

doi:10.3799/dqkx.2011.060

# 饱和软土地基中 PHC 群桩贯入过程的能量耗散模型

刘 镇<sup>1,3</sup>, 周翠英<sup>2,3\*</sup>

1. 中山大学海洋学院, 广州 510275

2. 中山大学工学院, 广州 510275

3. 中山大学岩土工程与信息技术研究中心, 广州 510275

**摘要:** 软土地基中群桩稳定性分析是岩土工程的难点之一。通过对饱和软土地基中群桩贯入全过程的力学分析, 结合群桩效应与工作性能, 根据功能平衡原理, 建立了贯入过程中附加应力(含超静孔隙水压力)引起的耗散能量与外力做功、弹性势能三者的平衡关系; 同时, 针对饱和软土地基中高预应力管桩(PHC)的排土特性, 结合现行桩基规范, 分别给出了超静孔隙水压力势能、挤土耗散能、重力做功、超静孔隙水压力做功、摩擦耗能、土体弹性势能等的定量表达, 构建了 PHC 群桩贯入过程的能量耗散模型; 在此基础上, 导出了局部能量安全系数与整体能量安全系数。将上述模型应用于某工程 PHC 群桩基础的稳定性分析中, 并与数值模拟结果对比, 验证了该模型的合理可靠性, 对饱和软基中 PHC 群桩稳定性状态的判别具有一定指导意义。

**关键词:** 饱和软土地基; PHC 群桩; 岩土工程; 能量耗散模型; 稳定性分析。

**中图分类号:** TU753.3

**文章编号:** 1000-2383(2011)03-0587-07

**收稿日期:** 2010-05-20

## The Energy Dissipation Model of PHC Pile Group for Penetration Process in Saturated Soft Soil Foundation

LIU Zhen<sup>1,3</sup>, ZHOU Cui-ying<sup>2,3\*</sup>

1. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

3. Research Center of Geotechnical Engineering and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

**Abstract:** Stability analysis of pile group in soft soil foundation is one of the difficult issues challenging geotechnical engineering. According to Energy Balance Principle, the equilibrium relationship among dissipation energy caused by additional stress (including excess pore water pressure) in penetration process, external work and Elastic Potential Energy is established, based on mechanical analysis of the whole process of pile group penetration test in soft soil foundation, combined with pile group effect and working performance of pile group. Meanwhile, quantitative expressions of potential energy of excess pore water pressure, soil-compacting dissipated energy, work of gravity, work of excess pore water pressure, friction energy dissipation and elastic potential energy of soil are given in accordance with the soil-compacting characteristic of pipe pile prestressed high strength and current code of pile foundation design, and energy dissipation model of PHC pile group in penetration process is constructed. Furthermore, the safety factor of local energy and total energy is derived on the basis of above-mentioned work. The reliability of the energy model is verified by its application to the stability analysis of PHC pile group foundation in a project and the comparison with the numerical simulation results, which is of significance for guiding discrimination of the stability of PHC pile group in soft soil foundation.

**Key words:** saturated soft soil foundation; PHC pile group; geotechnical engineering; energy dissipation model; stability analysis.

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(No. 41030747); 国家自然科学基金面上项目(No. 40672194); 国家“863”高技术计划项目(No. 2007AA11Z112); 教育部博士学科点基金项目(Nos. 2006055806, 20090171110044); 广东省自然科学基金重点项目(Nos. 06104932, 013188); 广东省科技计划项目(No. 2010A030200007); 广东省高层次人才计划项目(No. 39000-5221001); 广州市科技支撑计划项目(No. 2010GN-D00011), 中山大学后备重点课题(No. 1132169)。

