

加芯搅拌桩单桩承载力的分析

陈颖辉, 许晶菁, 杨坤华, 鲁忠军
(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 加芯水泥土搅拌桩是一种用于处理软土地基的新型桩, 目前该种桩型在国内外的研究尚未完善. 本文通过试验分析了加芯水泥土搅拌桩在竖向荷载作用下的荷载传递机理以及单桩破坏模式, 根据破坏模式及影响因素推导出单桩承载力的计算公式. 并讨论了该桩型的优化设计, 提出了最优含芯率和最优芯长比等结构因素.

关键词: 水泥土搅拌桩; 单桩承载力; 破坏模式; 优化设计

中图分类号: TU473.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2006)04-0058-07

Analysis on the Load Capacity of the Concrete - Cored DCM Pile

CHEN Ying-hui, XU Jing-jing, YANG Kun-hua, LU Zhong-jun

(faculty Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: A new kind of pile named concrete - cored DCM pile is developed for medium load design in soft clay ground. The load capacity of this new pile is analyzed in this paper. Based on several experiments, this paper analyses load transfer mechanics and failure mode. Discusses the formula of load capacity and the pile optimism design, including the selection of radius and the length.

Key words: cement - soil mixing pile; load capacity; failure mode; pile optimism design

0 引言

加芯搅拌桩在软土地基中运用的越来越广泛, 但目前的理论研究尚未完善. 在现有研究成果中, 只对加芯搅拌桩的一些特性进行探讨以及它与灌注桩、水泥土搅拌桩的性能和经济指标进行对比, 并得出结论^[1-3]. 在对一种新型桩设计和研究过程中, 单桩竖向承载力是一个重要指标, 也是对其进行更进一步研究的基本条件. 本文就对加芯搅拌桩的单桩竖向承载力进行了探讨.

1 加芯水泥土搅拌桩的构造和施工方法简介

1.1 结构构造简介

加芯水泥土搅拌桩的桩身由水泥土搅拌桩(外芯)和小尺寸的预制钢筋混凝土桩(内芯)两部分组成. 结构简图如图1.

1.2 施工方法简介

加芯水泥土搅拌桩的施工方法是: 先进行水泥土搅拌桩的施工, 一般按水泥土搅拌桩的施工规程进行. 然后, 在水泥土固化之前, 应立即插入混凝土桩, 使用静压法插桩, 一般按打预制桩规程进行. 此外要保证搅拌桩和预制桩的同轴度, 以及预制桩的垂直度.

2 加芯水泥土搅拌桩的荷载传递机理

加芯搅拌桩在竖向荷载作用下, 桩的内、外芯界面上存在着相对位移和剪切, 同时外芯与土之间也存

收稿日期: 2005-06-24.

第一作者简介: 陈颖辉(1963.10-), 男, 副教授. 主要研究方向: 岩土工程. E-mail: yinghui_chen@hotmail.com

在着相对位移和剪切.因此,它的荷载传递机理比单一材料桩的荷载传递机理要复杂得多.

当竖向荷载逐步作用于桩顶,由于内芯的强度和刚度远远大于水泥土的强度和刚度,所以绝大多数荷载集中在内芯,即应力集中.内芯上部受到压缩而产生相对于外芯水泥土的向下位移,与此同时,内芯侧表面则受到外芯提供的向上摩阻力.同理,水泥土外芯与土之间也产生摩阻力.作用在桩顶的荷载,一部分沿内芯向下传递,另一部分则通过内、外芯与外芯、土之间的侧摩阻力传递到桩周土层中.而随着深度增加,桩的下部所承担的荷载比例减少,则桩身压缩变形也随着深度增加而减少.当两层界面上的相对位移为零时,其摩阻力尚未开始发挥作用.随着荷载进一步增加,内芯和水泥土的压缩量和位移量也增加,桩下部的摩阻力随之被调动起来.当荷载到达一定程度后,荷载扩散到内芯的桩端,而通过内芯下面的水泥土把荷载传递到桩端.同时,桩土之间的荷载也传递到桩端附近,两者共同形成桩的承载力.当荷载较大,荷载传递到桩端之前时,桩侧摩阻力就已达到极限,并发生破坏,就称为摩擦型桩.而当部分桩端阻力得到发挥之后,桩侧摩阻力才达到极限,则称为摩擦端承桩.

