doi:10.11988/ckyyb.20160754 2017,34(11):66-71

静载荷试验确定复合地基承载力的安全储备研究

赖夏蕾[a,b],简文彬[a,b]
(福州大学 a.环境与资源学院;b.岩土工程与工程地质研究所,福州 350108)

摘 要:未加载充分的现场静载荷试验不能完全反映地基承载力情况,有可能导致复合地基安全储备过高。结合闽东沿海某工程,在静载荷试验未加载充分的情况下,利用灰色模型预测了单桩和复合地基的极限承载力。同时,定义复合地基承载力极限值与按相对变形确定的特征值之比为 K,K 是一个反映复合地基承载力安全储备的安全系数。通过统计同地区113组复合地基静载荷试验结果,确定了水泥土搅拌桩复合地基的 K 值。经过验证,K 值同样适用于该工程。因此 K 具有一定地区性,在根据相对变形确定复合地基承载力特征值后,利用 K 可以一定程度上预测复合地基承载力极限值,从而为较直观认知复合地基的安全储备提供参考。

关键词:水泥土搅拌桩;静载荷试验;复合地基承载力;安全系数;灰色模型
中图分类号:TU447 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-5485(2017)11-0066-06

1 研究背景

静载荷试验是确定复合地基承载力特征值的重要方法。通过对现场静载荷试验进行分析与研究,能更加全面地了解复合地基承载力特性。国外学者通过载荷试验或数值分析,分别从地基承载力的影响因素、判定指标等方面对地基承载力进行了研究[1-6]。国内复合地基的运用实例较多,许多学者通过静载荷试验对复合地基承载力的计算进行了讨论,修正了计算参数及方法[7-9]。在实际工程中,现场静载荷试验可能未加载充分,此时通过试验并不能完全反映单桩及复合地基的承载力情况。基于此,马克生等[10]指出,复合地基承载力的安全系数是很重要的,静载荷试验能确保复合地基安全系数>2,但需探究如何能同时节约工程造价。张蕾[11]认为单一的划分标准并不能全面反映复合地基受力程度,可考虑降低安全系数。《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)[12]规定,利用静载荷试验确定单桩承载力极限值时,可取桩顶总沉降为40 mm时对应的荷载值。在试验条件受限,试验未达极限状态时,目前已可通过灰色系统理论法、神经网络理论法等方法预估极限值。但当确定复合地基承载力时,规范标准是:将加载极限的一半与 $s/b=0.006$(s 为承压板沉降,b 为载荷板宽度)时的荷载中的较小值定义为复合地基承载力特征值。显然,当试验未加载充分时,该方法无法反映复合地基承载力极限值,且此时确定的承载力安全储备是不明确的,可能使复合地基的承载力安全储备过大,导致工程造价上的浪费。

通过对闽东地区某工厂的水泥土搅拌桩复合地基静载荷试验进行分析,在试验未加载充分的情况下,利用灰色模型预测了单桩及复合地基的极限承载力。此外,将复合地基承载力极限值与特征值的比值定义为安全系数 K,统计了同地区113组水泥土搅拌桩复合地基的静载荷试验结果,总结出该地区复合地基承载力安全系数 K 的大小。最后,利用该工程的试验结果验证了安全系数统计分析结果的可靠性。因此,该地区性 K 值可与静载荷试验结合,近似计算复合地基极限承载力,一定程度上预测复合地基承载力极限值,以更好地了解复合地基承载力安全储备,减少造价浪费。

2 现场静载荷试验分析

复合地基承载力特征值是水泥土搅拌桩复合地基设计的重要依据,需通过现场单桩或多桩复合地基静载荷试验确定。

2.1 工程实例

结合闽东地区某污水处理厂的现场静载荷试验进行分析。为了确定复合地基承载力大小,同时检

收稿日期:2016-07-31;**修回日期**:2016-08-21
作者简介:赖夏蕾(1992-),女,福建龙岩人,硕士研究生,主要从事地基处理与地质灾害研究,(电话)18218419013(电子信箱)15200718950@163.com。
通信作者:简文彬(1963-),男,福建龙岩人,教授,博士,主要从事岩土工程与工程地质教学与科研工作,(电话)13178116302(电子信箱)jwb@fzu.edu.cn。

