, 软土层下面为较好土层。故本文基本计算方案的土层取为: 表层厚度为 2.0 m 的超固结土层, 中间为厚度 10.0 m 软土层, 软土层下面为厚度 18.0 m 的硬土层; 如图 3 所示。

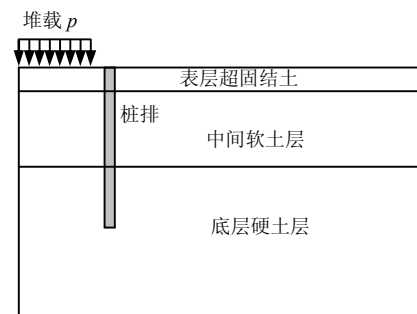


图 3 有限元模型示意图

Fig.3 Calculation model for finite element analysis

对于改进 Carter 模型而言,其主要参数为 λ , κ , M , 以及屈服面衰减系数 θ 、临界应力水平 r_c 。本文进行基本方案分析时 θ 取 0.01, r_c 取 0.85。中间软土层的 λ , κ , M 值按伦敦黏土^[6]取值,各土层的土体参数参见表 1。

表 1 各土层的土体参数表
Table 1 Physico-mechanical properties of soil strata

土层分类	表层超固结土	中间软土层	底层硬土层
λ	0.093	0.161	0.086
κ	0.035	0.062	0.025
$e_0 = \Gamma - 1$	1.060	1.789	0.803
M	0.95	0.888	1.20
泊松比 ν	0.25	0.40	0.25
重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	18.0	18.0	18.0
$\Delta p_c / \text{kPa}$	200.0	0.0	0.0
θ	0.01	0.01	0.01
r_c	0.85	0.85	0.85

注: Δp_c 为增量超固结压力。

3.1.2 计算方案选择

本文主要进行两方面的分析:无桩自由场分析和堆载与临近桩基相互作用分析。土体与桩单元均按二维 4 节点单元进行离散。分析时模型中桩土界面不设置界面单元。不考虑打桩时对土体的影响;不考虑土体的固结效应,按总应力法进行分析。

(1) 无桩自由场

无桩自由场分析的基本方案为:堆载宽度 16.0 m (根据对称性,取一半宽度即 8.0 m 进行分析),堆载大小 100 kPa,软土层屈服面衰减系数 θ 为 0.01, r_c 为 0.85,软土层厚度 10.0 m,反复加卸载次数 $N=50$ 。在此基础上进行以下方案的对比分析:①荷载大小对无桩自由场的影响;②加卸载次数对无桩自由场的影响;③软土层屈服面衰减系数 θ 对无桩自由场的影响;④临界重复应力比 r_c 对无桩自由场的影响。

(2) 堆载与临近桩基相互作用分析

堆载与临近桩基相互作用分析的基本方案其他条件同无桩自由场分析,不同之处在于在离堆载边缘净距 1.0 m 处设置一排桩,桩身等效弹性模量 E_p 为 1.0×10^7 kPa,桩长 20.0 m,桩排宽度为 1.0 m,如图 3 所示。在此基础上进行以下方案的对比分析:①进行有桩和无桩状态土体变形场对比分析;②桩身刚度变化对被动桩桩身水平侧移的影响;③桩身离堆载区边缘距离变化,对被动桩桩身水平侧移的影响;④软土层厚度对被动桩桩身水平侧移的影响;⑤桩头约束条件对被动桩桩身水平侧移的影响。

3.2 无桩自由场分析

受土体位移作用的桩基分析过程,是一个复杂的桩土相互作用过程。根据目前被动桩的研究现状看,如果能够准确预测自由场(无桩时)土体位移,则桩土相互作用的性状就可以通过分析得出^[8],因此自由场中土体位移的确定是研究受土体位移作用桩基的关键。下面采用平面应变有限元程序对长期反复堆卸载作用下地基进行无桩自由场分析,对不同因素影响下的自由场中土体侧移的分布模式进行探讨。