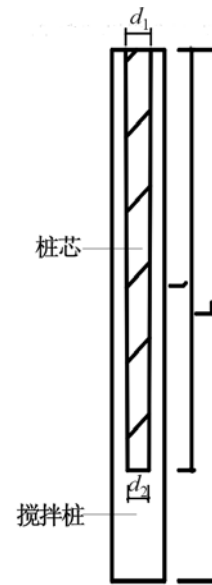


图1 加芯水泥土搅拌桩的构造图
Fig.1 Structure of the concrete-cored DCM pile

3 加芯水泥土搅拌桩的破坏形态

3.1 试验数据

本文收集了昆明谷堆村加芯搅拌桩试验^[1]和天津大学六里台小操场北侧试验^[2]的数据,见下页表1.

3.2 试验数据分析

从表1中可得 $Q \sim S$ 曲线图2、3.从图2、图3中的 $Q \sim S$ 曲线可见:加芯搅拌桩有两种破坏形态,可称为急进破坏和渐进破坏.急进破坏:当荷载逐渐作用在桩顶时,在 $Q \sim S$ 曲线一开始就呈现非线性变化,且随着荷载的增加,变形加速发展,急进破坏时的极限承载力较小.渐进破坏:当荷载逐渐作用在桩顶时,开始时 $Q \sim S$ 曲线呈现线性变化,只有荷载达到一定数值后,随着荷载的增加,变形才加速发展,渐进破坏时的极限承载力较大.图2中A-1为急进破坏,A-2、A-3、A-4为渐进破坏.图3中1-1~1-3为急进破坏,1-4~1-11为渐进破坏.

