

# 群桩基础非线性有限元强度折减法极限分析

董天文<sup>1</sup>, 郑颖人<sup>1</sup>, 黄连壮<sup>2</sup>

(1. 后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 400041; 2. 辽宁电力勘测设计院, 沈阳 110016)

**摘要:**受到静载荷试验条件限制,群桩基础的极限载荷是通过单桩载荷试验极限值修正来确定群桩基础的极限载荷,所判定的极限载荷值往往缺少客观性。文中建立了多变量群桩基础承载力泛函数,首先基于加载过程中桩土系统的岩土材料强度参数与载荷施加参数具有相互匹配的同步性关系,引入强度折减系数,提出了基础安全储备系数,用以表示所施加外载荷与真实极限荷载的比值。其次,极限条件下群桩的桩端材料发生塑性变形,桩土系统从一种稳定状态快速进入另一种稳定状态的突变关系,在荷载位移关系上具体表现为拐点后出现一铅直线段,据此建立了群桩基础有限元强度折减法极限载荷判定条件。最后使用 ANSYS 软件进行了螺旋群桩基础的三维有限元强度折减法的工程应用分析,当外载荷 207 800 N 时的安全储备系数为 1.16,极限荷载计算值为 241 048 N 小于静载荷试验判定极限荷载值 249 400 N,误差 3.35%,验证了群桩基础强度折减系数法的可行性。

**关键词:**群桩基础,有限元,强度折减法,极限载荷

**中图分类号:**TU473.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)01-0065-06

## Strength Reduction Method of No-linear FEM Limit Analysis for Pile Group Foundation

DONG Tian-wen<sup>1</sup>, ZHENG Ying-ren<sup>1</sup>, HUANG Lian-zhuang<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, P. R. China;

2. Electric & Reconnaissance Research of Liaoning, Shenyang 110016, P. R. China)

**Abstract:** Confined by the condition of static loading test, the ultimate load of pile group is modified by the ultimate load of static loading test of a pile, so the estimated ultimate value lacks objectivity. The variables of universal function of bearing capacity of pile group are put up. First, based on one another matching parameters of strength for geotechnical material according to simultaneity relation in the forced pile foundation, and induced the strength reduction factor, the safety storage factor (SSF) is put up, which is denoted the ratio of real ultimate load to the load on pile foundation. Second, the plastic deformation is happen at the soils around pile tie at the condition of ultimately loading, and the steady state of pile-soil system rapidly changes into a unstable state (rapid changing relation), the phenomenon of loading-settlement shows that the vertical line lies at the inflexion after the ultimate load point. Hereby, the criterion of ultimate load, which is computed by the strength reduction method of no-linear FEM limit analysis for pile group, is build. Finally, used the ANSYS softer, the screw pile group of the practical foundation engineering is analyzed by 3-d FEM strength method. At  $P=207\ 800\ \text{N}$ , the SSF is equal to 1.16, and the ultimate load ( $Q$ ) is 241 048 N, which it is small 3.35% than the estimated ultimately loading of state loading test (249 400 N). This result validated the feasibility of strength reduction method used to decide the ultimate load of pile group.

**Key words:** pile group foundation FEM strength reduction method ultimate load

收稿日期:2010-06-29

基金项目:辽宁省自然科学基金(20102103)

作者简介:董天文(1970-),男,教授,博士(后),主要从事岩土工程研究,(E-mail)dongtianwen111@163.com。

桩基础的传力系统是由桩身介质和桩周介质共同组成的复合介质系统,除嵌岩桩外,桩基础的承载力主要由桩周土的物理力学性质决定,桩基础的桩侧、桩端地基变形过程中应力应变关系具有非线性特点。在基础设计方面,桩基础的极限荷载判定至关重要,传统的荷载试验方法受到试验环境条件、荷载施加条件、桩基承载能力提高等的限制,已经难于满足桩基础发展趋势的要求,因此《建筑地基基础设计规范(GB 50007-2002)》中对端承力较高的桩型建议了深层平板荷载试验的极限荷载确定方法<sup>[1]</sup>。

群桩基础是由多个基桩按一定排列方式组成的一种深基础形式,受到基桩间荷载传递的相互影响,群桩基础承载机理的复杂性远超过单桩的承载机理。从本质上说,任何建构筑物的桩基础均为群桩基础。群桩基础的判定极限荷载通过对单桩极限荷载的修正,往往并不是真实的极限荷载,因此有必要开展此项研究,解决群桩基础极限荷载问题。