验施工质量,在复合地基施工完成一段时间后进行现场静载荷试验,试验池体共 4 个,编号为池(a)—池(d),池(a)选取 4 根桩,其余池体选取 3 根桩,共计 13 根桩。试验内容包括单桩静载荷试验和单桩复合地基静载荷试验。

该工厂坐落在深近 60 m 的软基上,采用水泥土搅拌桩处理地基。施工采用强度等级为 425#的普通硅酸盐水泥,水泥掺入量为 15%,水灰比为 0.45。桩体直径为 0.5 m,桩长 10 m,桩间距 1.2 m 或 1.0 m。

规范[12]单桩竖向承载力特征值 R_a 的计算公式为

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^{n} q_{si} l_{pi} + \alpha_p q_p A_p \quad 。 \tag{1}$$

式中:u_p为桩的周长(m);q_{si}为桩周第 i(i=1,2,…,n)层土的侧阻力特征值(kPa),可按地区经验确定;l_{pi}为桩长范围内第 i 层土的厚度(m);α_p 为桩端端阻力发挥系数,可取 0.4~0.6,应按地区经验确定;q_p为桩端端阻力特征值(kPa),对于水泥搅拌桩取未经修正的桩端地基土承载力特征值,可按地区经验确定;A_p为桩的截面积(m^2)。

同时,规范[12]规定计算单桩承载力特征值时,结果还需满足

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad 。 \tag{2}$$

式中:η 为桩身强度折减系数,取 0.25;f_{cu}为与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块,边长为 70.7 mm 的立方体在标准养护条件下 90 d 龄期的立方体抗压强度平均值(kPa)。

由式(1)、式(2)可得到单桩承载力特征值的理论计算结果为 95.23 kN。

复合地基承载力特征值f_{spk}的计算公式为

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m) f_{sk} \quad 。 \tag{3}$$

式中:λ 为单桩承载力发挥系数,可按地区经验取值;m 为面积置换率;β 为桩间土承载力发挥系数,可按地区经验取值;f_{sk}为处理后桩间土承载力特征值。计算时,根据规范[12],λ 取 1.0,β 取 0.1~0.4。为了安全起见,设计时β 取低值。

各池的复合地基承载力特征值计算结果见表 1。

表 1　初步设计确定的承载力特征值

Table 1　Bearing capacity in preliminary design

池体编号	置换率 m/%	单桩承载力特征值 R_a/kN	复合地基承载力特征值f_{spk}/kPa
池(a)	13.64	95.23	69.61
池(b)	19.63	95.23	98.42
池(c)	19.63	95.23	98.42
池(d)	13.64	95.23	69.61

2.2　单桩静载荷试验结果与分析

设计文件规定单桩承载力特征值不应小于 60 kN,故将最大测试荷载设置为 120 kN。测试时,由安装在桩顶的油压千斤顶进行逐级加荷,千斤顶所需的反力由混凝土预制块堆重平台承担,千斤顶为 QF50T 型,桩顶沉降由对称方向安装的大量程百分表测读。测试加荷方式为慢速维持荷载法,每级荷载增量为 12 kN,最大测试荷载加至 120 kN。试验结果见表 2。