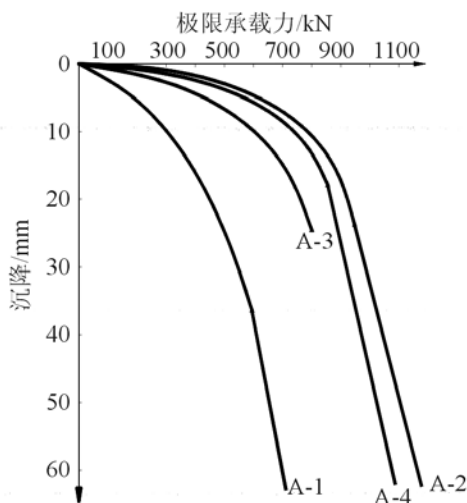


图2 昆明试桩 $Q \sim S$ 曲线

Fig.2 $Q \sim S$ curve line of composite pile in Kunming

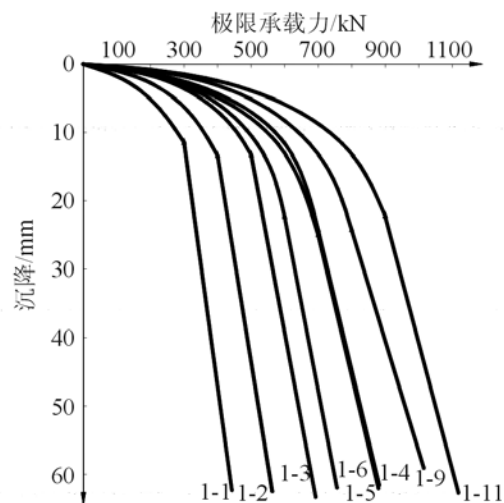


图3 天津试桩 $Q \sim S$ 曲线

Fig.3 $Q \sim S$ curve line of composite pile in Tianjin

表1 试桩结果
Tab.1 Test result of composite pile

场地	试桩编号	桩型	桩长 /m	桩径 /mm	芯长 /m	芯长比	上下截面 尺寸/mm	极限承 载力/kN	沉降 /mm	特征值 /kN
昆明	A-1	加芯桩	8.0	500	3.5	0.44	180~180	580	36.14	290
	A-2	加芯桩	8.0	500	6.0	0.75	240~180	946	23.58	473
	A-3	加芯桩	10.0	500	6.0	0.60	240~180	>807	24.87	>404
	A-4	加芯桩	8.5	500	6.0	0.71	240~180	860	18.11	430
	A-5	搅拌桩	10.0	500	—	—	—	270	33.92	135
	A-6	搅拌桩	8.0	500	—	—	—	330	19.47	165
天津	1-1	加芯桩	8.5	500	3.5	0.41	200~100	300	11.52	150
	1-2	加芯桩	8.5	500	5.0	0.59	180~180	400	13.35	200
	1-3	加芯桩	8.5	500	5.0	0.59	180~180	500	13.25	250
	1-4	加芯桩	8.5	500	5.0	0.59	200~100	700	24.21	350
	1-5	加芯桩	8.5	500	5.0	0.59	300~100	700	24.95	350
	1-6	加芯桩	8.5	500	5.0	0.59	300~100	600	22.70	300
	1-7	加芯桩	10.0	500	5.0	0.50	400~100	700	27.16	350
	1-8	加芯桩	10.0	500	5.0	0.50	400~100	700	22.04	350
	1-9	加芯桩	10.0	500	6.0	0.60	400~100	800	24.24	400
	1-10	加芯桩	10.0	500	6.0	0.60	400~100	900	22.75	450
	1-11	加芯桩	10.0	500	7.0	0.70	400~100	900	21.67	450
	1-18	搅拌桩	6.5	500	—	—	—	150	35.90	75
	1-19	搅拌桩	6.5	500	—	—	—	180	27.77	90
	1-20	搅拌桩	8.5	500	—	—	—	150	23.29	75
	1-21	搅拌桩	10.0	500	—	—	—	150	15.09	75
	1-22	搅拌桩	10.0	500	—	—	—	150	20.31	75
	1-23	搅拌桩	11.5	700	—	—	—	540	23.91	270
	1-24	搅拌桩	11.5	700	—	—	—	480	22.86	240

3.3 急进破坏机理及影响因素

急进破坏机理:从加芯搅拌桩的荷载传递机理可知,桩顶荷载主要由内芯承担,其中一部分扩散到桩周土体中.从表1可见,急进破坏的桩芯上截面面积普遍较小.因此,桩芯所承担的荷载较小,影响了荷载向下传递的能力.从而大部分荷载由水泥土承担,而水泥土本身强度很低,单位面积的承载力远远低于钢筋混凝土的承载力.因此,急进破坏时所能承担的极限荷载小.

急进破坏的影响因素:

①含芯率:根据急进破坏的机理,可知内芯上截面面积的大小是影响急进破坏重要原因.因此,引入含芯率 m .含芯率——内芯上截面面积占桩截面面积的百分比.表2分析了含芯率对承载力的影响.再由表2得到图4的关系曲线.由图4可见.含芯率 $m=0.25$ 是一个界限值.

由表3可见,含芯率可以作为界定急进破坏和渐进破坏的依据.因此,本文规定: $m < 0.25$ 时为急进破坏; $m \geq 0.25$ 时为渐进破坏.

表2 含芯率与极限承载力关系

Tab.2 Relationship between concrete-cored percentage and ultimate bearing capacity

试桩编号	1-18	1-19	1-20	1-21	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8
桩径 ϕ /mm	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
芯桩上截面 ϕ /mm	—	—	—	—	180	180	250	300	300	400	400
含芯率/%	0	0	0	0	13	13	25	36	36	64	64
极限承载力/kN	150	180	150	150	400	500	700	700	600	700	700

表3 根据含芯率判断破坏形态

Tab.3 Judgment of failure mode according to the concrete-cored percentage

场地	试桩编号	桩长/m	芯长/m	桩径/mm	芯项截面积/mm ²	含芯率/%	计算结果	实际结果
谷堆村	A-1	8.0	3.5	500	180 × 180	0.165 < 0.25	急进	急进
	A-2	8.0	6.0	500	240 × 240	0.294 > 0.25	渐进	渐进
	A-3	10.0	6.0	500	240 × 240	0.294 > 0.25	渐进	渐进
	A-4	8.5	6.0	500	240 × 240	0.294 > 0.25	渐进	渐进
天津大学	1-1	8.5	3.5	500	φ200	0.160 < 0.25	急进	急进
	1-9	100	6.0	500	φ400	0.640 > 0.25	渐进	渐进
	1-10	10.0	6.0	500	φ400	0.640 > 0.25	渐进	渐进
	1-11	10.0	7.0	500	φ400	0.640 > 0.25	渐进	渐进