3.2.1 堆载作用下地基无桩自由场分析

地基土在堆载作用下土体应力状态发生变化,同时发生沉降和水平位移。随着荷载的变化,其变形大小也将发生变化。

图中 $N=1$ 表示加卸载次数等于 1,下同。从图 4 中可以看出,荷载越大,中心沉降越大。沉降变形主要发生在中间软土区,表层超固结黏土层和底层硬土层沉降变形很小。在中间软土区,随着深度的增大,单位深度的沉降变形逐渐降低。这是由于中间软土区为正常固结黏土,深度越大其上覆土压力值越大,初始孔隙比随深度增加而降低,导致沉降变形速率随深度降低。从图 5 中可以看出,加

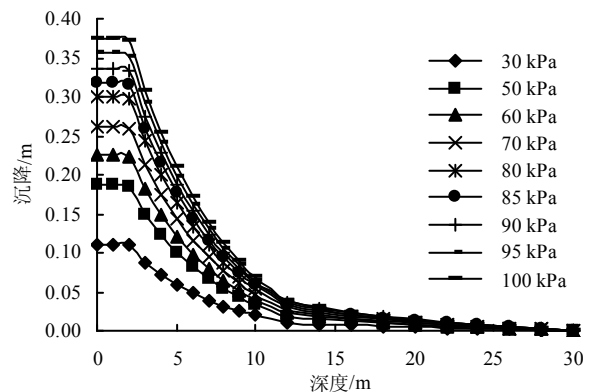


图 4 堆载中心沉降深度变化图 ($N=1$)

Fig.4 Settlement curves of the center of loading area (No. 1)

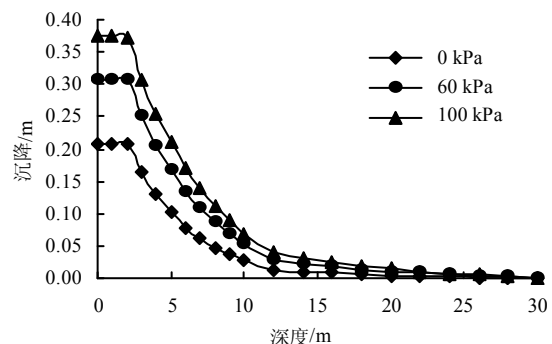


图 5 卸载时堆载中心沉降沿深度变化图 ($N=1$)

Fig.5 Settlement curves of the center of loading area at unloading (No. 1)

载到 100 kPa 再卸载到 0, 堆载中心残余沉降占到总沉降的 1/2 以上。

从图 6 中可以看出, 土体侧移主要发生在中间软土层, 形状近似于双曲线型分布, 而底层硬土层几乎不发生水平侧移。随着荷载的增大, 软土层土体侧移不断增大, 最大位移大致出现在软土层以下深度 25%~30% 的地方。而在土体表层, 发生相对于堆载区向内的侧向位移, 这和 Desai^[9, 10] 等人采用修正剑桥模型和帽盖模型的计算结果一致, 主要原因在于加载过程不发生体积膨胀的缘故。图 7 为卸载时堆载区边缘土体水平位移沿深度变化图, 从图中可以看出, 加载到 100 kPa 再卸载到 0, 堆载区边缘土体残余水平位移约占总侧移值的 1/4。

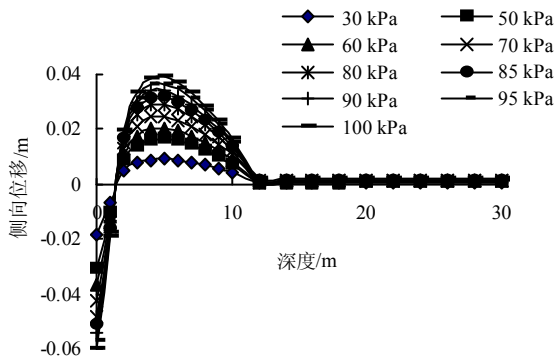


图 6 堆载区边缘土体侧移沿深度变化图($N=1$)

Fig.6 Displacement curves of the side of loading area (No. 1)