表 2　单桩静载荷试验结果

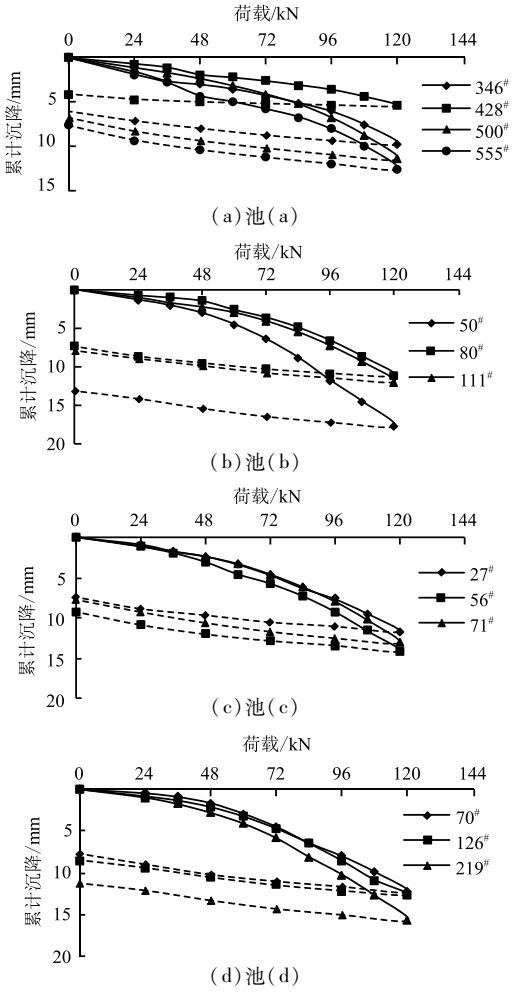
Table 2　Results of static load test of single pile

池体编号	测桩编号	最大测试荷载/kN	最大测试荷载下桩顶累计沉降/mm
池(a)	346#	120	9.81
	428#	120	5.47
	500#	120	11.52
	555#	120	12.66
池(b)	50#	120	17.70
	80#	120	11.15
	111#	120	11.94
池(c)	27#	120	11.72
	56#	120	14.17
	71#	120	13.14
池(d)	70#	120	12.34
	126#	120	12.67
	219#	120	15.74

从表 2 中可以看到,最大测试荷载作用下桩顶的累计沉降最大值为 17.70 mm,与规范规定的试验极限值 40 mm 相差较大,且没有突增,可认为满足设计要求。

图 1 为 4 组单桩静载荷试验的 Q-s(Q 为荷载)曲线,由图 1 可直观看到,各桩变形缓慢,累计沉降均较小。

规范[12]中规定,当 Q-s 曲线为缓变形时,取沉降 s=40 mm 时对应荷载为单桩承载力极限值。由于工程实际的限制,本次试验仅加载至设计要求的极限荷载。为了深入了解单桩承载力极限值,可以对其进行预测。国内外预测单桩承载力极限值的方法分为模型方法和曲线拟合法,如指数模型[13]、双曲线模型[13]、灰色模型[14-16]、剪切位移法等[17]。上述方法中,由于指数模型及灰色模型的相关研究较为丰富,实现也较为方便,故本文选取了指数模型及灰色模型对单桩承载力极限值进行预测。根据 MatLab 编程及数据拟合计算后,将 2 种方法的计算结果对比分析,得到指数模型的变异系数为0.074,灰色模型的变异系数为 0.055,因此最终取灰色模型的计算结果。



注:虚线段为回弹曲线,下同

图 1 各单桩静载荷试验 *Q-s* 曲线

Fig.1 Load-displacement curves for loading test of single pile

单桩极限力除以安全系数即可得到单桩承载力特征值[12],将灰色预测得到的单桩极限承载力及相应的单桩承载力特征值列于表 3。

表 3 灰色模型预测的单桩承载力

Table 3 Bearing capacity of single pile predicted by grey model

池体编号	单桩极限承载力预测值/kN	单桩承载力特征值 R_a/kN
池(a)	198	99
池(b)	172	86
池(c)	180	90
池(d)	180	90

由表 3 可知,通过灰色模型预测得到的单桩承载力特征值最大为 99 kN,最小为 86 kN,除了最大值之外,其余结果均未达到单桩承载力特征值的理论计算结果 95.23 kN。

2.3 复合地基静载荷试验结果与分析

水泥土搅拌桩是一种低强度的柔性桩,在静载试验中得到的复合地基 *Q-s* 曲线一般为缓变型。规范[12]根据相对变形,取 $s/b=0.006\sim0.008$ 对应的荷载作为复合地基承载力特征值,试验中取$s/b=0.006$作为标准。规范还规定按相对变形确定的承载力特征值不应大于最大加载压力的一半,故复合地基承载力特征值将取两者中低值。