一直以来,许多学者和研究人员均试图通过计算力学方法研究桩基础的力学性质,使用了有限元、边界元、离散元等数值计算方法开展了桩基础数值模拟工作,推动了桩基础力学性质的研究手段多样化,这些研究工作以特定基桩、群桩为分析对象,在桩土相互作用、地基—基础—上部结构共同工作、桩周材料性质对桩体荷载传递的影响、桩周地基的应力场等方面开展了研究工作<sup>[2-17]</sup>。

在桩基础极限荷载的数值方法研究过程中,一般使用荷载增量方法研究桩基础的极限荷载问题,计算出不同荷载等级的桩顶位移,绘制  $P-s$  曲线,拟合静荷载试验的  $P-s$  曲线,最后使用传统的极限荷载判定条件(拐点法等)判定桩基的极限荷载,其实质是通过数值计算的荷载逐级增加模拟静荷载试验过程。但是,受到地基材料本构关系、成桩后岩土材料性质的改变、塑性自适应再分网等研究工作的限制,使得荷载增量法判定桩基础极限荷载在工程应用中缺少科学性和实用性。

强度折减法有限元极限分析主要应用在边坡工程、隧道工程、加筋土工程的强度和稳定性方面。首先在边坡稳定方面开展了研究工作,建立了摩尔库伦材料的强度折减系数与边坡安全系数的关系,极限荷载判定条件是有限元分析是否收敛、折减系数位移曲线出现平行于位移坐标的直线段、等效塑性应变区贯通等;进而将这一成果推广到隧道工程和加筋土工程,得到了一些有意义的研究成果。目前,有少量地桩基强度折减法研究工作包含在边坡、隧

道的安全性研究,而依据桩的力学特征进行相应简化处理,对反映桩土相互特征的竖向承载力极限值计算尚未展开<sup>[18-22]</sup>。

笔者在总结前期工作基础上,从建立群桩基础竖向承载力函数出发,应用强度折减法建立极限荷载与特征值间的关系,确定桩基础强度折减法的极限判定条件。

## 1 群桩基础强度折减法

桩基础的传力系统是由桩身介质和桩周介质共同组成的复合介质系统,除嵌岩桩外,桩基础的承载力主要是由桩周土的物理力学性质决定的。作为桩周介质的土材料是一种三相、多孔的材料,其压缩模量随深度变化,而岩石材料亦为非线性、非连续介质,所以桩基础的桩侧、桩端地基变形过程中应力应变关系具有非线性特点。桩在受荷载后,桩体与桩周地基间发生相对位移,桩侧的桩土界面产生桩周材料的剪切破坏;桩端地基的发生压缩变形,产生滑裂体。当桩顶荷载达到极限荷载后,桩侧、桩端地基产生贯通性塑性变形后。因此,桩基础的极限荷载问题的本质是对桩周材料的强度问题以及桩土间的荷载传递问题的综合研究。

在 20 世纪 70 年代末,辛格维奇提出强度折减法进行岩土工程的极限分析。在边坡工程领域,中国已经建立了相应的应用理论,将其成功地应用于该领域的工程设计之中<sup>[18]</sup>。但桩基础的强度折减法研究工作才刚刚起步,其折减系数的引入、塑性有限元自适应分网技术、桩基础施工工法对桩周材料的物理力学参数的影响以及计算精度的影响因素等方面还须细致研究,以期形成较为完善的三维有限元桩基础强度折减法的极限分析理论。

$$Q = \frac{\eta_s Q_{sk}}{\gamma_s} + \frac{\eta_p Q_{pk}}{\gamma_p} + \frac{\eta_c Q_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

式中: $Q_{sk}$  和  $Q_{pk}$  分别为单桩总极限端阻力和摩阻力特征值, $Q_{ck}$  为承台底地基总极限阻力特征值, $\eta_s$ 、 $\eta_p$ 、 $\eta_c$ 、 $\gamma_s$ 、 $\gamma_p$ 、 $\gamma_c$  分别为桩侧阻群桩效应系数、桩端阻群桩效应系数、承台底地基阻力效应系数、桩侧阻力分项系数、桩端阻力分项系数、承台底地基阻力分项系数, $Q$  为考虑群桩效应的极限承载力<sup>[23]</sup>。