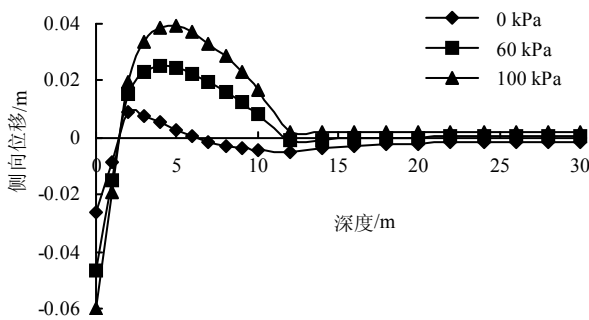


图 7 卸载时堆载区边缘土体侧移沿深度变化图($N=1$)

Fig.7 Displacement curves of the side of loading area at unloading (No. 1)

从图 8 中可以看出, 从堆载区边缘开始, 距离堆载区边缘 1.0 m 的水平侧移值略大于堆载区边缘, 然后随着距离的增大, 中间软土区土体的水平侧移逐渐减小, 而且随着距离的增大, 软土区土体水平侧移最大值出现的位置逐渐下移。由于中间软土区土体的水平最大侧移值约出现在离堆载区边缘 1.0 m 处, 因而下文进行被动桩桩土相互作用分析中将桩排设置于离堆载区边缘 1.0 m 处。

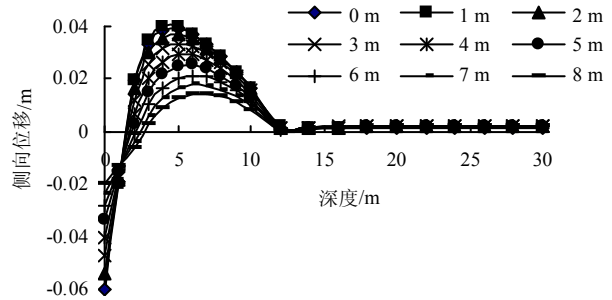


图 8 堆载区外侧水平侧移-距离变化曲线 ($N=1$)

Fig.8 Displacement curves at different place (No. 1)

3.2.2 反复加卸载次数变化的影响

一般来说, 对于土体而言, 反复加卸载次数增加, 将引起土体塑性变形增加, 位移增大。下面讨论反复加卸载次数变化对无桩自由场的影响。

从图 9 和图 10 两图中可以看出, 随着反复加卸载次数的增加, 堆载边缘侧移也不断增加, 在堆载边缘侧移最大值半对数坐标变化图上呈现加速增加的规律, 说明反复加卸载次数的变化对堆载中心沉降的影响是非常大的, 在工程实践中有必要考虑其影响。

3.2.3 软土层屈服面衰减系数 θ 的影响

在改进 Carter 模型中, 屈服面衰减系数 θ 对卸载过程中屈服面的衰减和下一次加载过程中塑性应变的累积起着至关重要的作用。下面探讨软土层屈

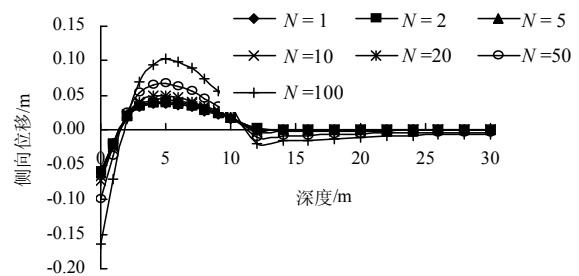


图 9 不同反复加卸载次数-堆载区边缘侧移沿深度变化图

Fig.9 Displacement curves at different loading numbers

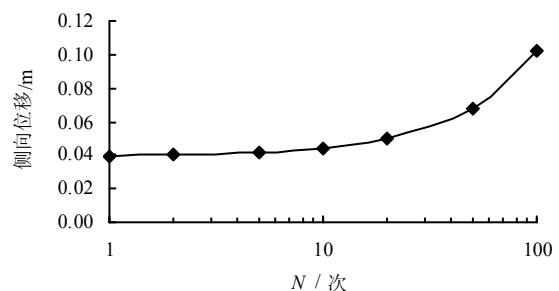


图 10 反复加卸载次数-堆载边缘最大侧移变化图

Fig.10 Maximum displacements at the side of loading area vs. loading number

服面衰减系数 θ 变化对无桩自由场的影响。

从图 11 和图 12 中可以看出, 随着软土层屈服面衰减系数 θ 的增大, 堆载边缘最大侧移值不断增大, 增大的速率十分迅速, 说明土体的屈服面衰减系数 θ 对反复加卸载作用下的地基变形场的影响是非常显著的。