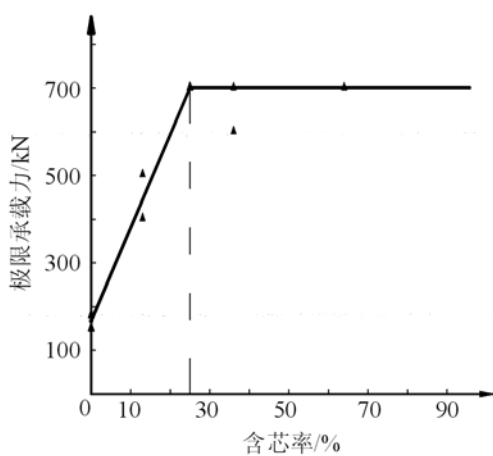


图4 含芯率与极限承载力关系图

Fig.4 Sketch of the relationship between concrete-cored percentage and ultimate bearing capacity

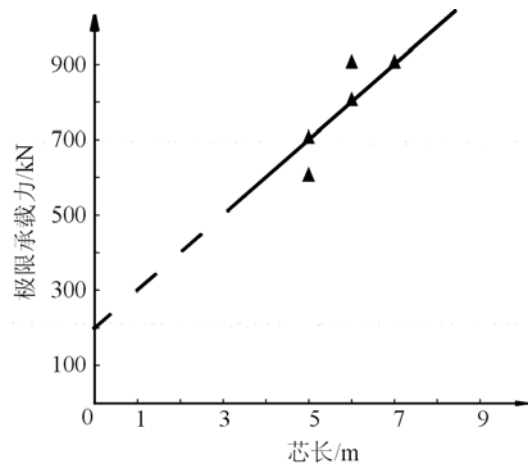


图5 芯长与承载力的关系图

Fig.5 Sketch of the relationship between concrete-cored length and bearing capacity

②水泥的强度:根据昆明谷堆村试验,对A-1桩进行开挖,发现在A-1桩上部1.5m处开裂.而水泥土搅拌桩在上部1.2m处开裂.由此可见,A-1桩和水泥土搅拌桩的工作性能相当接近.因此,水泥土强度对承载力起着重要作用.

因此,急进破坏的承载力主要由上部的钢筋混凝土和水泥土的抗压强度决定.

3.4 渐进破坏机理及影响因素

渐进破坏机理:随着内芯上截面面积的增大,内芯所能承担的荷载变大,再加上内芯长度比较长,使荷载比较有效地往下传.同时分担到水泥土的荷载变小.即由内芯与水泥土的体积比相适应,使材料能充分发挥它的能力,因而能大幅度提高其承载力.即内芯上截面面积的增大和芯长的加大,使荷载分布更趋合理,有效提高承载力.

渐进破坏的影响因素:

①含芯率:由图4可见,当含芯率 $m > 0.25$ 时,随着含芯率的增加,承载力几乎不变.因此,含芯率 $m = 0.25$ 为最佳含芯率.

②内芯长度:根据表1中的1-4~1-11桩得到图5.可见,随内芯长度的增加承载力呈线性增长.

③芯长比:钢筋混凝土内芯长与桩长的比值.由表1可见,A-2、A-3、A-4桩,为同一含芯率,芯长比越大的承载力越高.其中,虽然A-2桩的桩长不是最长,但它的承载力最大,说明A-2桩的桩身强度、桩侧摩阻力和桩端阻力同时得到发挥.说明芯长比0.75是优化芯长比.

由于芯长比小于0.75时,桩端承载力未能得到发挥,对承载力的贡献很小,可忽略.因此,称此类桩为纯摩擦桩.而芯长比大于等于0.75时,称此类桩为摩擦端承桩.

为使加芯搅拌桩承载力充分发挥, 引入加芯搅拌桩计算桩长的概念. 加芯搅拌桩计算桩长的公式如下:

$$L' = l/0.75 \quad (1)$$

式中: L' —加芯搅拌桩计算桩长(m); l —芯桩桩长(m); L —加芯桩桩长(m).

当加芯搅拌桩计算桩长 L' 大于实际桩长 L 时, 取实际桩长 L ; 当加芯搅拌桩计算桩长小于实际桩长 L 时, 取计算桩长 L' .