下面分析式(1)中有关的效应系数和阻力分项系数。群桩的承载是单桩、桩间土、承台、岩土材料共同作用的过程,因群桩的极限荷载较大,依据静荷载试验判断其极限荷载较难实现,往往采用单桩的极限荷载数据加以修正来给出群桩的极限荷载,这样就出现了效应系数和阻力分项系数。 $\gamma_s$ 、 $\gamma_p$ 、 $\gamma_c$  为与

施工工法有关的竖向抗力分项系数,其数值介于1.6~1.75之间; $\eta_s$ 、 $\eta_p$ 为与岩土材料性质、群桩(桩与承台)几何特征有关的端阻力和侧阻力效应系数, $\eta_c$ 为群桩(桩与承台)几何特征有关的承台底地基阻力效应系数。将公式(1)表示为涉及桩的几何参数和岩土材料参数的函数形式,即为式(2),

$$Q' = Q'_{sk}(L, S, M, l, m, n, c, \varphi) + Q'_{pk}(L, S, M, l, m, n, c, \varphi) + Q'_{ck}(S, M, l, m, n, a, c, \varphi) \quad (2)$$

式中 $Q'$ 为竖向承载力函数, $Q'_{sk}$ 、 $Q'_{pk}$ 和 $Q'_{ck}$ 分别为桩端阻力函数、桩侧摩阻力函数和承台底地基阻力函数; $L$ 、 $S$ 、 $M$ 分别为桩长参数、桩截面参数和施工工法参数; $l$ 为桩间距, $m$ 、 $n$ 分别为布桩形式和桩数; $a$ 为承台几何特征参数; $c$ 和 $\varphi$ 分别表示岩土材料的黏聚力和内摩擦角。

对于特定的群桩基础荷载来说,其桩长参数、桩间距、桩截面参数、施工工法参数、布桩形式、桩数、承台几何特征等均已确定,影响其承载能力因素仅为桩周岩土材料强度参数,在式(2)中变量 $c$ 和 $\varphi$ 将决定特定群桩的荷载值。为此,可以采用对岩土材料进行强度折减的方法,研究群桩基础的极限荷载问题。 $c$ 和 $\varphi$ 值的折减公式如下:

$$c' = c/F \quad (3)$$

$$\varphi' = \arctan(\tan \varphi/F) \quad (4)$$

其中, $F$ 为群桩基础的安全储备系数

群桩基础的承载是地基岩土材料的破坏。在传递荷载过程中,岩土材料不论是一点的破坏,还是局部或全部破坏,极限荷载时岩土材料全部达到抗剪强度极限值,根据摩尔库伦强度准则,

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

极限荷载条件时,

$$\tau' = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (6)$$

将式(3)和(4)代入式(6),得,

$$\tau' = \frac{c}{F} + \sigma \frac{\tan \varphi}{F} \quad (7)$$

式(7)比式(6)得,

$$\tau'/\tau = F \quad (8)$$

对于特定群桩而言,群桩基础荷载特征值为式(9),极限荷载为式(10),

$$Q' = Q'_{sk}(\tau) + Q'_{pk}(\tau) + Q'_{ck}(\tau) \quad (9)$$

$$Q = Q'_{sk}(\tau') + Q'_{pk}(\tau') + Q'_{ck}(\tau') \quad (10)$$

其中 $\tau$ 和 $\tau'$ 为岩土材料抗剪强度泛函数, $Q$ 是以函数 $\tau$ 为变量的极限承载力泛函数, $Q'$ 是以函数 $\tau'$ 为变量的承载力特征值泛函数。

将式(8)代入式(9)得,

$$Q' = Q'_{sk}\left(\frac{\tau'}{F}\right) + Q'_{pk}\left(\frac{\tau'}{F}\right) + Q'_{ck}\left(\frac{\tau'}{F}\right) \quad (11)$$

提出常数 $F$ 得,

$$Q' = \frac{Q'_{sk}(\tau') + Q'_{pk}(\tau') + Q'_{ck}(\tau')}{F} \quad (12)$$

式(10)与式(12)之比为:

$$\frac{Q}{Q'} = F \quad (13)$$

这样就建立了群桩基础的极限荷载值与特征值间的安全评价关系。

## 2 群桩基础非线性有限元极限分析

群桩基础承载过程受到桩间距、桩长、桩径、布桩形式、承台、岩土、荷载施加等情况的影响,荷载位移关系、地基应力应变关系均表现为非线性特征。使用有限元程序和强度准则在一定程度上反映群桩基础的实际工作状态:岩土材料有限元极限分析对材料强度准则要求较高,而对本构关系要求较低;群桩基础承载过程中,除了岩土材料的非线性问题,还有单桩之间的荷载传递相互影响,而有限元计算的特点是结点间的力学关系平衡计算,可以模拟桩土间、单桩之间的荷载传递问题。下面就使用 ANSYS 三维有限元软件分析群桩基础的相关问题进行说明。