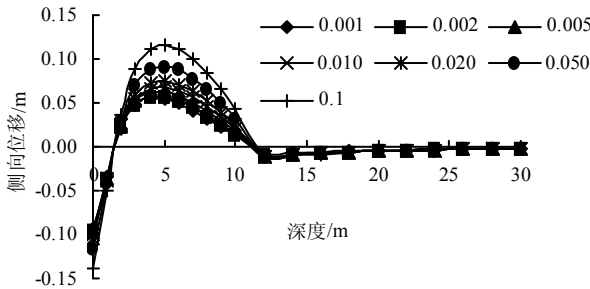


图 11 不同 θ 值—堆载边缘侧移沿深度变化图 ($N=50$)
Fig.11 Displacement vs. different θ ($N=50$)

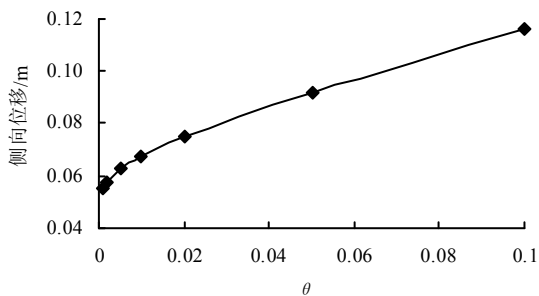


图 12 不同 θ 值—堆载边缘最大侧移变化图 ($N=50$)
Fig.12 Maximum displacement vs. different θ ($N=50$)

3.2.4 软土层临界重复应力比 r_c 的影响

土体的临界重复应力比 r_c 反映了土体在低于临界重复应力水平的反复荷载作用下塑性应变不累积的特性, 作用于土体的反复荷载只有超过临界重复应力水平才能引起塑性应变的累积。下面讨论软土层临界重复应力比 r_c 变化对无桩自由场的影响。

从图 13 和图 14 中可以看出, 随着软土层临界循环应力比的增大, 堆载区边缘土体侧移逐渐减小, 当临界循环应力比大于一定值时, 其减小的幅度将

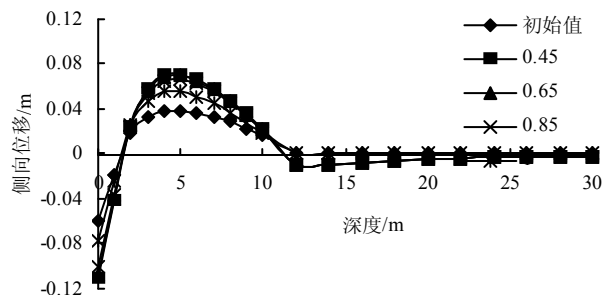


图 13 不同临界循环应力比—堆载边缘侧移变化图 ($N=50$)
Fig.13 Displacement vs. different r_c ($N=50$)

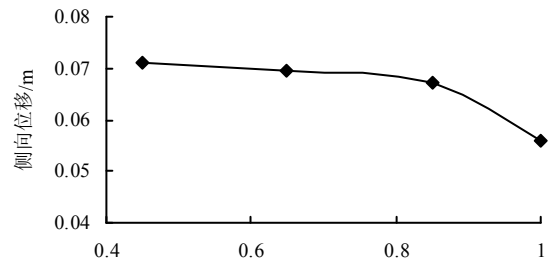


图 14 不同临界循环应力比—堆载边缘最大侧移变化图 ($N=50$)
Fig.14 Maximum displacement vs. different r_c ($N=50$)

