

文章编号:1673-2049(2010)04-0025-06

# 基于模糊控制的单桩竖向极限承载力预测

薛新华<sup>1,2</sup>, 魏永幸<sup>1</sup>, 赵晓彦<sup>3</sup>

(1. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:**为合理、准确地预测单桩竖向极限承载力,借助模糊神经网络较强的学习能力和模糊逻辑推理功能,建立了基于模拟退火算法的单桩竖向极限承载力预测模型,对收集到的样本进行了训练预测,并与常规的减法聚类算法预测结果进行了对比。分析结果表明:基于模拟退火算法的模糊神经网络模型预测单桩竖向极限承载力是可行有效的,具有较大的工程实用价值。

**关键词:**单桩竖向极限承载力;模拟退火算法;模糊神经网络;预测模型

**中图分类号:**TU473.1

**文献标志码:**A

## Predicting of Vertical Ultimate Bearing Capacity of Single Pile Based on Fuzzy Control

XUE Xin-hua<sup>1,2</sup>, WEI Yong-xing<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-yan<sup>3</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** To predict vertical ultimate bearing capacity of single pile reasonably, with the strong learning ability and fuzzy logic functions, the predicting model of vertical ultimate bearing capacity of single pile based on the simulated annealing algorithm was established. The training and predicting of collected sample were carried out, and predicting results of the method were compared with those of conventional subtractive clustering algorithm. Analysis result shows that the fuzzy neural network model based on the simulated annealing algorithm is effective and feasible in predicting the vertical ultimate bearing capacity of single pile, and it has greater practical value in engineering.

**Key words:** vertical ultimate bearing capacity of single pile; simulated annealing algorithm; fuzzy neural network; predicting model

## 0 引言

桩基作为建筑物中传递应力的下部结构,既要保证建筑物的安全稳定,又要充分发挥桩基技术的经济效益,如何科学合理地确定单桩的承载力是桩基设计中的一个关键技术问题<sup>[1-12]</sup>。目前,确定单

桩极限承载力的方法主要有以下几种:静载荷试验法、动测法、触探测试法以及规范经验公式法等。静载荷试验法虽然是最常用、最基本的方法之一,但往往受到荷载装置、费用、施工进度以及试验条件等方面的限制,得到的单桩极限承载力误差较大,因此,如何利用实测数据预测单桩极限承载力具有较大的工

收稿日期:2010-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40772174)

作者简介:薛新华(1977-),男,山东惠民人,中国中铁二院工程集团有限责任公司工程师,工学博士,博士后,E-mail:ouqdxh@163.com。

程实用价值。

近年来,人工神经网络技术已被成功用于单桩极限承载力的预测,如刘勇健利用遗传算法优化神经网络来预测单桩极限承载力;杨磊等<sup>[13]</sup>利用常规的模糊神经网络来预测单桩极限承载力;郑俊杰等<sup>[14]</sup>利用生物免疫系统的免疫算法对单桩极限承载力进行预测;童瑞铭等<sup>[15]</sup>利用基于遗传算法的灰色理论进行单桩极限承载力预测;赵岚等<sup>[16]</sup>利用微分进化算法对灰色模型参数进行优化以预测单桩极限承载力;郑永保等<sup>[17]</sup>利用径向基函数神经网络预测单桩极限承载力等。由于单桩竖向极限承载力受众多因素的影响,这些因素有的是确定的,有的则具有随机性、模糊性和可变性等不确定特点,因此,模糊神经网络比较适合解决此类问题。常规的模糊神经网络训练方法通常采用 BP 算法<sup>[18]</sup>,这就存在 2 个问题:模糊规则的选取依赖于专家经验,而专家经验往往不是完备的和最优的;BP 学习算法属于迭代计算,存在着收敛速度慢和无法达到全局最优等问题。鉴于此,本文中笔者结合模拟退火算法来对模糊神经网络进行优化以预测单桩的竖向极限承载力。