### 2.1 群桩三维有限元极限分析的强度准则

对于三维有限元弹塑性体分析宜选用文献[24]的 Mohr-Coulomb 等面积圆屈服准则(DP4),该准则适用于空间问题求解,材料常数 $\alpha$ 和 $k$ 见公式(14)和(15)。

$$\alpha = \frac{2\sqrt{3}\sin\varphi}{\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9-\sin^2\varphi)}} \quad (14)$$

$$k = \frac{6\sqrt{3}c\cos\varphi}{\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9-\sin^2\varphi)}} \quad (15)$$

### 2.2 桩土界面模拟与三维有限元分网

群桩基础的破坏本质是桩体表面桩侧材料和桩端材料在一定范围的剪切破坏。受到成桩方法不同的影响,桩周材料物理力学参数将发生局部变化,影响到桩体位移大小,但对于极限荷载影响较小。有鉴于此,可以在有限元分析过程中增加桩侧和桩端的界面单元(ANSYS 软件中的 Contact),代入接触面岩土材料的物理参数(主要是弹性模量 $E$ )反分析值,既可以较好的模拟其荷载位移关系。

而桩体表面为几何非线性的异形桩,如螺旋桩基础,桩土界面建议采用共用结点形式,提高计算的稳定性,降低单元数量和计算机时。

圆柱形桩体采用 Mapped-Hex 分网,将桩体离散成规则的六面体单元,螺旋桩的叶片是一种空间旋转体使用 Sweep 分网器分网,控制分网密度,降低桩土结合部位的网格密度。桩侧地基、桩端地基和承台均采用 Smart 智能分网器划分网格,采用 Smrt10 参数,划分为四面体单元,既可以保证桩周的网格密度和计算的精度,同时可以适应桩土间较大相对位移形成的网格大变形情况。

### 2.3 计算收敛准则

桩土系统具有弹塑性、大变形特征,采用有限元极限分析方法研究桩基础的极限承载能力,是对于桩土系统力学状态的综合评价,并不一定要追求某一局部的计算精度,因此可以采用单一的非线性计算收敛准则(位移收敛准则),并适当放大收敛允许值以节省机时。

## 3 算例与分析

软土地区某螺旋群桩基础工程位于滨海冲积平原,地表向下勘察揭示地层分别为素填土(厚度 0.5 m)、流塑性粉质黏土厚度(7.0 m)、粉砂(7.5 m),主要物理参数如表 1。

表 1 土材料的物理力学参数

土材料	$z/m$	$\mu$	$\varphi/(\circ)$	$c/kPa$	$E_s/MPa$
素填土	0.5	0.25	10	3	4.1
粉质黏土	7.0	0.25	2	9.33	1.3
粉砂	7.5	0.3	25	5.5	14.1

注: $z$  为土层厚度; $\mu$  为波松比; $\varphi$  为土的内摩擦角; $c$  为土的黏聚力; $E_s$  为土的压缩模量。

群桩为等边三桩形式,单桩长度 8 m,叶片直径 0.65 m,螺距 0.144 m,2 层叶片间距 1.08 m,布置 3 层叶片。承台为边长 1.3 m 的等边三角形承台,承台高 0.5 m,桩边到承台边为 0.1 m,桩伸入承台 0.7 m<sup>[25]</sup>。

根据前文的方法编写了 APDL 参数语言程序,为减少桩土界面单元引起的计算奇异性,采用桩、土体共用结点分网(Glue 命令),建立的 1/4 体有限元三维模型见图 1 和图 2,相关参数见表 2。计算边界选择:横截面宽度和桩端下地基深度分别大于 1 倍桩长和 2 倍桩长,对边界分别设置为全约束。加载中,螺旋桩材料采用线弹性模型,桩体为旋入钢管后灌注混凝土,材料常数按钢筋混凝土材料选取;叶片为 Q235 钢质材料,见表 2。有限元计算收敛标准采用位移控制,收敛允许值为 0.1,降低机时。承台、螺旋桩有限元计算参数见表 3。