增大。这是因为当土体临界循环应力比大于所施加的应力水平时, 将不引起屈服面的收缩, 也即不引起塑性应变的累积, 导致堆载边缘土体侧移值的减小。

3.3 地基与桩相互作用分析

采用平面应变有限元进行长期反复堆卸载作用下地基与桩相互作用分析时, 桩体等效为板桩^[11]。本文模拟在堆载区边缘净距 1.0 m 处设置一排边长 1.0 m、间距 3.0 m 的方桩, 桩身弹性模量为 3.0×10^7 kPa, 泊松比为 0.167, 桩长 20.0 m, 桩头自由。板桩等效弹性模量为 1.0×10^7 kPa。土体参数同无桩自由场分析。

3.3.1 有桩和无桩状态土体变形场对比分析

堆载与临近桩基发生相互作用, 会导致桩身发生侧移, 引起附加应力和弯矩, 同时由于桩基的遮拦作用, 堆载区的变形场将发生相应的变化。

从图 15 和图 16 两图中可以看出, 由于临近桩基的遮拦作用, 不同反复加卸载次数时堆载区中心沉降均有一定程度的下降, 堆载区边缘软土区的侧移则大幅度下降。图 17 为长期反复堆卸载作用下不同反复加卸载次数时单排桩桩身位移变化图。从图中可以看出, 由于临近堆载的作用, 桩身产生一定的水平位移, 最大位移值和无桩时软土区土体的最

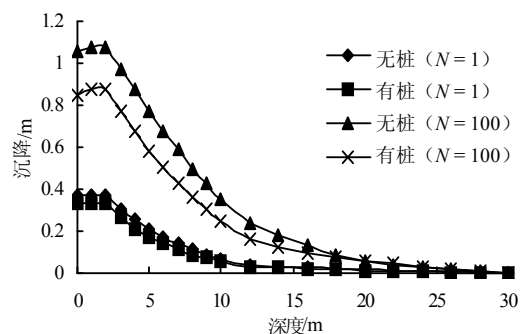


图 15 有桩无桩堆载中心沉降沿深度对比图
Fig.15 Settlements of the center of loading area

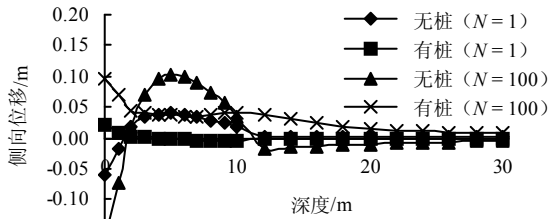


图 16 有桩无桩堆载区外侧水平侧移对比图
Fig.16 Displacements at the side of loading area

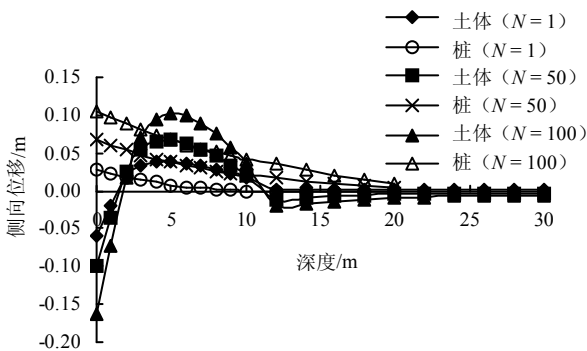


图 17 反复加卸载次数—单排桩桩身位移变化图
Fig.17 Pile displacements vs. loading number

大侧移值保持一致; 和无桩桩周自由场土体位移分布模式不同的是, 由于桩身刚度较大, 桩身最大位移出现在桩头。和无桩自由场一样, 随着反复加卸载次数的增加, 桩身水平位移值也相应增大。

3.3.2 桩身刚度变化的影响

一般来说, 当桩身刚度变化时, 其对临近土体的遮拦作用也相应发生变化。下面讨论当桩身等效弹性模量由 1.0×10^7 kPa 变为 1.0×10^6 kPa 时的影响。

从图 18 中可以看出, 与无桩自由场比较, 随着桩身刚度的增大, 桩身侧移减少明显, 说明桩基的遮拦作用也更加显著。因此, 采用提高桩身刚度的方法来降低桩身侧向位移量在一定程度上是可行的。