**作者简介:** 刘镇(1982-), 男, 博士, 从事岩土工程研究。\* **通讯作者:** 周翠英, E-mail: zhoucy@mail.sysu.edu.cn

软土地基中群桩的稳定性分析及其工作机制一直是岩土工程研究的难点之一。而现有的设计理论、规范主要依据单桩效应的叠加对其稳定性进行分析,并未从整体上充分考虑桩—土—水的相互作用与协调工作。目前研究主要集中在桩—土的相互作用,其分析方法主要有 4 大类(陈登伟,2005;张国亮,2005):弹性理论法、荷载传递法、剪切位移法和有限单元法。弹性理论法(邹春华等,2009)的优点是考虑了土体的连续性,不足在于计算较复杂,并将地基土看作是理想的弹性体,而实际上,大多数土的非线性和弹塑性等特性与应力状态、应力路径、时间效应等因素相关,适用性有较大局限;荷载传递法(杨桦和杨敏,2006)的优点是传递函数能很好地反映桩土间非线性性状及成层地基问题,不足在于未考虑土体的连续性,且传递函数较难确定,难以广泛应用于群桩的共同作用分析中;剪切位移法(宰金珉等,2002)的优点是同样考虑了桩土间非线性性状,不足在于人为假定过多,且未考虑桩土之间的相对位移和桩侧土体上下层之间的相互作用,与实际中桩的工作性状存在一定差异,属近似解析解;有限单元法(卓杨等,2009)的优点是可方便地反映岩土材料的复杂本构关系,应用最为广泛,不足在于参数选取和定量分析上仍存在较大不确定性与人为性。

本文在系统总结前人研究成果基础上,分析了饱和软土地基中群桩贯入过程的力学效应,根据功能平衡原理,建立了贯入过程中附加应力(含超静孔隙水压力)引起的耗散能量、外力做功和弹性势能三者的平衡关系;并针对饱和软土地基中 PHC 管桩的排土特性,结合现行桩基规范,构建了 PHC 群桩贯入过程的能量耗散模型,导出了局部能量安全系数与整体能量安全系数;并以某桩基工程为例进行了验算分析。

## 1 饱和软基中群桩贯入过程的力学效应

饱和软土地基中,群桩贯入过程的力学效应主要体现在桩—土—水的相互作用中。

桩—土相互作用主要体现在桩—土之间的相互摩擦。由于群桩中各桩传布的应力相互重叠,使得传布范围变大变深,产生的附加应力变大;而这种附加应力也会使土体发生沉降,同时这种沉降又会导致群桩的下沉。

群桩条件下水—土相互作用主要体现在两方面:(1)水对土体有浮力作用,其相当于对桩与土垂

直载荷的卸载(姚俊玲和章东鸿,2004);(2)饱和软土地基的渗透性很低,桩的贯入过程可看作是一个不排水过程,在贯入过程中,桩要排开同体积的土体并产生很大的应力增量,根据有效应力原理,这种应力增量会导致较高的孔隙水压力(唐世栋等,2003),即超静孔隙水压力,从而引起土体的变形和沉降。

群桩—土的相互作用除水浮力对群桩的卸载外,还会在贯入过程中由于扩孔的作用产生超静孔隙水压力,超静孔隙水压力将转化到土体中的附加应力,最后通过桩—土相互作用导致群桩的进一步下沉。

## 2 PHC 群桩贯入的能量耗散模型

根据饱和软土地基中群桩贯入过程的力学效应,充分考虑沉桩过程与桩—土—水的相互作用,针对 PHC 群桩的排土特性,由功能平衡原理可知:PHC 群桩贯入过程的外力(包括重力)做功,通过桩—土摩擦、桩土体变形分别转化为摩擦耗散能、弹性势能;而弹性势能是作为可恢复的多余能量储存在桩土体中的,当群桩系统充分发挥作用时,应不存在多余的储存能量。因此,可通过分析外力所做功是否完全转化为摩擦耗散能来判断群桩系统是否充分发挥作用。下面通过构建饱和软土地基中 PHC 群桩贯入过程的能量耗散模型,导出能量安全系数,分析 PHC 群桩进行稳定性。

### 2.1 能量耗散模型

沉桩过程中,整个群桩—土—水相互作用系统具有的初始机械能主要来自于外力沉桩所做的功。由于地基土受到桩的挤压作用,加之桩—土摩擦,则外力给予系统的能量将主要转变为挤土产生位移所需的能量与超静水压力势能。