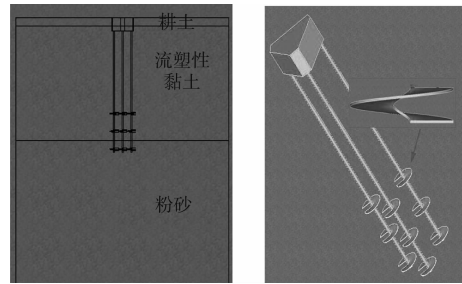


图 1 桩基础有限元计算模型

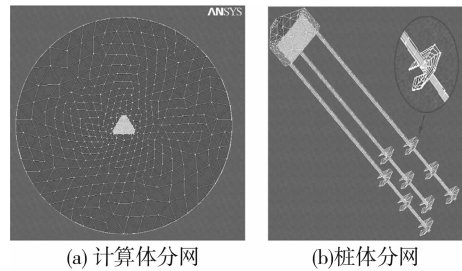


图 2 桩基础有限元计算模型分网

表 2 螺旋桩和承台材料物理参数

结构位置	材料	$\mu$	$E/MPa$
承台 桩体	混凝土	0.17	$3.65 \times 10^3$
叶片	钢材	0.33	$2.06 \times 10^5$

表 3 桩基础有限元计算模型的网格参数

节点 / 个	单元 / 个	线 / 条	面 / 个	体 / 个
13 777	58 466	347	177	34

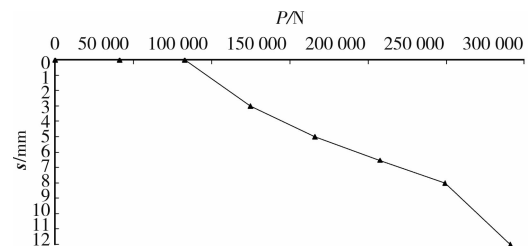


图 3 螺旋群桩  $P-s$  曲线对比图

图 3 为群桩基础荷载位移关系曲线,呈多级台阶形,在第 6 级荷载(249 400 N)时曲线出现第 2 拐点,判定该点值为极限荷载,承台位移为 8 mm。

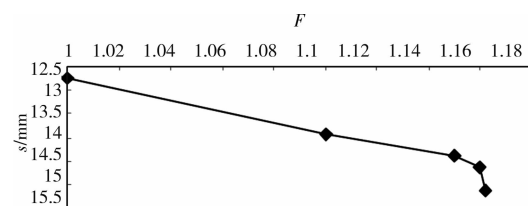


图 4 螺旋群桩强度折减系数—位移曲线

图 4 为承台受集中力 207 800 N 时的强度折减

系数位移曲线,曲线在  $F=1.16$  时出现拐点,随后桩顶位移快速增加,出现近似垂直于折减系数坐标轴的铅直线段,可确定群桩外载荷  $N=207\ 800\text{ N}$  时的安全储备系数为 1.16。根据式(13),极限荷载值为  $241\ 048\text{ N}$ ,小于静载荷试验判定极限荷载值  $249\ 400\text{ N}$ ,误差 3.35%,表明对于桩型、布桩位置、承台几何形式、施工工法、载荷施加方向等条件相对固定的群桩基础而言,其极限承载力与桩周岩土材料强度具有一定的相互匹配性。在极限荷载条件下,所施加的极限载荷与承台位移存在突变关系,使原有的桩土系统承载力平衡状态快速演变为不稳定状态,这与重力作用下的边坡极限条件特征相似。

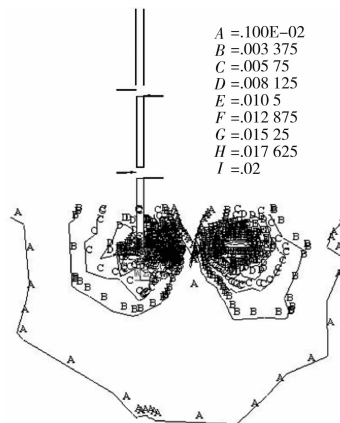


图 5 螺旋群桩等效塑性应变云图 ( $F=1.16$ )