## 1 T-S 模糊神经网络模型与优化算法

### 1.1 T-S 模糊神经网络模型

T-S 模型是目前应用比较广泛的模糊系统模型之一,是由 Takagi 等<sup>[19]</sup>在 1985 年提出的,该模型不失一般性,是一个多输入单输出的模糊系统,包含  $L$  条模糊规则,其中第  $i$  条( $1 \leq i \leq L$ )规则  $R_i$  为:如果  $x_1 = A_1^i, x_2 = A_2^i, \dots, x_n = A_n^i$ , 则有

$$y^i = p_0^i + p_1^i x_1 + p_2^i x_2 + \dots + p_n^i x_n \quad (1)$$

式中: $x_j$  为输入变量; $y^i$  为第  $i$  条规则的输出; $p_j^i$  为结论参数; $A_j^i$  为输入变量的隶属度函数。

若隶属度函数为高斯函数  $\mu(x_i)$ , 则有

$$\mu(x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - c_i}{\sigma_i}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中: $c_i, \sigma_i$  分别为高斯函数  $\mu(x_i)$  的中心值和宽度。

均方误差  $E$  定义为

$$E = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

式中: $M$  为总的学习样本; $y_k, \hat{y}_k$  分别为相对于输入变量  $x_k$  的输出值和训练值。

T-S 模型的输出由规则库中变量的隶属度函数以及规则的输出来确定,其本质是将非线性系统通过模糊区间表示为若干简单的线性关系,然后再对模型的输出进行模糊推理,从而表示复杂的非线性

系统。尽管 T-S 模型能够以较少的模糊规则去描述一个高度复杂的非线性系统,但其参数辨识过程的复杂性又在某种程度上限制了其应用。限于篇幅,T-S 模型的具体结构在此不再赘述,可以参阅文献<sup>[19]</sup>。

### 1.2 模拟退火优化算法

Metropolis 在 1953 年首先提出模拟退火算法的基本思想,然后由 Kirkpatrick 在 1983 年成功引入优化领域,其基本思想是通过模拟高温物体退火过程的方法来找到优化问题的全局最优解。在固体的降温退火过程中,其能量状态服从 Boltzmann 分布规律。对于大多数组合优化问题,模拟退火算法要优于局部搜索法,特别是当目标函数不可微、多极值甚至时变情况下,更能显示出该方法的优越性。

设  $n$  为在温度  $T$  下参数的调整次数, $m$  为总的迭代次数,结论参数的转置矩阵为  $\mathbf{P}^i, \mathbf{P}^i = (p_0^i, p_1^i, \dots, p_n^i)^T$ , 总的调整次数为  $m$  和  $n$  的乘积, $\hat{c}_i, \hat{\sigma}_i, \hat{\mathbf{P}}^i, \hat{E}$  分别为  $c_i, \sigma_i, \mathbf{P}^i, E$  调整后的对应值,则利用模拟退火算法优化模糊神经网络的具体步骤如下<sup>[20]</sup>:

(1) 设置初始参数  $c_i, \sigma_i, \mathbf{P}^i$ , 计算对应的均方误差  $E$ , 选择初始温度  $T = 1.0$ 。

(2) 随机调整初始参数  $c_i, \sigma_i, \mathbf{P}^i$ , 产生一组新的参数  $\hat{c}_i, \hat{\sigma}_i, \hat{\mathbf{P}}^i$ , 计算  $E$  对应的均方误差  $\hat{E}$ 。

(3) 若  $\hat{E} < E$ , 则令  $c_i = \hat{c}_i, \sigma_i = \hat{\sigma}_i, \mathbf{P}^i = \hat{\mathbf{P}}^i$  (接纳新解); 若  $n$  未达到次数, 转至步骤 2。

(4) 若  $\hat{E} < E$ , 则令  $c_i = \hat{c}_i, \sigma_i = \hat{\sigma}_i, \mathbf{P}^i = \hat{\mathbf{P}}^i$ ; 若  $n$  已达到次数, 但  $m$  未达到次数, 调整温度  $T' = 0.9T$ , 再转至步骤 2。

(5) 若  $\hat{E} > E$ , 则以概率  $p = \exp[-(\hat{E} - E)/T]$  确定是否接纳新解; 若  $n$  未达到次数, 转至步骤 2。

(6) 若  $\hat{E} > E$ , 则以概率  $p = \exp[-(\hat{E} - E)/T]$  确定是否接纳新解; 若  $n$  已达到次数, 但  $m$  未达到次数, 调整温度  $T' = 0.9T$ , 再转至步骤 2。