对 4 个池体的共计 13 个测桩分别进行复合地基静载荷测试,试验过程进展顺利,复合地基未达极限承载状态。试验结果列于表 4,为了了解复合地基承载力极限值,仍采用灰色模型得到复合地基承载力极限值,结果也列于表 4 中。根据试验结果作出的复合地基 *Q-s* 曲线见图 2。

由表 4 可以看到,4 组复合地基载荷试验所得到的复合地基承载力特征值均达到了设计要求。由图2可知,复合地基载荷试验得到的*Q-s*曲线均为缓变型,承载力仍有发展空间。4个池体的复合地

表 4 复合地基静载荷试验结果

Table 4 Results of static load test of composite foundation

池体编号	测桩编号	载荷板尺寸/(m×m)	最大测试荷载/kPa	$s/b=0.006$ 时对应荷载/kPa	平均值/kPa	载荷试验下的复合地基承载力特征值/kPa	复合地基承载力极限值预测结果/kPa
池(a)	120#	1.2×1.2	250	163	149	125	482.73
	171#		250	148			
	480#		250	146			
	508#		250	138			
池(b)	39#	1.0×1.0	190	147	158	95	373.00
	70#		190	169			
	83#		190	159			
池(c)	14#	1.0×1.0	180	151	154	90	376.18
	52#		180	159			
	81#		180	152			
池(d)	36#	1.0×1.0	240	122	123	120	412.68
	108#		240	125			
	188#		240	121			

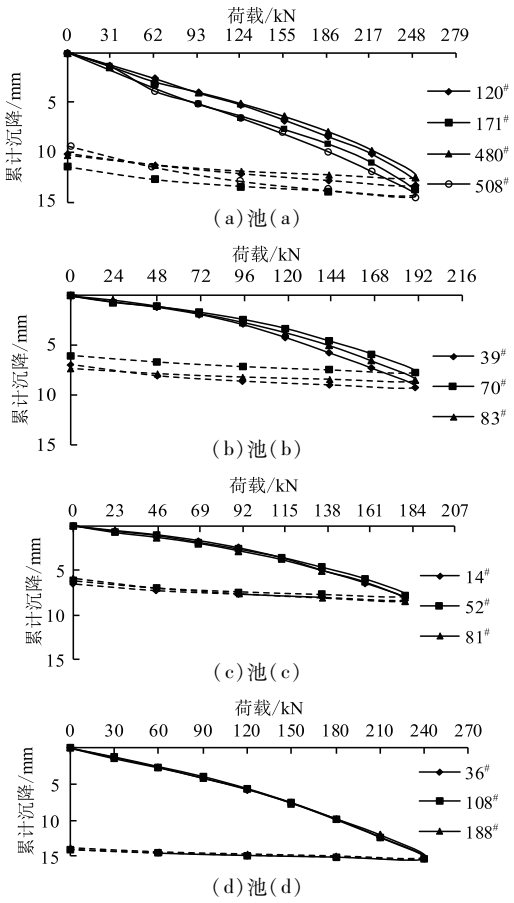


图 2　各单桩复合地基载荷试验 *Q-s* 曲线

Fig.2　Load-displacement curves for loading test of composite foundation

基承载力特征值分别取最大加载压力的一半,得到池(a)—池(d)的复合地基承载力特征值分别为125,95,90,120 kPa。

2.4　讨　论

表 3 反映了实测的水泥土搅拌桩单桩承载力特征值相对设计值低一些,可以看到,式(1)中单桩承载力特征值由桩侧摩阻力和桩端端阻力贡献,式(2)中则主要由材料强度控制。单桩承载力试验结果满足式(1)的要求,而不满足式(2)的要求,因此,使水泥土搅拌桩单桩承载力实测值小于设计值的原因,一方面,可以归结为式(2)中桩身强度折减系数取值较大。《复合地基技术规范》(GB/T 50783—2012)[18]中规定喷粉深搅法 η 可取 0.20~0.30,喷浆深搅法 η 可取0.25~0.33。本文取值为 0.25,可适当降低。另一方面,由于桩长较长,搅拌桩施工过程也可能出现工艺问题,需要严格控制搅拌桩施工质量。

