

超长大直径钻孔灌注桩群桩效应系数研究

邓友生¹, 龚维明², 袁爱民³

(1 湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430068; 2 东南大学 土木工程学院, 南京 210096; 3 河海大学, 南京 210098)

摘要:针对超长大直径钻孔灌注群桩效应系数,研究了5种计算公式或方法,其中基于应力叠加的群桩效应系数计算公式,考虑了桩长、桩径、土层的内摩擦角以及地基土应力叠加等影响因素,适合计算超长大直径钻孔灌注群桩效应系数。然后,基于苏通长江公路大桥主5号墩超长大直径钻孔灌注群桩基础桩长、桩径和地基土层条件,分别计算了 2×2 群桩与 3×3 群桩的群桩效应系数值,并与相应类型群桩离心模型试验的群桩效应系数值进行比较。研究表明,计算值仅低于试验值 $7.2\% \sim 12.7\%$,说明该群桩效应系数计算公式具有一定的合理性,可为超长大直径钻孔灌注群桩设计提供参考。

关键词:桥梁基础;群桩效应系数;应力叠加;超长大直径灌注群桩

中图分类号:U433.15 文献标志码:A 文章编号:1006-7329(2007)06-0084-04

Research on Effect Coefficient of Extra-long Large Diameter Bored Pile Groups

DENG You-sheng¹ GONG Wei-ming² YUAN Ai-min³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan, 430068, China; 2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effect coefficient of extra-long large diameter bored pile groups, five formulas or methods for effect coefficient of pile groups were analyzed. It is found that the formula based on stress superposition fits the calculation of the effect coefficient of extra-long large diameter bored pile groups. The formula takes into the pile length, pile diameter, friction angle of soil layers and stress superposition. The effect coefficients of 2×2 pile groups and 3×3 pile groups were calculated based on the data of the soil layers, pile length and diameter for the pile groups under the fifth main pier in the Sutong Yangtse River Highway Bridges in P. R. China. The calculated theoretical values are compared with those of the centrifugal model test. The calculated ones are lower only by $7.2 \sim 12.7$ percent. This shows that the formula based on stress superposition for calculating the effect coefficient of extra-long large diameter bored pile groups is reasonable and can serve as a reference to design types of pile groups.

Keywords: bridge foundation; effect coefficient of pile groups; stress superposition; extra-long large diameter bored pile groups

1 超长大直径钻孔灌注桩

对于超长假桩的界定,国内有关桩基础的现行规范都没有明确指出^[1-3]。在工程中,人们对“超长假桩”有不同提法。阳吉宝等人认为超长假桩指桩长大于50 m的各种桩,主要有钢管桩、混凝土预制桩和钻孔灌注桩^[4-6];胡立明认为桩长大于60 m为超长假桩^[7];韦华将桩按其长度或长细比分为短、中短、长、超长假桩四类,

其中桩长大于50 m或长径比大于100的桩归为超长假桩^[8]。

至于大直径桩的界定,在建筑工程与桥梁工程应用中,也有不同的提法。《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94)按桩径大小分小直径桩、中等直径桩和大直径桩三类,并明确指出桩径 $d \geq 800$ mm的桩为大直径桩;国外一般认为桩径超过760 mm的桩为大直径桩^[9,10];

王伯惠、上官兴针对桥梁工程桩基础,特将桩径

* 收稿日期:2007-07-12

基金项目:江苏省交通厅立项资助科研项目(04Y029)

作者简介:邓友生(1969-),男,湖南桂阳人,博士,副教授,从事桥梁工程教学与科研。

2.5 m 以上的桩称为大直径桩^[11]。

综上所述,随着桩基工程的发展,结合本课题主要针对苏通长江公路大桥(以下简称苏通大桥)的桩基础进行研究,故本文所指超长直径钻孔灌注桩是指桩长大于 50 m、桩径为 2.5 m 以上的钻孔灌注桩。