(7) 若步骤 4、6 中,  $m$  已达到次数, 则停止迭代, 此时的参数  $c_i, \sigma_i, \mathbf{P}^i$  解就是所求的最优解。

## 2 单桩竖向极限承载力预测模型

单桩竖向极限承载力主要取决于 2 个方面, 即桩身的材料强度和土对桩的支撑力<sup>[21]</sup>。土对桩的支撑力由桩侧摩阻力和桩端阻力提供, 而桩侧摩阻力和桩端阻力发挥的程度又与桩的入土深度、桩周土和桩端土的类别和性质、成桩方法、桩土相对位移的大小、桩体本身的材料以及桩的几何形状和尺寸、桩的类型、施工工艺等因素有关。由此可见, 单桩的

竖向极限承载力受众多因素的影响,且各因素之间存在高度复杂的非线性关系。在确定网络模型时,既要考虑到模型的有效性,又要考虑到参数的易得性,因此,选择有效桩长  $l$ 、桩径  $D$ 、桩侧摩阻力标准值  $\bar{q}_{\text{sik}}$  和桩端极限阻力标准值  $q_{\text{pk}}$  这 4 个参数作为网络的输入变量,单桩的极限承载力  $R_{\text{uk}}$  作为输出变量。将文献[22]中浙江省宁波地区的 45 根预应力管桩的实测资料作为样本,其中训练样本 30 个,预测样本 15 个,训练样本见表 1。

经过模拟退火算法优化后的模糊神经网络模型

获得了 8 条模糊规则,因此,每个输入变量有 8 个高斯型隶属度函数,经过 200 个训练周期,误差达到预先给定的目标值,训练过程的目标迭代曲线见图 1,训练样本的实测值和预测值对比见图 2,各输入数据训练前的隶属度见图 3,各输入数据训练后的隶属度见图 4。

将 15 个预测样本输入已训练好的模型中,检验该模型的学习效果,预测样本的实测值与预测值对比见图 5,并与文献[22]中采用的减法聚类算法预测结果进行了对比,见表 2。由表 2 可知,利用模拟

表 1 训练样本  
Tab. 1 Training Samples

样本编号	$l/\text{m}$	$D/\text{mm}$	$\bar{q}_{\text{sik}}/\text{kPa}$	$q_{\text{pk}}/\text{kPa}$	$R_{\text{uk}}/\text{kN}$	$R_{\text{uk}}$ 预测值/ $\text{kN}$	样本编号	$l/\text{m}$	$D/\text{mm}$	$\bar{q}_{\text{sik}}/\text{kPa}$	$q_{\text{pk}}/\text{kPa}$	$R_{\text{uk}}/\text{kN}$	$R_{\text{uk}}$ 预测值/ $\text{kN}$
1	500	47.0	20.7	1 400	1 900	1 900.098	16	500	46.0	13.3	800	1 100	1 099.984
2	500	45.0	18.5	1 400	1 650	1 650.013	17	600	57.0	18.5	2 300	2 700	2 699.999
3	500	47.0	20.8	2 000	2 000	2 000.082	18	400	38.0	11.4	1 300	1 000	1 000.006
4	500	45.0	19.2	2 000	1 800	1 799.999	19	500	40.0	11.6	1 300	1 000	1 000.025
5	400	39.0	9.3	3 000	800	800.017	20	500	47.0	12.6	1 000	1 050	1 049.929
6	500	31.0	8.5	600	500	500.001	21	500	49.0	13.5	800	1 150	1 150.067
7	400	28.0	13.0	800	500	500.012	22	400	34.0	11.5	1 000	600	599.882
8	550	51.0	19.9	3 000	2 500	2 499.999	23	400	27.0	10.3	1 200	510	509.715
9	400	24.0	12.8	850	450	450.064	24	400	31.0	10.5	1 200	550	550.281
10	500	30.0	12.9	850	900	899.996	25	600	38.5	21.0	3 200	2 500	2 500.000
11	500	35.0	11.7	1 900	1 050	1 050.060	26	500	47.0	21.1	1 400	1 900	1 899.888
12	500	29.0	12.8	1 800	1 050	1 049.822	27	500	45.0	18.3	1 300	1 650	1 649.984
13	400	27.0	10.4	1 300	500	500.109	28	500	47.0	20.1	2 100	2 000	1 999.924
14	400	30.0	12.0	1 300	500	499.933	29	500	48.0	19.2	2 000	1 800	1 800.009
15	500	26.0	13.3	1 800	900	900.121	30	400	39.0	9.2	3 000	800	799.983