试验表明复合地基承载力达到了要求。由于该工程下软基深度很大,水泥土搅拌桩并未打穿淤泥质土层,桩端承载条件较差。根据徐超等[19]的研究,深厚的软基使桩体易向下刺入,桩间土的强度能得到较充分的发挥。故可认为实际的桩间土承载力贡献比理论计算大一些。桩间土承载力发挥系数 β 受桩端土层、桩长等因素的影响,要准确计算出 β 有一定难度,可在设计中在 0.1 的取值基础上进行提高。此外,单桩承载力发挥系数可取大于 1 的系数。

通过对国内部分复合地基载荷试验的对比与总结[8-11,19-22],发现在这些载荷试验中,也存在部分未加载充分的情况,此时复合地基承载力的确定具有不确定性,因此在复合地基设计之前,需要获取同地区的试验经验。

3　安全系数 K 的确定

当试验未能测得复合地基承载力极限值时,复合地基承载力的安全储备是不明确的。本文将安全系数 K 定义为复合地基承载力极限值与特征值的比值,其中复合地基承载力极限值根据灰色模型预测得到,特征值按相对变形确定,即 $s/b=0.006$ 的对应荷载。K 值能一定程度上反映复合地基承载力安全储备的大小,确定了地区性的 K 值之后,当载荷试验未达极限状态时,即可通过按相对变形确定的承载力特征值乘以 K,估算复合地基承载力极限值。

根据表 4 中复合地基承载力的极限值与特征值计算,得到 K 值,见表 5。从表 5 中可知,池(a)和池(d)的 K 值相近,约为 3.3;池(b)与池(c)的 K 在2.4左右。对比之后发现不同池体 K 值有所差异,这主要是由于各池的极限承载力的不同(置换率和载荷板尺寸造成了复合地基极限承载力的差异)。

表 5　安全系数 *K* 的计算结果

Table 5　Calculation results of safety coefficient *K*

池体编号	安全系数 K	池体编号	安全系数 K
池(a)	3.24	池(c)	2.44
池(b)	2.36	池(d)	3.36

当数据量增多时,K 值的规律可能会得到更好体现。因此另统计闽东地区 5 个试验区域共计 113 组复合地基静载荷试验,以了解该地区安全系数 K 的取值范围,将 K 的统计结果列于表 6。

从表 6 中可以看到,尽管水泥土搅拌桩复合地基的设计(如桩长、置换率等因素)、试验场地、试验条件有所差异,但 113 组复合地基载荷试验得到的安全系数 K 值较为相近,均值为 2.84,方差为 0.006 8。

在水泥土搅拌桩复合地基的设计中,桩的有效桩长是决定复合地基承载力的一个重要指标。而在被统计的载荷试验中,水泥土搅拌桩的长度从 6~17 m

表 6 闽东地区 113 组复合地基静载荷试验 K 值统计结果

Table 6 Statistic data of the K value of static load test for cement-soil pile composite foundation in East Fujian

试验区域	组数	置换率/%	平均桩长/m	桩径/mm	承压板尺寸/(m×m)	最大试验荷载/kN	$s/b=0.006$ 所对应的平均荷载/kPa	预测得到的复合地基承载力极限值/kPa	安全系数 K
荆溪	16	16.50	7.5	550	1.20×1.20	360	166.3	483.5	2.91
南屿①	30	8.80	7.7	500	1.49×1.49	380	119.9	345.8	2.88
南屿②	30	8.80	9.4	500	1.49×1.49	380	128.7	350.9	2.73
青口①	18	9.87	16.5	500	1.41×1.41	480	166.5	462.4	2.78
青口②	19	15.74	16.5	500	1.12×1.12	408	178.9	520.5	2.91