4 单桩承载力公式推导

桩的破坏形态的不同, 桩的承载力有较大的差别. 因此, 单桩承载力公式的推导可根据破坏形态不同进行分别讨论.

4.1 急进破坏单桩极限承载力计算公式

由上述急进破坏机理及影响因素, 我们得出: 急进破坏的单桩极限承载力主要是由桩顶的钢筋混凝土和水泥土的抗压强度提供的. 根据以上因素得出: 急进破坏的加芯搅拌桩的极限承载力公式是:

$$Q_u = mAf_c + (1 - m)Af_u \quad (2)$$

式中: m —含芯率(%); A —加芯水泥土搅拌桩的截面面积(m^2); f_c —混凝土轴心抗压强度设计值(N/mm^2) (见《GB 50010 - 2002 混凝土结构设计规范》); f_u —水泥土搅拌桩的截面极限压应力. 数据根据场地的试验数据所得, 见表4

表4 水泥土搅拌桩的截面极限压应力

Tab. 4 Ultimate compressive stress of cement deep mixing pile

场地类别	试桩编号	桩长/m	桩径/mm	极限承载力/kN	桩截面面积/ m^2	截面极限压应力/MPa	平均值/MPa
昆明	A-5	10.0	500	270	0.196	1.378	1.531
	A-6	8.0	500	300	0.196	1.684	
天津	1-18	6.5	500	150	0.196	0.765	0.800
	1-19	6.5	500	180	0.196	0.918	
	1-20	8.5	500	150	0.196	0.765	
	1-21	10.0	500	150	0.196	0.765	
	1-22	10.0	500	150	0.196	0.765	

公式试算:

对昆明谷堆村的 A-1 桩而言: 混凝土强度等级为 C25; $f_c = 11.9 \text{ N}/\text{mm}^2$.

$$Q_u = mAf_c + (1 - m)Af_u = 0.165 \times 11.9 \times 0.196 \times 10^3 + (1 - 0.165) \times 0.196 \times 1.531 \times 10^3 = 635.41 \text{ kN}$$

实际试验所得的数值是 580 kN;

对天津大学的 1-2、1-3 桩而言: 混凝土强度等级为 C25; $f_c = 11.9 \text{ N}/\text{mm}^2$.

$$Q_u = mAf_c + (1 - m)Af_u = 0.129 \times 11.9 \times 0.196 \times 10^3 + (1 - 0.129) \times 0.196 \times 0.8 \times 10^3 = 437.45 \text{ kN}$$

实际试验所得的数值的平均值是 $\frac{400 + 500}{2} = 450 \text{ kN}$

由以上两组数据的对比可见, A-1 桩与实际值偏差了 8.7%; 1-2、1-3 桩与实际值偏差了 2.87%. 所以, 计算数据基本能满足实际工程需要. 因此, 此公式具有一定的可靠性.

4.2 渐进破坏单桩承载力特征值计算公式

1) 纯摩擦桩单桩承载力特征值公式

根据《JGJ79 - 2002 建筑基础处理技术规范》中的水泥土搅拌桩的承载力特征值计算公式, 但由于加芯搅拌桩的刚度要比水泥土搅拌桩的刚度大得多, 因此, 需要对公式进行修正.

根据渐进破坏的机理和影响因素, 加芯搅拌桩的纯摩擦单桩承载力特征值公式可表示为:

$$R_a = \varphi \pi D \sum_{i=1}^n q_{si} L'_i \quad (3)$$

式中: φ —加芯搅拌桩的调整系数, φ 可通过试验测得; φ 值范围:2.3~2.6,土质情况好,取小值;反之,取大值; D —桩直径(mm); q_{si} —桩周第*i*层土的侧摩阻力特征值.对淤泥可取4~7 kPa;对淤泥质土可取6~10 kPa;对软塑状态的粘性土可取10~15 kPa;对可塑状态的粘性土可取12~18 kPa; L'_i —计算桩长范围内第*i*层土的厚度(m).