沉桩完成后,由于群桩与上部结构的重力作用使得群桩发生沉降,将再次导致桩—土之间的摩擦,引起土体中的附加应力(包括超静孔隙水压力),从而引起土体的进一步沉降。从功能转换的角度看,重力势能一部分转化为摩擦耗散能,另一部分以弹性势能的形式储存在土体中。同时,由于饱和软土中超静孔隙水压力消散十分缓慢,其积累到一定程度就会导致土体中产生裂缝(“水裂”作用),从而不让超静孔隙水压力无限增大。水裂过程中除去消耗的能量,剩余能量则转化到土体中:一部分引起了竖直方向上的桩—土沉降,最后由桩—土间的摩擦消耗掉;另一部分在桩周土的径向消散了,随孔隙水的流动

逐渐降低超静水压力势能,而这是超静孔隙水压力的主要消散过程(姚俊玲和章东鸿,2004)。

根据上述分析,整个群桩-土-水相互作用系统中外力做的功,其一部分由桩-土摩擦转化为内能,即消耗能量;另一部分以机械能(主要为弹性势能)的形式储存起来,即储存能量.因此,按工后初始状态计算,根据功能平衡原理,可将整个系统的外力(包括重力)做功  $W_F$  (不包括转化为弹性势能的部分)与由摩擦力转化来的内能  $E_f$  进行比较,来分析群桩的稳定性:

(1)若  $E_f = W_F$ ,则说明外力所做功  $W_F$  通过摩擦完全转化为内能,整个系统未产生多余能量,群桩系统充分发挥了作用,处于稳定状态;(2)若  $E_f < W_F$ ,则说明外力所做功  $W_F$  超过了摩擦转化的内能,而实际上能量是守恒的,即按照初始状态计算,整个系统通过摩擦产生的能量  $E_f$  无法与  $W_F$  达到平衡,也就是说,整个系统没有产生可供平衡的摩擦,局部出现了与土分离的情况,如:单桩或承台出现异常,造成摩擦减少.这种桩-土分离的情况对群桩来说已属局部失稳,将会影响群桩工作性能的发挥.因此,  $E_f < W_F$  时整个系统可能出现局部破坏;(3)若  $E_f > W_F$ ,则说明摩擦转化的内能  $E_f$  超过了外力所做功  $W_F$ ,而实际上能量是守恒的,即按照初始状态计算,整个系统通过摩擦产生了多余能量,只有通过增加外力做功  $W_F$ ,才能最终达到能量守恒;而以后外力做功要增大,意味着整个系统将产生更大的位移,以达到平衡状态.但这种平衡对系统来说已是失稳后的平衡,失去了群桩的意义.因此,  $E_f > W_F$  时整个系统可能出现整体失稳。

实际工程中,基于各种控制参数(如位移、承载力等)的群桩安全稳定分析一般用安全系数来表述,其是一个范围,而不是一个值,因此,群桩系统能量平衡亦应有一个安全系数,且也是一个范围:

(1)对于局部破坏的控制,需要增大单桩的竖向承载力与水平承载力、桩的抗裂等,这样局部摩擦与容许位移都要增大,摩擦转化的内能  $E_f$  要增大,相当于按照初始状态进行计算得到的  $E_f$  要乘以一个系数  $K_f$  (称为局部能量安全系数);(2)对于整体失稳的控制,需要增大群桩的承载力与水平承载力等,在容许位移不变的情况下,外力做功  $W_F$  要增大,相当于按照初始状态进行计算得到的  $W_F$  要乘以一个系数  $K_f$  (称为整体能量安全系数)。

由上述分析可得:

(1)  $K_f E_f < W_F$ :可能出现局部破坏,如:承台与

桩分离、断桩等;(2)  $\frac{1}{K_f} W_F \leq E_f \leq K_f W_F$ :安全,整体稳定;(3)  $E_f > K_f W_F$ :可能出现整体失稳,如:整体滑动、倾覆等。