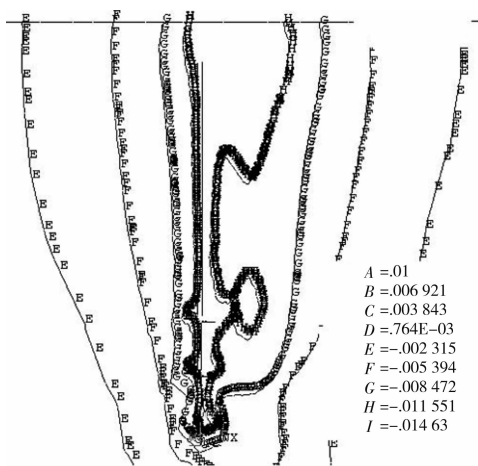


图 6 螺旋群桩位移云图 ( $F=1.16$ )

图 5 和图 6 分别为  $F=1.16$  时群桩基础的等效塑性应变和位移等值线图。图 5 中可以看到在  $F-s$  曲线拐点 ( $F=1.16$ ) 时,基桩的桩端叶片附近的地基塑性区已经连通,并伴有向上的发展趋势,3 层叶片具有相近的较大位移(图 6)。但受到上层叶片对下部地基的压缩作用,以及上部软弱土层强度较低的影响,塑性区有可能仅存在于桩端至上部某一区域,而不会象直型桩沿桩侧全长分布。

## 4 讨论

群桩基础强度折减法的计算或判定极限荷载其

本质是将桩与桩周岩土材料视为一个完整的系统,基础的承载本质是岩土材料强度是否可以满足产生各种破坏滑裂面破坏的外加荷载,对于固定的研究对象(基础)而言,岩土材料的强度参数将影响到基础的极限承载能力, $F-s$  曲线出现铅直直线的拐点应为承载状态从稳定到破坏的转折,表明螺旋群桩基础的基桩桩端叶片下地基材料发生塑性变形。

## 5 结论

受到静载荷试验条件限制,群桩基础较少开展静载荷试验,而是通过单桩的载荷试验极限荷载值修正确定群桩基础的极限荷载,所判定的极限荷载值缺少客观性。该文建立了多变量群桩基础承载力泛函数。

1) 加载过程中桩土系统的岩土材料强度参数与载荷施加参数具有相互匹配的同时性关系,引入强度折减系数,提出了基础安全储备系数。

2) 极限条件下,螺旋群桩的基桩桩端地基出现塑性变形,使得桩土系统存在从一种稳定状态快速进入另一种稳定状态的突变关系,以此建立了群桩基础有限元强度折减法极限荷载判定条件。使用 ANSYS 软件进行了螺旋群桩基础的三维有限元强度折减法的工程应用分析,验证了群桩基础强度折减系数法的可行性。

## 参考文献:

- [1] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] S KÜÇÜKARSLAN, P K BANERJEE. Behavior of axially loaded pile group under lateral cyclic loading [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(3): 303-311.
- [3] ZHAO YANG, BORIS JEREMI. Study of soil layering effects on lateral loading behavior of pile [J]. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, 2005, 131(6): 762-770.
- [4] TAKESHI MAKI, KOICHI MAEKAWA, HIROSHI MUTSUYOSHI. RC pile-soil interaction analysis using a 3D-finite element method with fibre theory-based beam elements [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2006, 35(13): 1587-1607
- [5] SCOTT A CIVJAN, CHRISTINE BONCZAR, SERGIO F BREÑA. Integral Abutment Bridge Behavior: Parametric Analysis of a Massachusetts Bridge [J]. *J. Bridge Engrg.*, ASCE, 2007, 12(1): 64-71.
- [6] L A PADRON, J J AZNAREZ, O MAESO. BEM - FEM coupling model for the dynamic analysis of piles and pile groups [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2007, 31(6): 473-484.
- [7] ZHENG JUN-JIE, SARI W ABUSHARAR, WANG XIAN-ZHI. Three-dimensional nonlinear finite element modeling of composite foundation formed by CFG - lime piles [J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(4): 637-643.