2 群桩效应系数

试验表明,对于桩身强度较大、入土较深、地基土质均匀且强度较低的群桩基础,随着桩承台竖向荷载的不断增大,桩端土的不断变形,桩身贯入土中,其破坏形式为非整体刺入破坏^[12]。对于非整体破坏的群桩基础,其群桩极限承载力的计算在工程上广泛应用的便捷方法是以各单桩的极限承载力之和乘以群桩效应系数。

目前,确定群桩效应系数主要有 5 种方法^[13]:

(1)考虑群桩实体基础周边长的方法;(2)Converse-Labre 群桩效应系数公式;(3)Seiler-Keeney 群桩效应系数公式;(4)考虑承台、桩、土相互作用分项群桩效应系数计算方法;(5)考虑应力叠加的群桩效应系数公式。

2.1 考虑群桩实体基础周边长的方法

如群桩为 m 行、 n 列,桩数为 $m \times n$,桩距为 s_a ,桩径为 d ,则群桩周边长 p 可由以下公式计算:

对于圆形桩 $p = 2(m + n - 2)s_a + 4d$

单桩的总周边长 p' 可由下式计算

$$p' = mn(\pi d)$$

则群桩效应系数

$$\eta = \frac{p}{p'} = \frac{2(m + n - 2)s_a + 4d}{\pi mnd} \quad (1)$$

对于方桩:用 $4d$ 代替式(1)中的 πd 。

2.2 Converse-Labre 群桩效应系数公式

Converse-Labre 群桩效应系数公式:

$$\eta = 1 - tg^{-1} \frac{d}{s_a} \cdot \frac{1}{\pi/2} \cdot \frac{(n-1)m + (m-1)n}{m \cdot n} \quad (2)$$

式中各符号意义同式(1)。

2.3 Seiler-Keeney 群桩效应系数公式

Seiler-Keeney 群桩效应系数公式:

$$\eta = \left\{ 1 - \frac{11s_a}{7(s_a^2 - 1)} \cdot \frac{m + n - 2}{m + n - 1} \right\} + \frac{0.3}{m + n} \quad (3)$$

式中符号意义也同式(1)。

式(2)和(3),一般只适用于粘性土中的小桩距高承台群桩($S_a/d = 2 \sim 3$),不适用于粉土、砂土中的群桩。按这两式计算粉土中群桩效应系数值低于实测值。如果按偏低的 η 值进行设计,造成对群桩承载力的过多折减,导致桩数增加,桩距减小,一是引起施工困难,二是因桩距小群桩承载力降低而导致增加沉降,故这两种群桩效应系数计算公式在工程中实际上已不再应用。

公式(1)、(2)和(3)均未考虑桩长、桩径、土的内摩擦角的影响,对于超长直径群桩的适用性不明确,

因此本文也不拟采用。

2.4 考虑承台、桩、土相互作用分项群桩效应系数计算方法

这种方法是建立在试验的基础上,根据大量在各类土中的群桩的试验研究,提出当承台底面以下存在可液化土、湿陷性黄土、高灵敏度软土、欠固结土、新填土,或可能出现震陷、降水、沉降过程产生高孔隙水压力和土体隆起等情况不考虑群桩的承台效应外,对于桩数超过 3 根的非端承桩群,均考虑桩、土、承台的相互作用效应。试验结果经统计分析后,以桩侧阻群桩效应系数、桩端阻群桩效应系数以及根据单桩静载试验确定单桩竖向极限承载力时桩侧阻端阻综合群桩效应系数来共同反映群桩效应的影响。该法已纳入《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94),其计算过程及各项群桩效应系数的确定在该规范中已有详细阐述,并且主要针对房屋建筑工程中普遍采用的低承台群桩基础而言的。该法也不适合研究苏通大桥主桥索塔高承台群桩基础,故本文也不拟采用。