不等,较集中于 9 m 左右。根据相关研究[22-23],水泥土搅拌桩作为摩擦桩的一种,当桩的长度增大时,桩的承载力增长会越来越缓慢,即存在有效桩长。一般认为,水泥土搅拌桩的有效桩长为 10 m 左右,8 m之前桩长对承载力的增长作用最为显著。当桩长小于有效桩长时,复合地基的承载力有提升空间;当桩长大于该值时,复合地基承载力的提高则较不显著。另一方面,影响水泥土搅拌桩复合地基承载力的另一因素——置换率,也有同样规律,即存在一个合理置换率。一般认为,该值在 13%~20%范围内。当实际置换率小于合理置换率时,承载力增加得较为明显,而大于该值时增加速率减慢。

因此,同地区水泥土搅拌桩复合地基,当桩长、面积置换率这些因素有所差异时,若设计桩长和置换率落在合理范围内,试验确定的 K 值仍是相近的,因此可认为 K 值具有一定地区性。而在前文所结合的某工程实例中,所计算出的 K 值为 3.24,2.36,2.44,3.36,均值为 2.85,方差为 0.27,其均值也落在统计结果之内。故可认为闽东地区复合地基承载力极限值和特征值的比值约为2.8,即 K 近似 2.8,这一结果具有可靠性。当试验未加载完全时,根据该值与利用相对变形确定的复合地基承载力特征值预估极限值可作为复合地基承载力的一种近似计算方法。需要指出的是,K 值作为统计量,其精度还需要增加试验数据加以完善,同时也需要加载完全的复合地基载荷试验补充验证。本文方法可作为地区性复合地基承载力分析的一种辅助的近似计算。

4 结 论

(1)通过现场静载荷试验确定的单桩及复合地基承载力特征值与初步设计的计算值有一定偏差。其中,单桩承载力特征值实测值小于设计值,复合地基承载力特征值实测值大于设计值。因此在计算参数的选取上,需要借鉴大量的地区相关试验。

(2)试验得到的水泥土搅拌桩复合地基的单桩及复合地基 Q-s 曲线均为缓变型。由于试验未加载充分,分别通过指数模型和灰色模型对承载力极限值进行预测,并最终选择变异系数较小的灰色模型对载荷试验 Q-s 曲线进行拟合,预测了单桩及复合地基承载力极限值。

(3)根据统计分析,确定闽东地区复合地基承载力极限值与按相对变形确定的特征值之比为 2.8,即安全系数 K 值为 2.8。当静载荷试验未加载完全时,可根据该值对复合地基承载力极限值进行预测。

参考文献:

[1] NICOLA A D, RANDOLPH M F. Tensile and Compressive Shaft Capacity of Piles in Sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 119(12): 1952-1973.

[2] KHING K H, DAS B M, PURI V K, *et al*. The Bearing-capacity of a Strip Foundation on Geogrid-reinforced Sand[J]. Geotextiles & Geomembranes, 1993, 12(4): 351-361.

[3] BOLTOM M D, LAU C K. Vertical Bearing Capacity Factors for Circular and Strip Footings on Mohr-Coulomb Soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(6): 1024-1033.

[4] BOUSHEHRIAN J H, HATAF N. Experimental and Numerical Investigation of the Bearing Capacity of Model Circular and Ring Footings on Reinforced Sand[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2003, 21(21): 241-256.

[5] HWANG J H, FU Z X, YEH P Y, *et al*. Axial Bearing Behaviour of a Model Pile in Sand under Multiple Static Cycles[J]. Geotechnical Engineering, 2014, 45(2): 52-61.

[6] KUMAR J, CHAKRABORTY M.Bearing Capacity Factors for Ring Foundations[J].Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(10): 066015007. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001345.

[7] 黄春霞,张鸿儒,桂国庆.水泥土搅拌桩复合地基承载力公式中折减系数 β 取值的分析[J].工程地质学报,2003, 11(4):385-389.

[8] 林奕禧,张伟丽,黄良机,等.水泥土搅拌桩复合地基承载力折减系数 α 和 β 的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009, 28(增 2):3815-3820.

[9] 付文光.一种用桩土载荷试验结果计算复合地基承载力的方法[J].岩土工程学报,2013, 35(增 2): 592-595.