- [8] M A MILLAN, J DOMINGUEZ. Simplified BEM/FEM model for dynamic analysis of structures on piles and pile groups in viscoelastic and poroelastic soils [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2009, 33(1): 25-34.
- [9] 张崇文, 何广民, 王姓. 三维空间桩与土作用的有限层—有限元混合法 [J]. *天津大学学报*, 1994, 27(5): 629-636.  
ZHANG CHONG-WEN, HE GUANG-MIN, WANG SHEN. A study on 3-d space pile-soil interaction using finite layer-finite element hybrid method [J]. *Journal of Tianjin University*, 1994, 27(5): 629-636.
- [10] 杨涛, 殷宗泽. 复合地基沉降的复合本构有限元分析 [J]. *岩土力学*, 1998, 19(2): 19-25.  
YANG TAO, YIN ZONG-ZE. Finite element analysis of composite ground based on composite constitutive model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1998, 19(2): 19-25.
- [11] 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及 FEM 模拟研究 [J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(3): 371-375.  
QIAN DE-LING. Study on loading transfer law and FEM simulation of squeezed branch pile [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(3): 371-375.
- [12] 解家毕, 刘祖德. 深厚软基上多(高)层建筑桩基础的共同作用分析 [J]. *岩土力学*, 2005, 26(1): 122-126.  
XIE JIA-BI, LIU ZHU-DE. Analysis on interaction model of pile foundation and superstructure on thick and soft ground [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 122-126.
- [13] 朱方敏, 茜平一, 解家毕, 等. 深层掏土纠偏法在桩基上多层建筑中的应用研究 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(9): 1617-1622.  
ZHU FANG-MIN, QIAN PING-YI, XIE JIA-BI, XU HAN. Study on application of deviation rectification of building with pile foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1617-1622.
- [14] 张正威, 宋二祥, 陈肇元. 冲击波作用下桩基础高层剪力墙结构附建人防地下室倾覆机理分析 [J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(1): 129-138.  
ZHANG ZHENG-WEI, SONG ER-XIANG, CHEN ZHAO-YUAN. Overturning response of basement attached to high rise buildings with pile foundation under blast loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(1): 129-138.
- [15] 王俊杰, 朱俊高, 吴寿昌. 大规模超长群桩基础工作性能的数值模拟 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(3): 701-706.  
WANG JUN-JIE, ZHU JUN-GAO, WU SHOU-CHANG. Numerical simulation on behavior of large-scale overlength pile group foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 701-706.
- [16] 闫静雅, 张子新, 黄宏伟, 等. 桩基础荷载对邻近已有隧道影响的有限元分析 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(9): 2508-2514.  
YAN JING-YA, ZHANG ZI-XIN, HUANG HONG-WEI, et al. Finite element analysis of influence of pile group loading on existing neighboring tunnels [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2508-2514.
- [17] 胡琦, 凌道盛, 陈云敏. 桩土均质化横观各向同性模型理论研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(4): 853-859.  
HU QI, LING DAO-SHENG, CHEN YUN-MIN. Theoretical study on pile-soil homogeneous transversely isotropic model [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(4): 853-859.
- [18] 郑颖人, 赵尚毅, 孔位学, 等. 极限分析有限元法讲座——I 岩土工程极限分析有限元法 [J]. *岩土力学*, 2005, 26(1): 163-168.  
ZHENG YING-REN, ZHAO SHANG-YI, KONG WEI-XUE, et al. Geotechnical engineering limit analysis using finite element method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 163-168.
- [19] D V GRIFFITHS, P A LANE. Slope stability analysis by finite elements [J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 387-403.
- [20] CAI F, UGAI K. Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles [J]. *Soils and Foundations*, 2000, 40(1): 73-84.
- [21] 郑颖人, 赵尚毅. 用有限元强度折减法求边(滑)坡支挡结构的内力 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(10): 3552-3558.  
ZHENG YING-REN, ZHAO SHANG-YI. Calculation of inner force of support structure for landslide/slope by using strength reduction fem [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(10): 3552-3558.
- [22] 郑颖人, 邱陈瑜, 张红, 等. 关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(10): 1968-1980.  
ZHENG YING-REN, QIU CHEN-YU, ZHANG HONG, et al. Exploration of stability analysis methods for surrounding rocks of soil tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(10): 1968-1980.
- [23] DB 21-907-96 建筑地基基础技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1996.
- [24] 徐干成, 郑颖人. 岩土工程中屈服准则应用的研究 [J]. *岩土工程学报*, 1990, 12(2): 93-99.  
XU GAN-CHENG, ZHENG YING-REN. Study on the application of yield criteria in the geotechnical engineering [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 12(2): 93-99.
- [25] 辽宁省电力勘测设计院. 螺旋锚基础试验研究 [R]. 沈阳: 辽宁电力勘测设计院, 2002.