2.5 基于应力叠加的群桩效应系数公式

对于矩形布桩($m \times n$)群桩,不妨设入土桩身长度为 l ,纵向桩距为 s_1 ,横向桩距为 s_2 。若假定:(1)忽略桩端阻力,以纯摩擦桩考虑;(2)桩侧摩阻力沿桩身全长均匀分布;(3)应力以 φ 角向下扩散(对于成层土,取桩身入土深度范围内各分层土 φ 角的加权平均值,此时则 $\bar{\varphi}$ 以表示);(4)在桩端平面处地基应力按抛物线分布,则可推导出($m \times n$)群桩效应系数为

$$\eta_{mn} = \frac{1}{1 + \bar{A}_{smn}} \approx 1 - \bar{A}_{smn} \quad (4)$$

其中 \bar{A}_{smn} 为考虑应力叠加平均折减率:

$$\begin{aligned} \bar{A}_{smn} = & 2A_{s1} \frac{m-1}{m} + 2A_{s2} \frac{n-1}{n} + \\ & 4A_{s3} \frac{(m-1)(n-1)}{mn} \end{aligned} \quad (5)$$

式中

$$A_{s1} = \left(\frac{1}{3s_1} - \frac{1}{2ltg\varphi} \right) d$$

$$A_{s2} = \left(\frac{1}{3s_2} - \frac{1}{2ltg\varphi} \right) d$$

$$A_{s3} = \left(\frac{1}{3\sqrt{s_1^2 + s_2^2}} - \frac{1}{2ltg\varphi} \right) d$$

式中 A_{s3} 是考虑桩间斜对角线的重叠应力的影响。

公式(4)和(5)考虑入土桩长、桩径、土的内摩擦角以及地基土应力重叠的影响,具有一定程度的合理性。交通部《港口工程桩基规范》(JTJ 254—98)就是采用这种方法来进行计算群桩效应系数的。鉴此,本文采用它来计算超长直径灌注桩群桩效应系数。

3 超长直径钻孔灌注桩群桩效应系数

根据公式(4)和(5),图 1 至图 3 表示在同一地基条件下桩距 s_a 的改变对应不同桩长、桩数和桩径时求出的群桩效应系数。

由这些图不难发现:

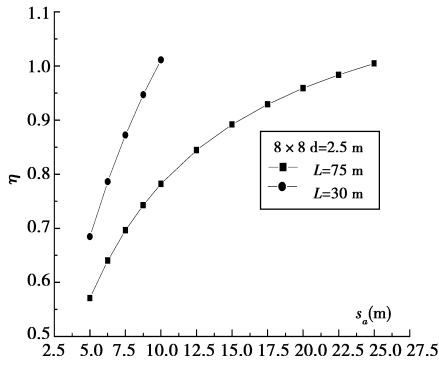


图 1 桩距对不同桩长群桩效应系数的影响

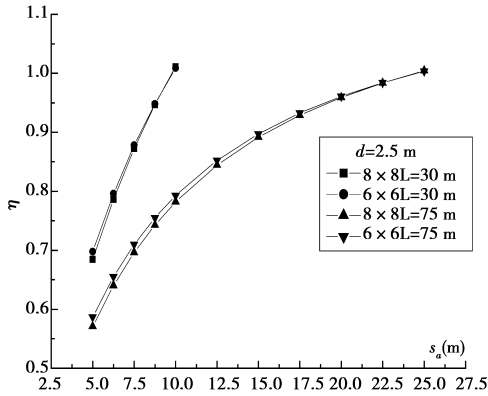
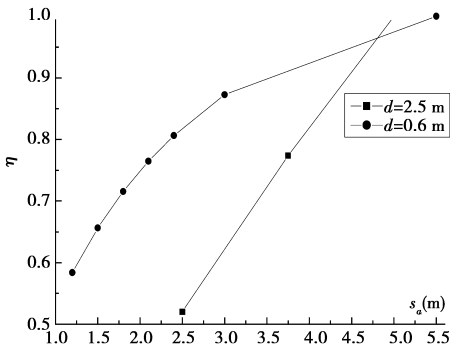
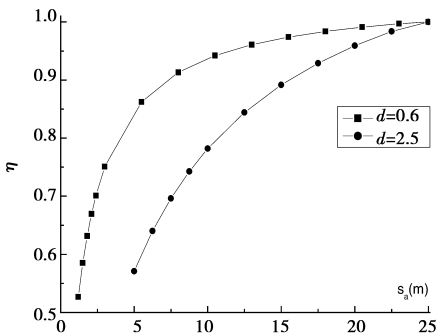