上述判断也可写成另外一种形式,即  $K = \frac{E_f}{W_F}$ ,则也有对应的 3 种判断形式:(1)  $K < \frac{1}{K_f}$ ; (2)  $\frac{1}{K_f} \leq K \leq K_f$ ; (3)  $K > K_f$ . 因此,将  $K$  作为本文建立的能量耗散模型。

## 2.2 能量耗散模型中的功能定量计算

针对饱和软土地基中 PHC 群桩的排土特性,考虑其排土时所作功,计算能量耗散模型中功能参量。

一般地,弹性区是储能区域,并且群桩对它的影响也小于塑性区,因此,本次研究的计算范围是在整个群桩-土-水相互作用系统的塑性区内.具体计算按照图 1 的位移分析进行。

**2.2.1 贯入过程中的能量计算** (1)超静孔隙水压力势能.根据目前超静孔隙水压力研究(胡中雄,1997;王育兴和孙钧,2004;朱向荣等,2005),单桩周围的土压力增量和超孔隙水压力可用 Vesic 圆柱孔扩张理论解近似表示,但还要考虑水裂作用。

由于一般渗流速度不大,其动能可以忽略,所以决定土中水运动的主要是其势能.土中水的势能可以分为重力势、压力势、基质势和溶质势(李广信,2004).由于本研究主要针对饱和软基中的群桩,而对于饱和土中水的势能主要是重力势和压力势,同时,对于稳定性分析只需考虑能量的增量,因此可不考虑重力势,只考虑压力势.压力势由水受到的压力决定,又可分为静水压力势、渗流压力势和超静水压

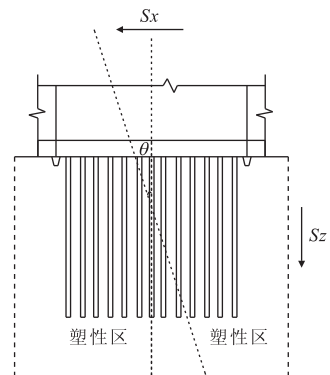


图 1 群桩基础位移分析示意

Fig. 1 Schematic diagram of displacement analysis of pile group foundation

力势,超静水压力势也称为荷载势.在基坑开挖后,静止的地下水位基本不变,渗流也可看作稳定,因此,此处的压力势主要是超静水压力势.

根据超静孔隙水压力的计算,利用叠加原理,计算塑性区内沉桩过程中产生的总超静水压力势能  $E_w$  计算如下:

$$E_w = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \iint_S \Delta p dS - \sum_{k=1}^l \iint_{A_{jk}} \Delta dA_{jk} \right) \cdot H_i, \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta p$  为超孔隙水压力, $n$  为桩贯入的土层数, $k$  为群桩的桩数, $l$  为计算单桩塑性区内的其他桩的数量, $H$  为计算土层厚度, $S$  为计算单桩塑性区面积, $A_{jk}$  为计算单桩塑性区内的其他桩的面积.

若发生“水裂”,则“水裂”后剩余的超静水压力势能  $E_{ul}$  计算如下:

$$E_{ul} = \sum_{i=1}^n (E_{ul} - E_{ulri} - E_{ulzi}) \cdot H_i, \quad (2)$$

$$E_{ulri} = \sum_{j=1}^m \left( \iint_S |k_0 \sigma'_z + \Delta \sigma'_\theta| dS \right) - \sum_{k=1}^l \iint_{A_{jk}} |k_0 \sigma'_z + \Delta \sigma'_\theta| dA_{jk}, \quad (3)$$

$$E_{ulzi} = \sum_{j=1}^m \left( \iint_S |\sigma'_z + \Delta \sigma'_\theta| dS \right) - \sum_{k=1}^l \iint_{A_{jk}} |\sigma'_z + \Delta \sigma'_\theta| dA_{jk}, \quad (4)$$

式(2~4)中: $E_{ulr}$  为水平“水裂”消散的超静水压力势能, $E_{ulz}$  为竖向“水裂”消散的超静水压力势能, $\sigma'_z$  为打桩前竖向初始有效应力, $\Delta \sigma'_\theta$  为侧向有效应力增量, $\Delta \sigma'_z$  为竖向有效应力.