表 2 预测样本  
Tab. 2 Predicting Samples

样本 编号	$l/\text{m}$	$D/\text{mm}$	$\bar{q}_{\text{sik}}/\text{kPa}$	$q_{\text{pk}}/\text{kPa}$	$R_{\text{uk}}/\text{kN}$	本文计算结果		文献[22]计算结果	
						$R_{\text{uk}}$ 预测值/ $\text{kN}$	相对误差/ $\%$	$R_{\text{uk}}$ 预测值/ $\text{kN}$	相对误差/ $\%$
1	400	31.0	10.5	1 200	550	550.281	0.05	556	1.09
2	550	53.0	20.0	2 900	2 600	2 507.730	3.55	2 994	15.15
3	550	52.0	20.1	3 000	2 500	2 499.607	0.01	2 754	10.16
4	500	32.0	8.4	550	500	515.174	3.03	518	3.60
5	500	30.0	8.6	550	500	479.758	4.05	510	2.00
6	400	30.0	12.0	1 300	500	499.933	0.01	522	4.40
7	400	28.0	13.0	800	500	500.012	0.00	528	5.60
8	600	38.5	21.0	3 200	2 500	2 500.000	0.00	2 588	3.52
9	600	58.0	18.7	2 400	2 700	2 702.144	0.08	2 697	0.11
10	500	45.0	18.3	1 300	1 650	1 649.984	0.00	1 471	10.85
11	500	26.0	13.3	1 800	900	900.121	0.01	964	7.11
12	500	46.0	13.3	800	1 100	1 099.984	0.00	1 121	1.91
13	550	52.0	19.8	2 900	2 600	2 508.333	3.53	2 692	3.54
14	400	38.0	11.4	1 300	700	720.006	2.86	750	7.14
15	600	57.0	18.5	2 300	2 700	2 699.999	0.00	2 565	5.00

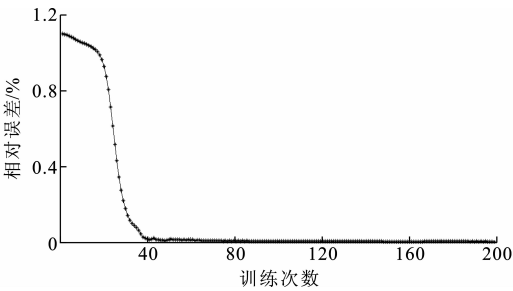


图 1 误差迭代曲线

Fig. 1 Error Iteration Curve

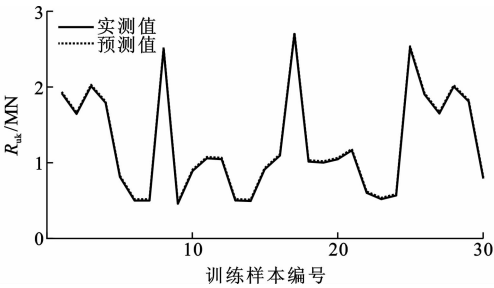


图 2 训练样本的实测值和预测值对比

Fig. 2 Comparisons Between Actual and Predictive Values of Training Samples

退火算法优化后的模糊神经网络模型训练的预测值与实测值相比，相对误差最大为 4.05%，最小为 0%；而文献[22]中采用减法聚类算法训练的模型相对误差最大为 15.15%，最小为 0.11%，可见经过优化后的模糊神经网络模型精度非常高，完全能满足实际工程需要。

3 结 语

单桩的竖向极限承载力受众多因素的影响，且各因素之间存在高度复杂的非线性关系，合理准确地预测单桩竖向极限承载力对桩基尤其是复合地基意义重大。本文中提出一种基于模拟退火算法来优化模糊神经网络的单桩承载力预测模型，通过对收集到的样本进行训练预测，并与常规的减法聚类算法预测结果进行对比可知：本文的算法明显优于常规的减法聚类算法，完全能满足实际工程需要。因此，本文中提出的单桩极限承载力预测的模糊神经网络模型是可行有效的，可以为类似工程提供借鉴和参考。