图 2 桩距对不同桩数群桩效应系数的影响



(a)短桩(n=64,l=15 m)



(b)超长桩(n=64,l=75 m)

图 3 桩距对不同桩径群桩效应系数的影响

①随着桩距的增加,无论桩的长短、桩数的多少、桩径的大小,群桩效应系数都是增加的,只不过增加的

快慢不同而已;

②如图 1 所示,对于基桩桩径 $d=2.5\text{ m}$ 的群桩基础,当桩长 $l=30.0\text{ m}$ 时,桩距约为 $5.0d=10\text{ m}$ 时,群桩效应系数达到 1.0,即桩距约为 $5.0d$ 可以不考虑群桩效应了;而 $l=75.0\text{ m}$ 时,桩距约为 $10.0d=25.0\text{ m}$ 时,群桩效应系数才达到 1.0,说明超桩长桩要在桩径大于 $10.0d$ 才能不计群桩效应;

③由图 2 知道,对于大直径桩而言,在桩长相同同时,随着桩距的增加,桩数的多少对群桩效应系数的增量影响不敏感,换言之,在保持桩距不变时(即在同一横坐标下),桩长相等的大直径群桩,桩数的变化基本不引起对群桩效应系数的变化;

④无论桩的长短,对于小直径 $d=0.6\text{ m}$ 的群桩基础而言,随着桩距的增加,在 $6.0d$ 的范围内,即桩距 $s_a=0\sim 3.0\text{ m}$ 群桩效应系数增长速度最快;而对于大直径 $d=2.5\text{ m}$ 的群桩基础而言,随着桩距的增加,群桩效应系数增长速度相对而言比较均匀;

⑤在桩长相同同时,无论桩径的大小,群桩效应系数达到 1.0 时的桩距几乎相等;

⑥对于大直径群桩基础而言,桩长越短,群桩效应系数达到 1.0 时的所需要的桩距就越小。

4 理论计算与模型试验比较

4.1 苏通大桥概况

苏通大桥是目前在建的世界斜拉桥中最大跨度的特大型公路桥梁工程,桥址位于长江下游江口南通河段,桥轴断面主槽呈“V”字形,略偏南岸,连接苏州、南通两市。大桥桥位区的江面宽约 6 km,跨江大桥总长 8 206 m,按双向 6 车道高速公路标准建设。大桥主桥采用 $100+100+300+1\ 088+300+100+100=2\ 088\text{ m}$ 的双塔双索面钢箱梁斜拉桥。斜拉桥主航道孔跨度 1 088 m,位列世界同类桥梁第一;主塔高度达 306m,位列世界第一;斜拉索的长度 580 m,位列世界第一;群桩基础平面尺寸 $113.75\text{ m}\times 48.1\text{ m}$,位列世界第一。大桥桥墩基础设计采用双壁钢围堰加钻孔灌注桩高桩承台式结构。

本文针对主桥南侧基础(主 5 号墩)来进行研究。该群桩基础桩长为 114 m,其中入土的桩长深度分别为 74.94 m。桩径上部为 2.8 m,下部为 2.5 m。2.8 m 桩径的入土深度分别为 10.04 m 和、2.5 m 桩径的入土深度则分别为 64.90 m。基桩中心间距横桥向为 6.75 m,顺桥向为 6.41 m。

4.2 实际地基土层与模型地基的主要物理力学性质

根据工程勘察资料,表 1 列出了主 5 号塔地基的主要物理力学性质指标^[12]。

模型地基土层的性质能否反映实际的地基土层,是离心模型试验成败的关键。由于地基土层多达十几层,有的土层缩成模型只有几毫米甚至更小,有的土层也没有土样,因此,离心模型试验中要完全模拟全部地基土层几乎不可能,只能选择具有代表性的土层来模