(2) 挤土耗能.基于圆柱孔扩张理论,依据摩尔-库伦屈服准则,在具有粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  的半无限土体内,利用圆筒形孔扩张的一般解(王伟堂等,2001;王幼青,2003),计算挤土应力:

$$\sigma_r = (P_u + c \cot \phi) \left( \frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi}} - c \cot \phi, \quad (5)$$

其中: $P_u = c \cot \phi (1 + \sin \phi) (I'_r \sec \phi)^{\frac{\sin \phi}{1 + \sin \phi}} - c \cot \phi$ ,式(5)中: $R_u$  为孔的最终半径; $P_u$  为最终扩张压力; $r$  为离开桩中心的距离; $E, \nu$  为土的弹性模量和泊松比.

则挤土位移为:

$$u = \frac{1 + \nu}{E} r \sigma_r, \quad (6)$$

由此可得,贯入过程中超静水压力势能  $E_r$ :

$$E_r = \sum_{i=1}^n \iint_{S_r} \sigma_r u dS_r \cdot H_i, \quad (7)$$

式(6~7)中: $\sigma_r$  为塑性区挤土引起的径向应力, $S_r$  为群桩基础塑性区面积.

**2.2.2 外力做功** 首先,根据 Geddes 对 Mindlin 公式积分而导出的应力解(姚笑青,2004),利用叠加原理求得单桩和群桩荷载作用下的地基土附加应力,然后计算群桩荷载在基础中心点以下各分层土中点处的竖向应力  $\sigma_{zi}$ ,最后可用分层总和法计算群桩沉降  $s_G$ .在此基础上,计算外力所做的功.

(1) 重力产生沉降所做的功.根据上述工后由重力产生的沉降计算,可得到群桩的重力做功  $W_{gp}$ :

$$W_{gp} = G_{gp} S_G, \quad (8)$$

塑性区土体重力做功  $W_s$ :

$$W_s = \sum_{i=1}^n G_{si} S_{Gi}. \quad (9)$$

(2) 超静孔隙水压力引起沉降所做的功.根据剩余超静水压力势能  $E_{ul}$ ,计算由此产生沉降为:

$$S_w = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{wzi}}{E_{ci}} H_i, \quad (10)$$

式(10)中: $\sigma_{wzi}$  为剩余超静水压力势能  $E_{ul}$  产生平均竖向应力,  $\sigma_{wzi} = \frac{E_{ulz}}{S_s}$ .

超静孔隙水压力引起的沉降所做功为:

$$W_{s2} = \sum_{i=1}^n G_{si} S_{wi}. \quad (11)$$

(3) 其他形式位移下所作的功.各力  $M(F)$  产生转角  $\theta$ ,整体水平力  $F_x$  产生水平位移  $S_x, \dots$ ,则它们做功总和为:

$$W_{\theta x} = M(F) \cdot \theta + F_x \cdot S_x + \dots. \quad (12)$$

(4) 外力做功的总和.外力所做的总功为  $W'_F$  为:

$$W'_F = W_{gp} + W_s + W_{s2} + W_{\theta x} + \dots. \quad (13)$$

**2.2.3 摩擦耗能** 根据上面的位移计算,可得工后的摩擦耗能为:

$$E_f = \sum_{i=1}^n f_i (S_{Gi} + S_{wi}) H_i + M(f) \cdot \theta. \quad (14)$$

**2.2.4 土体储存的弹性势能** 由于土体具有弹塑性,其回弹曲线和再压缩曲线土的变形由两部分组成,卸载后能恢复的部分为弹性变形,不能恢复的部分为塑性变形.因此,外力对土体做功并不是完全由摩擦消耗掉,其中的一部分以弹性势能的方式储存起来.