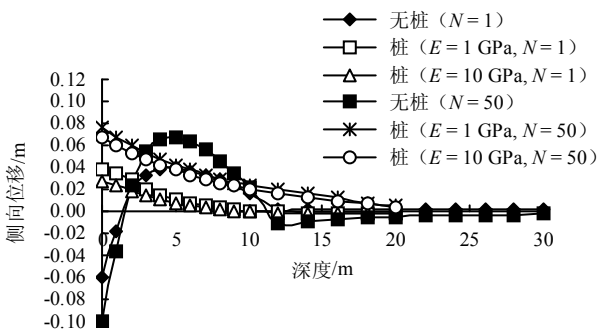


图 18 不同桩身刚度土体和桩身侧移对比图
Fig.18 Displacement curves at different pile stiffnesses

3.3.3 桩身离堆载区边缘距离变化的影响

从图 19 中可以看出, 随着桩身离堆载区边缘距离的增大, 桩身侧移也相应减小, 其所受反复加卸载作用的影响也随之降低, 桩基所能发挥的遮拦作用也相应减小。

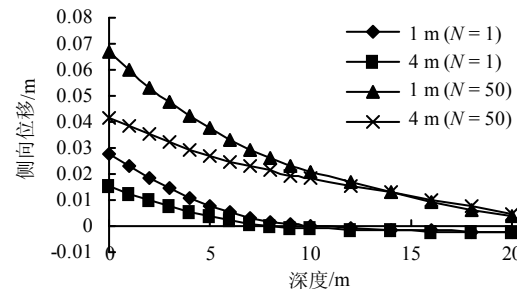


图 19 桩身离堆载区边缘距离变化时桩身侧移对比图
Fig.19 Displacement curves at different pile distances

3.3.4 软土层厚度变化的影响

在 3 层土体模型中, 当软土层厚度变化时, 将引起堆载区沉降和边缘区边缘侧移较大的变化, 进而对临近桩基的性状产生影响。

从图 20 中可以看出, 随着软土层深度的增加, 临近桩基桩头位移值也相应增加, 这和无桩时软土层深度变化引起堆载区沉降和边缘区边缘侧移变化规律一致。从图中还可以看出, 随着软土层深度的增加, 其所引起的桩头侧移增加速率逐渐降低。这是因为, 本文模型中软土区和底层土体均为正常固结土体, 随着深度的增加, 土体的上覆固结压力也相应增加, 初始孔隙比减小。在较大的固结压力作用下, 同一深度土体不同时其初始孔隙比差值也相应减小, 从而导致相同荷载作用下的深度较大处土体的变形不如上部土体显著, 进而引起的桩头侧移增加速率逐渐降低。

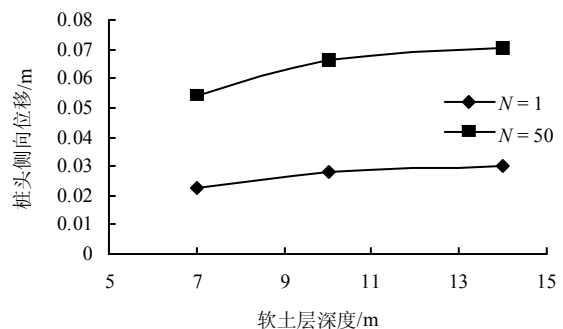


图 20 不同软土层深度桩头位移对比图
Fig.20 Displacements at pile head vs. different soft soil depths