拟。根据工程勘察资料, -51.8 m 高程以上为 Q_4 淤泥质亚粘土和亚粘土,其性质基本上相近,极限摩擦阻力为 20~35 kPa,因此,从冲刷面至 -51.8 m 高程间采用亚粘土来进行模拟模型地基; -51.8 m 至 -95.6 m 之间以 Q_3 粉细砂为主,中间夹有中粗砾砂,其极限摩阻力为 50~55 kPa,采用粉细砂模拟模型地基; -95.6 m 至 -127.9 m 之间以 Q_3 中粗砾砂为主,下部有层粉细砂,其极限摩阻力为 100 kPa,采用中砂模拟模型地基; -127.9 m 以下土层为 Q_2 亚粘土和粘土,其极限摩阻力为 70~80 kPa,且已在桩基范围以下,拟采用亚粘土模拟模型地基。模型地基中各土层的代表深度及其主要性质列于表 2^[14]。

表 1 主 5 号塔地基土层的主要物理力学指标

地层代号	岩土名称	含水量 / %	密度 / (g/cm ³)	粘聚力 / KPa	内摩擦角 / °
3-1	淤泥质亚粘土	40.6	1.79	—	—
3-3	亚粘土	35.6	1.78	11.8	18.5
4-1	淤泥质亚粘土	40.6	1.74	4.2	15.6
4-2	亚粘土	33.1	1.83	14.0	20.3
5-2	粉细砂	25.0	1.96	23.5	30.0
5t	亚粘土	30.7	1.88	17.0	26.6
6-1	中粗砾砂	13.9	2.12	—	—
7	粉细砂	19.3	2.01	20.0	29.9
8-1	中粗砾砂	11.6	2.15	17.7	31.7
8-2	粉细砂	17.1	2.04	22.0	31.6
9	亚粘土及粘土	23.5	2.05	59.9	21.1
10	粉细砂	19.4	1.99	7.0	33.6
11	粘土及亚粘土	24.6	2.02	55.9	19.1
12	粉细砂	18.7	2.07	—	—
13	粘土及亚粘土	26.3	1.99	39.0	22.8
14	粉细砂	23.0	1.98	16.0	35.0

表 2 模型试验地基土层的分布及其主要性质参数

土层名称	代表高程 / m	含水量 / %	密度 / g·cm ⁻³	粘聚力 / KPa	内摩擦角 / °
Q_4 亚粘土	-46.2~ -51.8	35	1.81	9.5	9.1
Q_3 粉细砂	-51.8~ -95.6	22	2.00	13.8	32.1
Q_3 中砂	-95.6~ -127.9	13	2.12	18.7	33.6
Q_2 亚粘土	-127.9	23	2.05	37.3	25.2

4.3 计算与比较

根据苏通大桥主 5 号墩的实际地基土层物理力学参数和该群桩基础入土桩长、桩径,按照公式(4)和(5)分别计算 4 桩与 9 桩群桩效应系数值,再分别与离心模型试验群桩效应系数相比,其结果如表 3 所列^[14]。

由表 3 可知,基于应力叠加的群桩效应系数理论值仅比离心模型试验值低 7.2%~12.7%,说明这种群桩效应系数的理论计算公式具有一定准确度。

表 3 不同桩数和桩距的群桩效应系数对比

桩距	桩数	
	4	9
离心模型试验群桩效应系数值	0.883	0.853
基于应力叠加群桩效应系数值	0.819	0.768
(计算值-试验值)/试验值/%	-7.2	-9.9

5 结 语

基于地基土应力叠加的群桩效应系数计算公式能综合考虑桩数、桩长、桩径、桩距及其土性诸多因素的影响,适合高承台超长直径钻孔灌注群桩基础群桩效应系数的计算。由此计算的群桩效应系数理论值仅比离心模型试验值低 7.2%~12.7%。因此,这种方法计算的结果具有一定准确度,可为群桩基础设计提供参考。

参考文献:

- [1] 交通部公路规划设计院. JTJ 024-85 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,1998:1-232. Highway Planning & Design Institute, Ministry of Communications JTJ 024-85 Code for design of foundation of highway bridge and culvert [S]. Beijing: China Communications Press, 1998:1-232.
- [2] 铁道部第三勘测设计院. TB 10002.5-99 铁路桥涵地基和基础设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2000:1-262. The 3rd Railway survey & Design Institute, Ministry of Railway. JTJ 024-85 Code for design of foundation of railway bridge and culvert [S]. Beijing: China Railway Press,2000:1-262.
- [3] 中国建筑科学研究院. GB50007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:1-262. China Academy of Building Research. GB50007-2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002:1-262.
- [4] 阳吉宝,钟正雄. 超长桩的荷载传递机理[J]. 岩土工程学报,1998,20(6):108. YANG Ji-bao, ZHONG Zheng-xiong. Research on Load Transfer Mechanism of Super-Longpile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1998,20(6):108 (in Chinese).
- [5] 朱向荣,方鹏飞,黄洪勉. 深厚软基超长桩工程性状试验研究[J]. 岩土工程学报,2003,25(1):79. ZHU Xiang-rong, FANG Peng-fei, HUANG Hong-mian. Research on Super-Long Pile in Soft Clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25 (1):79 (in Chinese).
- [6] 胡建华,阳吉宝. 轴向受荷超长单桩受力特征的弹塑性解析解[J]. 岩土工程技术,1999(2):41. HU Jian-hua, Yang Ji-bao. Elastic-plastic Answer of Super-long Pile Under Axial Load [J]. Geotechnical Engineering Techniue 1999,(2):41 (in Chinese).

- Analysis of Gas Unsteady Flow in Pipeline System[J]. ACTM,1998,19(4):99-103.
- [7] 刘恩斌,彭善碧,李长俊,等. 仿真技术研究及其在气田管网改造中的应用[J]. 天然气工业,2005,25(1):135-137. LIU En-bin, PENG San-bi, LI Chang-jun, et al. Study and Application of Emulation Technology on the Reformation Pipeline System for Gas Fields [J]. NGI,2005,25(1):135-137.
- [8] 李长俊,杨毅,朱勇,等. 输气管道优化运行技术[J]. 天然气工业,2005,25(10):106-109. LI Chang-jun, YANG Yi, ZHU Yong. Optimized Operation of Gas Transmission Pipelines [J]. NATUR. GAS IND,2005,25(10):106-109.
- [9] 李卫华,李长俊. 基于遗传算法的天然气集输管网参数优化设计[J]. 天然气工业,2005,25(2):158-160. LI Wei-hua, LI Chang-jun. Parameter-optimized Design of Gas Gathering and Transmission System by Heredity Solution[J]. NGI,2005,25(2):158-160.
- [10] 刘恩斌,李长俊. 基于瞬态模型的管道泄漏检测[J]. 天然气工业,2005,25(6):102-104. LIU En-bin, LI Chang-jun, et al. Leakage Detection of Oil and Gas Pipeline by Transient Model [J]. NGI,2005,25(6):102-104.
- [11] 刘恩斌,李长俊,梁党国,等. 输油管道泄漏检测技术研究与应用[J]. 油气储运,2006,25(5):43-44,48. LIU Ee-bin, LI Chang-jun, LIANG Dang-gao, et al. The Research of Wang-hua Oil Pipeline Leakage Detection and Location System. OGST[J],2006,25(5):43-44,48
- [12] 张红兵,李长俊,彭善碧. 输气管道故障诊断中的实时模型法[J]. 天然气工业,2005,25(10):103-105. ZHANG Hang-bing, LI Chang-jun, PENG San-bi. Real-time Model Method for Leakage Detection of Gas Transmission Pipelines[J]. NGI,2005,25(10):103-105.
- [13] 张红兵,李长俊. 凝析气管道输送泄漏监测技术[J]. 天然气工业,2006,26(2):129-131. ZHANG Hong-bing, LI Chang-jun. Detecting Technology of Leakage for Condensate Gas Pipelines[J]. NGI,2006,26(2).
- [14] 张红兵. 长距离输气管道系统事故诊断技术研究[D]. 成都:西南石油大学石油工程学院,2005. ZHANG Hong-bin. The Study on Fault Detection and Diagnosis of Long Distance Gas Pipeline System [D]. Chengdu: Degree thesis of southwest petroleum university,2005.
- [15] VEMMURI A T, POLYCARPOU M M. Roubust Nonlinear Fault Diagnosis in Input-output System[J]. Int. J. Control, 1997,68(2):343-360.
- [16] YANF H, SAIF M. State Observation, Failure Detection and Isolation(FDI) in Bilinear Systems[J]. Int. J. Control, 1997,67(6):901-920.
- [17] KASSIDAS A, TAYLOR PA, MACGREGOR J F. Off-line Diagnosis of Deterministic Fault in Continuous Dynamic Multivariable Processes Using Speech Recognition Methods[J]. J. Process Control, 1998,8(5):381-393.
- [18] DOWNS J, VOGEL E F. A plant-wide Industrial Process Control Problem[J]. Computers Chem. Eng., 1993,17(3):245-255.
- [19] 谭永生,邓一平,李长俊. 管网可视化调度技术在川西气田的应用[J]. 天然气工业,2005,25(9):110-112. TAN Yong-sheng, DENG Yi-ping, LI Chang-jun. Application of Visualized Dispatch Technology for Pipeline System in West SICHUAN Gas Field[J]. NGI,2005,25(9):110-112.