根据式(9)与式(11),可知土体重力做功为:

$$W_s = W_s + W_{s2}. \quad (15)$$

储存的弹性势能为:

$$E_w = \alpha \cdot W_s. \quad (16)$$

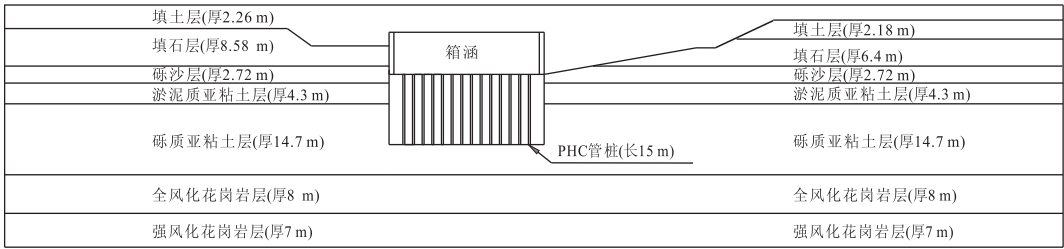


图 2 计算断面示意

Fig. 2 Schematic diagram of computation cross-sections

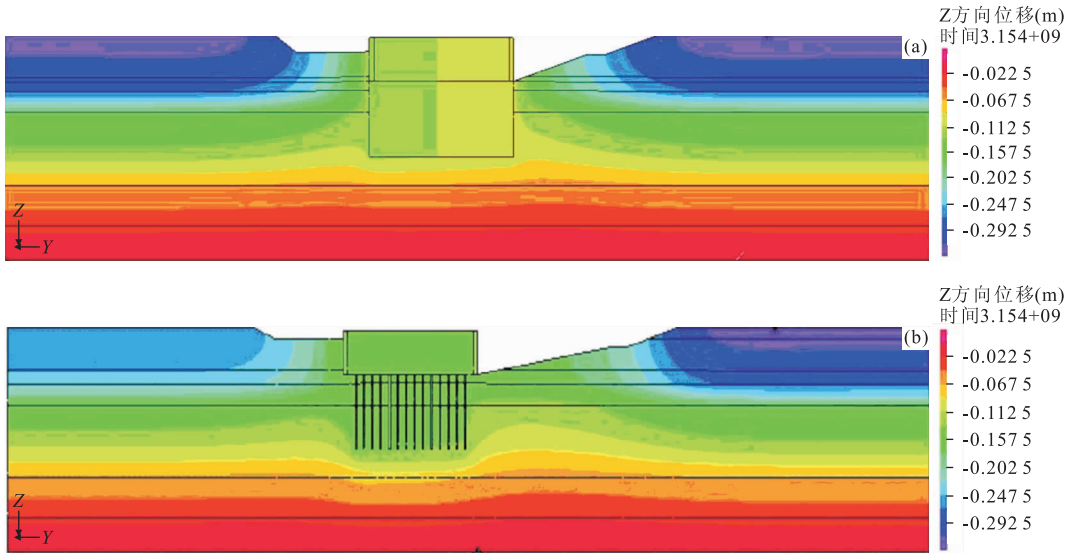


图 3 有限元计算云图

Fig. 3 The nephogram of finite element method

a. 桩土复合体模型; b. 桩土分离模型

消耗掉的塑性功为:

$$W_p = \beta \cdot W_s, \quad (17)$$

式(16~17)中:  $\alpha$  为弹性变形所占总变形的比重,  $\beta$  为塑性变形所占总变形的比重. 可根据土的回弹曲线和再压缩曲线可以近似推导出.

外力做功消耗掉的部分为:

$$W_F = W'_F - W_w. \quad (18)$$

**2.2.5 安全系数**  $K_f$  可根据规范及工程要求确定的各部分安全系数和稳定系数, 按各部分能量所占  $E_f$  的比重加权平均求得.  $K_F$  根据规范及工程要求确定的各部分安全系数和稳定系数, 按各部分能量所占  $W_F$  的比重加权平均求得. 根据规范《建筑地基基础设计规范》(DBJ015-31-2003) 与《建筑桩基技术规范》(JGJ94-94),  $K_f$  主要由桩的水平承载力安全系数  $K_r$  和桩的竖直承载力安全系数  $K_p$  决定;  $K_F$  主要由群桩整体滑动的稳定系数  $K_c$  与倾覆的稳定系数  $K_o$  决定.