3.3.5 桩头约束条件变化的影响

对于临近桩基而言, 桩头约束条件不同, 其对

临近土体的遮拦作用也不相同, 桩身所受临近反复加卸载土体的压力和产生的弯矩也会有发生变化。

从图 21 中可以看出, 桩头固定时桩身侧移值小于桩头自由时的侧移值。随着反复加卸载作用的增加, 这种差别越来越大。

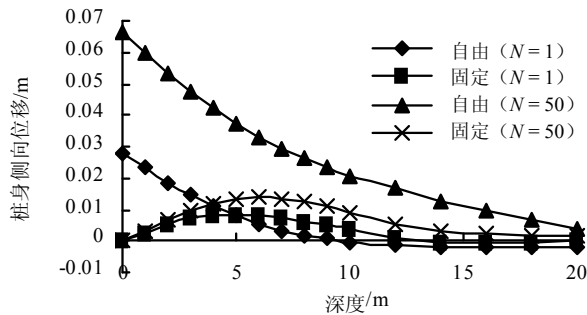


图 21 桩头约束条件不同时桩身侧移对比图

Fig.21 Displacement curves at different pile head conditions

4 结 论

本文在 Carter 模型基础上, 提出能够反映重复加卸载作用下土体主要特性的改进 Carter 模型。该模型不仅可以继承剑桥黏土模型参数少、能够反映土体密度特性对土体性状影响的优点, 而且还能方便地考虑黏土的卸载特性。在此基础上, 利用自编土工有限元分析程序对长期反复堆卸载作用下地基的土体变形以及桩土相互作用进行系统的数值分析, 初步发现:

(1) 地基土在堆载作用下发生沉降和水平位移, 随着荷载的增加, 其堆载中心沉降和堆载区边缘土体水平侧移随之增大; 而且随着反复加卸载次数的增加, 堆载中心沉降和堆载区边缘土体水平侧移迅速增大, 同时反复加卸载次数的变化只会引起塑性变形的累加, 而与弹性变形无关。堆载中心沉降和堆载区边缘土体水平侧移值的大小和中间软土区的性质密切相关, 当中间软土区的屈服面衰减系数 θ 增大时, 相同的反复加卸载次数所引起的附加变形也随之增大; 而软土层临界重复应力比 r_c 的增大时, 则引起相同的反复加卸载次数下附加变形降低。

(2) 当堆载区临近设置桩基时, 由于堆载与临近桩基发生相互作用, 引起堆载中心沉降和堆载区边缘土体水平侧移降低, 临近桩基刚度越大, 降低的幅度越大, 这种趋势不随反复加卸载次数的变化而发生变化。同时在反复加卸载作用下引起临近桩基桩身发生侧移, 桩基刚度越大, 桩身侧移越小; 随着反复加卸载次数的增加, 桩身的附加侧移值也

越来越大。

参 考 文 献

- [1] 杨敏, 朱碧堂, 陈福全. 堆载引起某厂房坍塌事故的初步分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 446—450.
YANG Min, ZHU Bi-tang, CHEN Fu-guan. Pilot study on collapse of an industrial building due to adjacent surcharge loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(4): 446—450.
- [2] 汪文韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [3] Carter J P, Pande G N, Zienkiewicz O C, et al. A critical state soil model for cyclic loading. Soil mechanics—transient and cyclic loads[M]. New York: Wiley, 1982. 219—252.
- [4] Sangrey D A, Henkel D J, Esrig M I. The effective stress response of a saturated clay soil to repeated loading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1969, 6: 241—252.
- [5] Wroth C P. The interpretation of in situ soil tests[J]. *Geotechnique*. 1984, 34(4): 449—489.
- [6] Atkinson J H, Bransby P L. The Mechanics of Soils: An Introduction to Critical State Soil Mechanics[M]. London: McGraw Hill, 1978.
- [7] Bransby M F, Springman S M. 3-D finite element modeling of pile groups adjacent to surcharge loads[J]. *Computers and Geotechnics*, 1996, 19(4): 301—324.
- [8] Guo W D, Lee F H. Load transfer approach for laterally loaded piles[J]. *International Journal Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2001, 25(11): 1 101—1 129.
- [9] Desai C S, Phan H V, Sture S. Procedure, selection and application of plasticity models for a soil[J]. *International Journal Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 1981, 5: 295—311.
- [10] Siriwardane H J, Desai C S. Computational procedures for non-linear three-dimensional analysis with some advanced constitutive laws[J]. *International Journal Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 1983, 7: 143—171.
- [11] 陈福全. 地面堆载作用下邻近桩基性态数值分析[博士后论文 D]. 上海: 同济大学, 2003.