[10] 马克生,梁仁旺,白晓红.水泥搅拌桩复合地基承载力

的试验确定[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2652-2654.
[11] 张　蕾.原位载荷试验确定复合地基承载力方法研究[J].岩土力学,2014,35(增 2):240-244.
[12] JGJ 79—2012,建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
[13] 李小芳,陆培毅.深层搅拌复合地基的极限承载力预测模型探讨[J].岩土力学,2004,25(2):327-329.
[14] 戚科骏,徐美娟,宰金珉.单桩承载力的灰色预测方法[J].岩石力学与工程学报,2004,23(12):2069-2071.
[15] 罗战友,董清华,龚晓南.未达到破坏的单桩极限承载力的灰色预测[J].岩土力学,2004,25(2):304-307.
[16] YANG F, SUN L Z, XIE Z L, *et al*. Influence of Grey System Parameter Identification Method on Prediction of Bearing Capacity of Piles [J]. The ACS Journal of Surfaces & Colloids, 2011, 243/249(6): 2044-2049.
[17] 许晶菁,陈颖辉,鲁忠军,等.柔性桩的 *Q-s* 曲线的拟合[J].工业建筑,2006,36(增 1):697-700.
[18] GB/T 50783—2012, 复合地基技术规范[S].北京:中国计划出版社,2012.
[19] 徐　超,叶观宝.水泥土搅拌桩复合地基的变形特性与承载力[J].岩土工程学报,2005,27(5):600-603.
[20] 蔡来炳.福州地区水泥土搅拌桩复合地基承载特性的研究[J].建筑结构,2003,(3):7-9.
[21] 王成锋,刘　宏,高振鲲.载荷试验确定水泥土搅拌群桩复合地基承载力[J].路基工程,2008,(4):155-157.
[22] 黄春霞,韩爱民,隋志龙,等.水泥土搅拌桩复合地基承载力的确定[J].水文地质工程地质,2009,36(3):99-102.
[23] 孙广灿.水泥土搅拌桩群桩复合地基承载力确定方法的分析与研究[D].太原:太原理工大学,2010.

(编辑:罗　娟)

A Safety Reserve Index Evaluating the Bearing Capacity of Composite Foundation Based on Loading Test

LAI Xia-lei[1,2], JIAN Wen-bin[1,2]

(1.College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering and Engineering Geology, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In some projects there are restrictions in static loading tests and thus the characteristic load bearing capacity is unable to be determined. Through analyzing a project of cement-soil pile composite foundation, the ultimate bearing capacity of the piles and composite foundation is predicted with "gray model" under limited test conditions. Meanwhile, the ratio of the bearing capacity to the characteristic bearing capacity determined from relative deformation is defined as safety reserve index "*K*", and 113 groups of static loading test are analyzed to obtain the *K* value of this region. The statistical result is confirmed by the project. It should be noticed that *K* is a regional and experiential value, and it can be used to predict the ultimate bearing capacity of cement-soil pile composite foundation based on the known bearing capacity determined by relative deformation.

Key words: cment-soil piles; static loading test; bearing capacity of composite foundation; safety reserve; gray model

(上接第 65 页)

of macroscopic engineering properties of rock and soil materials. We discussed the issues of statistical error, pixel size, and statistical algorithms for pixel-particle-filling method by simulating pore structures in rock and soil samples using PFC2D (2-dimensional particle flow code). Results show that taking into account both statistical error and algorithmic efficiency, we recommend 1/20 of the radius of the smallest particle as the proper radius for pixel-particle-filling used for pore structure statistics. We also compared three pore volume statistical algorithms and found that round-off method is the optimal. Moreover, we proposed a method to obtain the curve of equivalent pore size distribution, based on which further research works are able to be conducted on the 3D pore structures model, the characteristics of the pore structures and the relationship among these characteristics and macro-mechanical behaviors and engineering properties of rock-soil.

Key words: pore structure; pixel-particle-filling method; PFC2D; equivalent pore size distribution curve; round-off method