(编辑 陈蓉)

(上接第87页)

- [7] 胡立明. 第四系土层大直径超长桩的承载特性[J]. 华东地质学院学报,2000,23(1):35. HU Li-ming. The Bearing Load Characteristic of Large Diameter an Super-long Pile in Quaternary Soil[J]. Journal of East China Geological Institute,2000,23(1):35(in Chinese).
- [8] 韦华. 超长桩受力特性的探讨[J]. 电力勘测,1996(2):1. WEI Hua. Research on Bearing Capacity of Super-long Pile [J]. Journal of Electric Power Survey, 1996(2): 1 (in Chinese).
- [9] M W O'Neill. Applications of Large-diameter Bored Piles in the United States[A]. In: VanImpe & Heageman. Dee PFoundation on Bore and Auger Piles [C]. Balkema, Rotterdam, 1998, 3-19.
- [10] 夏正兴,吴凯. 桥梁工程中直径钻孔灌注桩承载力确定[J]. 公路,2001(10):106. XIA Zheng-xing, WU Kai. Determination of Bearing Capacity of LDBPs in Bridge Engineering[J]. Highway, 2001(10):106.
- [11] 王伯惠,上官兴. 中国钻孔灌注桩新发展[M]. 北京:人民交通出版社,1999,1-12. WANG Bo-hui, SANG Guan-xing. New Development of Bored Pile in China. Beijing: China Communications Press,1999,1-12.
- [12] 章为民,王年香. 苏通长江公路大桥主桥索塔群桩基础与土体共同作用离心模型试验研究报告[C] 南京:南京水利科学研究所,2004,1-19. ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang. Report of Centrifugal Model Test for Soil-pile Interaction Under Main Tower of Sutong Yangtse River Highway Bridges [R]. Nanjing: Nanjing H • raulic Research Institute, 2004,1-19.
- [13] 谢涛,袁文忠,姚勇. 超大群桩竖向承载群桩效应试验研究[J]. 公路交通科技,2003,20(5):61-64. XIE Tao, YUAN Wen-zhong, YAO Yong. Model Test Study on Effect of Vertical Bearing Capacity for Large-scale Pile Group [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003,20(5): 61-64. (in Chinese).
- [14] 邓友生. 超大钻孔灌注群桩基础沉降特性研究[D]. 南京:东南大学博士学位论文,2005:20-36. DENG You-sheng. Research on Settlement of Super-long Larger Diameter Bored Pile Grou P [D]. Nanjing: A dissertation submitted to Southeast University for the degree of doctor,2005:20-36.

(编辑 胡玲)