参考文献：

References:

[1] 刘勇健. 基于遗传-神经网络的单桩竖向极限承载力预测方法研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 59-63.  
LIU Yong-jian. Study of Prediction Method of Verti-

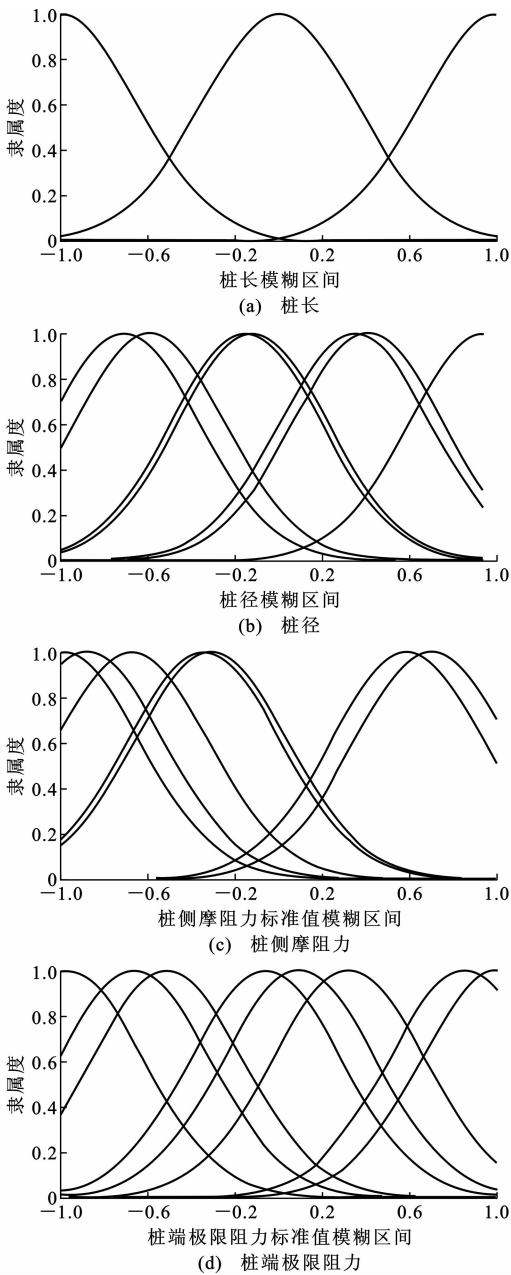


图 3 各输入数据训练前的隶属度

Fig. 3 Memberships of Every Input Data Before Training

cal Ultimate Bearing Capacity of Single Pile Based on Genetic Algorithm and Neural Network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 59-63.

[2] 计宏, 卢文晓. 静压桩挤土扩孔的有限元数值模拟研究[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(6): 722-725.  
JI Hong, LU Wen-xiao. FEM Numerical Simulation of Hole Expansion Caused by Driving Static Pressure Pile[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(6): 722-725.  
[3] 蒋建平. 大直径超长桩的承载潜力问题探讨[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38(3): 333-338.