此外, 桩基础的整体转角、位移等控制参数可根据实际工程的控制标准取得, 也可通过实测得到.

### 3 工程应用

本文选择某箱涵桩基工程中具有代表性的断面 ZXK4+127(图 2) 为例进行能量耗散模型与有限元计算的对比分析. 其 PHC 桩长为 15 m, 间距为 1.3 m, 直径为 0.4 m, 材料为 C80 混凝土.

#### 3.1 计算结果

计算结果见图 3、表 1.

#### 3.2 结果分析

根据能量耗散模型计算结果可得到:  $\frac{1}{K_f} W_F \leq E_f \leq K_F W_F, \frac{1}{K_f} \leq K \leq K_F$ , 整个群桩系统处于稳定与安全的状态. 根据有限元法计算结果可得到: 整个群桩系统同样处于稳定与安全的状态. 两者对比

表 1 能量耗散计算结果

Table 1 Computing result of energy dissipation model

参数	意义	计算值
$E_w$ (J)	超静孔隙水压力势能	$4.13 \times 10^9$
$E_r$ (J)	塑性区内挤土位移所做总功	$1.90 \times 10^5$
$W_F$ (J)	外力所做总功	$4.24 \times 10^7$
$E_f$ (J)	摩擦力耗能	$3.73 \times 10^7$
$K_f$	局部能量安全系数	1.8
$K_F$	整体能量安全系数	1.8
$K$	能量安全系数	0.98

可以看出,在相同条件下,能量耗散模型与有限元法得出的结论是一致的,且两个稳定性分析结果都在规范要求内,同时也验证了能量耗散模型的合理可靠性。

## 4 结论

(1)本文在系统总结前人研究成果基础上,根据饱和软土地基中群桩贯入过程的力学效应,利用功能平衡原理,构建了 PHC 群桩贯入过程的能量耗散模型,导出了局部能量安全系数与整体能量安全系数;为软基中群桩稳定性分析提供了新思路。

(2)本文建立的群桩能量耗散模型可用来评价群桩的稳定性与安全性,其主要参数均可根据现行桩基规范或常用方法计算得到,方法简单,便于实际应用;同时,该模型也可根据不同软土地基条件进行修正。

(3)通过实例计算,并与有限元对比分析,验证了能量耗散模型的合理可靠性,对饱和软土地基中 PHC 群桩稳定性状态的判别具有一定指导意义。

## References

- Chen, D. W., 2005. The method of the finite element analysis on the behaviors of pile groups (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. X., 1997. Soil mechanics and environment geotechnics. Tongji University Press, Shanghai (in Chinese).
- Li, G. X., 2004. Advanced soil mechanics. Tsinghua University Press, Beijing (in Chinese).
- Tang, S. D., Wang, Y. X., Ye, Z. H., 2003. Excess pore water pressure caused by installing pile group in saturated soft soil. *Journal of Tongji University*, 31(11): 1290—1294 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. T., Qiu, H. J., Zhan, H. Q., 2001. Study on pre-

diction and prevention for soil displacement caused by the statically pressed piles. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 23(3): 378—379 (in Chinese with English abstract).