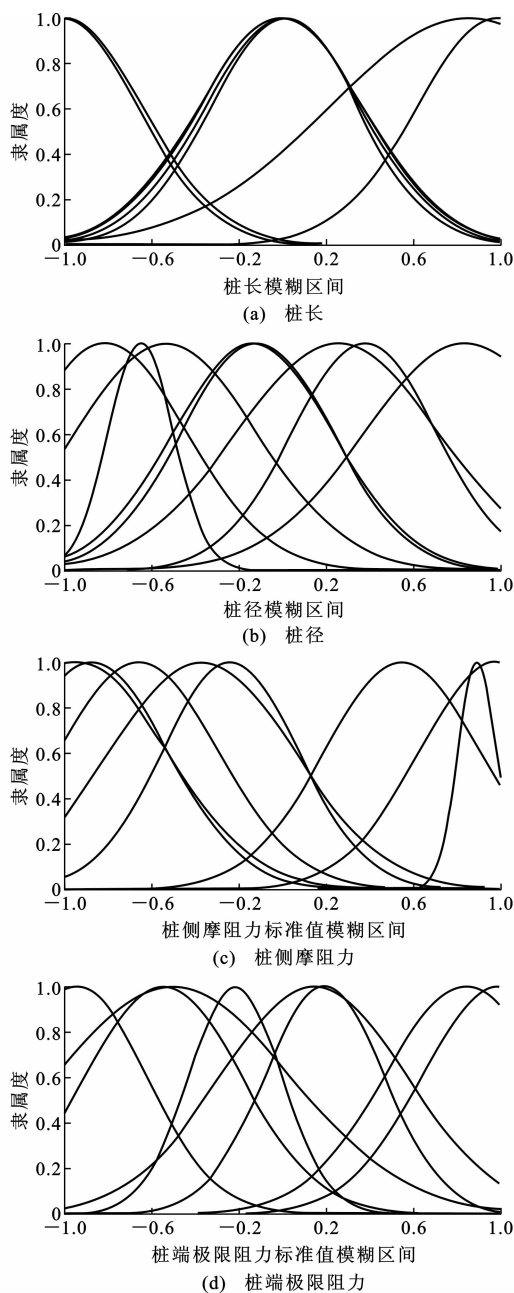


图4 各输入数据训练后的隶属度

Fig. 4 Memberships of Every Input Data After Training

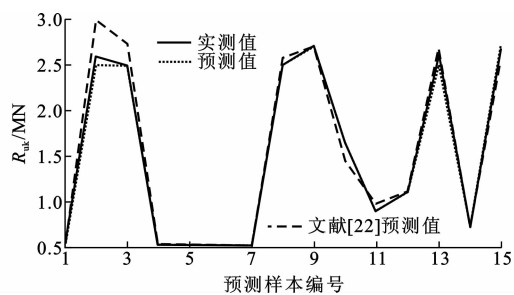


图5 预测样本的实测值和预测值对比

Fig. 5 Comparisons Between Actual and Predictive Values of Predicting Samples

JIANG Jian-ping. Study on the Potential Bearing Capacity of Long Diameter and Super-long Piles[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2006, 38(3): 333-338.

[4] 谢星, 王东红, 赵法锁, 等. 黄土地区两种成孔工艺钻孔灌注桩承载力性状对比研究[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(1): 42-46.

XIE Xing, WANG Dong-hong, ZHAO Fa-suo, et al. Comparison for Bearing Behavior of Longhole Bored Pile by Two Types of Holing Technology in Loess Foundation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(1): 42-46.

[5] 闫韩生, 曹森虎, 韩茂蔚. CFG桩在处理湿陷性黄土地基中的应用研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(2): 218-223.

YAN Han-sheng, CAO Sen-hu, HAN Mao-wei. Mechanism Analyses of Disposal of Collapsed Loess with CFG Pile[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(2): 218-223.

[6] 陈昌富, 周志军. 路堤下水平加筋体与散体材料桩复合地基极限承载力[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 1-9.

CHEN Chang-fu, ZHOU Zhi-jun. Limit Bearing Capacity of Composite Foundation Reinforced with Geosynthetic and Granular Pile Under Embankment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 1-9.

[7] 易耀林, 刘松玉, 朱志铎. 路堤荷载下钉形搅拌桩复合地基沉降特性[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 1-7.

YI Yao-lin, LIU Song-yu, ZHU Zhi-duo. Settlement Behavior of T-shaped Deep Mixed Column Composite Foundation Under Embankment Load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 1-7.

[8] 易耀林, 刘松玉, 杜延军. 路堤荷载下钉形搅拌桩复合地基附加应力扩散特性[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 8-14.

YI Yao-lin, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Additional Stress Distribution Behavior of T-shaped Deep Mixed Column Composite Foundation Under Embankment Load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5): 8-14.

[9] 冯忠居, 任文峰, 李晋. 后压浆技术对桩基承载力的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 35-38.