- Wang, Y. Q., 2003. Horizontal soil compaction displacement of driven compaction pile. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 35(4): 472—475 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. X., Sun, J., 2004. Influence of pile driving on properties of soils around pile and pore water pressure. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(1): 153—158 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Yang, M., 2006. Development of load transfer method for settlement calculation of single pile. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2(1): 155—159 (in Chinese with English abstract).
- Yao, J. L., Zhang, D. H., 2004. The interaction of pile-soil in water buoyancy. *Building Technique Development*, 31(12): 28—29 (in Chinese with English abstract).
- Yao, X. Q., 2004. Method of additional stress calculation in settlement of pile foundations. *Structural Engineers*, 20(4): 64—67 (in Chinese with English abstract).
- Zai, J. M., Ling, H., Wang, X. D., 2002. Numerical analysis of nonlinear interaction of piled raft foundations. *Journal of Nanjing University of Technology*, 24(5): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. L., 2005. Study on character of pile-soil cooperative work in the composite pile foundation (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. R., He, Y. H., Xu, C. F., et al., 2005. Excess pore water pressure caused by single pile driving in saturated soft soil. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(Suppl. 2): 5740—5744 (in Chinese with English abstract).
- Zhuo, Y., Liu, Z. S., Wu, F., et al., 2009. Finite element analysis on pile soil in teraction of pile under horizontal load. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 5(Suppl. 2): 1554—1561 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. H., Wang, C. D., Dai, R. P., et al., 2009. A elastic theory to improve calculation of single pile. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 10: 117—121 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈登伟, 2005. 群桩工作性状的有限元分析方法(硕士论文). 合肥: 合肥工业大学.

胡中雄,1997. 土力学与环境土工学. 上海:同济大学出版社.  
 李广信,2004. 高等土力学. 北京:清华大学出版社.  
 唐世栋,王永兴,叶真华,2003. 饱和软土地基中群桩施工引起的超孔隙水压力. 同济大学学报, 31(11): 1290—1294.  
 王伟堂,裘华君,詹红琴,2001. 压桩挤土位移的预估与防治的研究. 岩土工程学报, 23(3): 378—379.  
 王幼青,2003. 挤土桩水平向挤土位移分析. 哈尔滨工业大学学报, 35(4): 472—475.  
 王育兴,孙钧,2004. 打桩施工对周围土性及孔隙水压力的影响. 岩石力学与工程学报, 23(1): 153—158.  
 杨桦,杨敏,2006. 荷载传递法研究单桩荷载—沉降关系进展综述. 地下空间与工程学报, 2(1): 155—159.  
 姚俊玲,章东鸿,2004. 考虑水浮力的桩土共同作用. 建筑技

术开发, 31(12): 28—29.  
 姚笑青,2004. 桩基沉降中的附加应力计算方法分析. 结构工程师, 20(4): 64—67.  
 宰金珉,凌华,王旭东,2002. 桩筏基础非线性共同作用数值分析. 南京工业大学学报, 24(5): 1—6.  
 张国亮,2005. 复合桩基桩土共同作用性状研究. 杭州:浙江大学.  
 朱向荣,何耀辉,徐崇峰,等,2005. 饱和软土单桩沉桩超孔隙水压力分析. 岩石力学与工程学报, 24(增刊 2): 5740—5744.  
 卓杨,刘兹胜,吴锋,等,2009. 水平受荷桩桩—土作用的有限元分析. 地下空间与工程学报, 5(增刊 2): 1554—1561.  
 邹春华,王长丹,代仁平,等,2009. 一种改进的单桩计算弹性理论法. 城市道桥与防洪, 10: 117—121.

\*\*\*\*\*

## 《地球科学——中国地质大学学报》 2011 年 第 36 卷 第 4 期 要目预告

更新世冰盖与大洋碳储库相互作用的箱式模型模拟 .....	马文涛等
莓状黄铁矿:环境与生命的示踪计 .....	杨雪英等
川东北地区飞仙关组白云岩成岩作用与系统划分 .....	郑荣才等
青藏高原西部班公湖岛弧带特提斯洋盆闭合后的地壳伸展作用 .....	江军华等
延边小西南盆铜金矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义 .....	任云生等
天山乌鲁木齐河源冰川积雪化学特征及其季节变化 .....	李忠勤等
武汉天兴洲近代沉积物的磁性特征及其环境意义 .....	李永涛等
王河煤矿矿井涌水量数值模拟及预测 .....	李平等
石油污染多孔介质湿润性变异特征 .....	梁春等
表面活性剂强化空气扰动修复氯苯污染含水层 .....	秦传玉等