FENG Zhong-ju, REN Wen-feng, LI Jin. Bearing Capacity of Post-grouting Pile Foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006,

- 26(3):35-38.
- [10] 方磊,谢永利. 柔性基础下复合地基桩土应力比模型试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(2):30-32.
- FANG Lei, XIE Yong-li. Model Experiment of Pile-soil Stress Ratio of Composite Ground Under Flexible Foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2005,25(2):30-32.
- [11] 冯忠居,谢永利,李哲,等. 大直径超长钻孔灌注桩承载性状[J]. 交通运输工程学报,2005,5(1):24-27.
- FENG Zhong-ju, XIE Yong-li, LI Zhe, et al. Bearing Property of Large-diameter Over-length Nonplacement Pile[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2005,5(1):24-27.
- [12] 庄宁,周小刚,赵法锁. 单桩负摩阻力的双折线模型理论解[J]. 地球科学与环境学报,2006,28(1):62-68.
- ZHUANG Ning, ZHOU Xiao-gang, ZHAO Fa-suo. Theoretical Solution of Single Piles Negative Friction by Double Broken Line Model[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2006,28(1):62-68.
- [13] 杨磊,徐洪钟. 基于 ANFIS 的单桩竖向极限承载力预测模型[J]. 岩土力学,2006,27(增2):822-825.
- YANG Lei, XU Hong-zhong. Predicting Model of Vertical Ultimate Bearing Capacity of Single Pile Using Adaptive Neuro-fuzzy Inference System[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(S2):822-825.
- [14] 郑俊杰,郭嘉,鲁燕儿. 基于免疫算法的单桩极限承载力预测[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2006,23(2):5-8.
- ZHENG Jun-jie, GUO Jia, LU Yan-er. Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Pile Based on Immune Algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition,2006,23(2):5-8.
- [15] 童瑞铭,程永锋,鲁先龙,等. 基于遗传算法的单桩极限承载力灰色预测法[J]. 武汉大学学报:工学版,2007,40(增1):270-273.
- TONG Rui-ming, CHENG Yong-feng, LU Xian-long, et al. Gray Prediction Ultimate Bearing Capacity of Single Pile Based on Genetic Algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2007,40(S1):270-273.
- [16] 赵岚,王国体,许小健. 微分进化算法在单桩极限承载力灰色优化预测中的应用[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(2):245-248.
- ZHAO Lan, WANG Guo-ti, XU Xiao-jian. Application of the Differential Evolutionary Algorithm in Optimal Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Single Piles[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science,2009,32(2):245-248.
- [17] 郑永保,陈建功,董占文. 应用径向基函数神经网络预测单桩极限承载力[J]. 地下空间,2004,24(4):519-521.
- ZHENG Yong-bao, CHEN Jian-gong, DONG Zhan-wen. Application of RBF Neural Network in Estimating Vertical Ultimate Bearing Capacity of Single Piles[J]. Underground Space,2004,24(4):519-521.
- [18] 王德意,罗兴铨,匡伯燕,等. 遗传算法在水轮发电机模糊神经网络励磁控制器设计中的应用研究[J]. 水力发电学报,2004,23(6):24-28.
- WANG De-yi, LUO Xing-qi, KUANG Bo-yan, et al. Study on Application of Genetic Algorithm in Design of Fuzzy Neural Network Excitation Controller of Hydro-generator[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2004,23(6):24-28.
- [19] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control[J]. IEEE Transactions on Systems, Management and Cybernetics,1985,15(1):116-132.
- [20] 刘贵喜,赵曙光,杨万海. 基于 T-S 模糊模型的隶属度函数学习算法[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版,2000,27(5):550-553.
- LIU Gui-xi, ZHAO Shu-guang, YANG Wan-hai. Learning Algorithm of Membership Functions Based on the T-S Fuzzy Model[J]. Journal of Xidian University: Natural Science,2000,27(5):550-553.
- [21] 杨位光. 地基及基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- YANG Wei-guang. Soils and Foundations[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2000.
- [22] 汪能君,雷勇军,郑荣跃. 单桩极限承载力的 ANFIS 预测分析[J]. 黑龙江科技学院学报,2006,16(2):124-126,134.
- WANG Neng-jun, LEI Yong-jun, ZHENG Rong-yue. Predicting Bearing Capacity of Single Pile Using ANFIS[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology,2006,16(2):124-126,134.