昆明谷堆村的数据: $R_a = \varphi \pi D \sum_{i=1}^n q_{si} L'_i$ 取: $\varphi = 2.3$,则

$$R_a = \varphi \times \pi \times 0.5 \times (1.7 \times 6 + 2.7 \times 18 + 3.6 \times 15) = 407 \text{ kN}$$

其余计算结果与实际结果的比较见表5.从比较结果可见,计算公式适用于实际工程.

表5 纯摩擦桩承载力特征值的比较

Tab.5 Comparison of the bearing capacity characteristic number of pure friction pile

场地	试桩编号	桩长/m	芯长/m	计算桩长/m	φ 取值	计算承载力/kN	实际平均特征值/kN	误差/%
昆明	A-3	10.0	6.0	8.0	2.3	407	417	2.46
	A-4	8.5	6.0	8.0				
天津	1-4	8.5	5.0	6.67	2.6	337	340	0.89
	1-5	8.5	5.0	6.67				
	1-6	8.5	5.0	6.67				
	1-7	10.0	5.0	6.67				
	1-8	10.0	5.0	6.67		405	425	4.94
	1-9	10.0	6.0	8.0				
	1-10	10.0	6.0	8.0				
	1-11	10.0	7.0	9.33				

2) 摩擦端承桩单桩承载力特征值公式

由于有一部分的桩端力得以发挥,所以在公式中应有所体现.根据《JGJ79-2002 建筑地基处理技术规范》,渐进破坏的加芯搅拌桩的承载力特征值公式可表示如下:

$$R_a = \varphi \pi D \sum_{i=1}^n q_{si} L_i + \alpha q_p A_p \quad (4)$$

式中: φ —加芯搅拌桩的调整系数,取值同上; D —桩直径(mm); q_{si} —桩周第*i*层土的侧摩阻力特征值; L_i —桩长范围内第*i*层土的厚度(m); α —桩端天然地基土的承载力折减系数,可取0.4~0.6,承载力高时取低值,反之取高值; q_p —桩端地基土未经修正的承载力特征值(kPa),可按现行国家标准《GB 50007-2002 建筑地基基础设计规范》的有关规定确定.

实例试算:昆明谷堆村的A-2桩

可认为桩作用在④土层上.而④土层是可塑性,所以根据标准中的表5.2.8-2的沉管灌注桩项中取 $q_p = 1350$ kPa.则: $R_a = \varphi \pi D \sum_{i=1}^n q_{si} L_i + \alpha q_p A_p = 2.3 \times \pi \times 0.5 \times (1.7 \times 6 + 2.7 \times 18 + 3.6 \times 15) + 0.5 \times 700 \times 0.196 = 407.32 + 68.6 = 475.92$ kN

与试验结果的473 kN相当接近,偏差为2.50%.因此,可认为上述公式可运用于实际工程中.

5 芯桩的优化设计

1) 芯桩顶截面尺寸:根据图4可见,顶截面的最适当和经济的面积为总截面面积的25%,因为顶截面面积的再增大无助于承载力的提高.

2) 芯桩的长度:为了能充分发挥材料的能力,芯长比不宜小于0.75,以使桩端阻力得到发挥,提高承载力.

6 结论

1) 钢筋混凝土芯水泥土搅拌桩的破坏形式有:急进破坏和渐进破坏.可根据含芯率*m*界定.当*m* ≥

0.25 时为渐进破坏; $m < 0.25$ 时为急进破坏.

2) 当 $m \geq 0.25$ 时, 承载力随着芯长的增加, 而成线性增加; 当 $m < 0.25$ 时, 芯长的变化, 对承载力几乎无影响.

3) 优化芯桩长度为芯长比大于等于 0.75, 使其发挥桩端阻力.

4) 急进破坏时的单桩极限承载力计算公式为: $Q_u = mA_f_c + (1 - m)A_f_u$.

5) 渐进破坏时的单桩承载力特征值计算公式为:

纯摩擦型桩计算公式: $R_a = \varphi\pi D \sum_{i=1}^n q_{si}L'_i$, φ 值取 2.3 ~ 2.6, 土质情况好, 取小值; 反之, 取大值.

摩端承型桩计算公式: $R_a = \varphi\pi D \sum_{i=1}^n q_{si}L_i + \alpha q_p A_p$, φ 的取值同上, α 可取 0.4 ~ 0.6, 承载力高时取低

值.

参考文献:

- [1] 陈颖辉, 等. 昆明谷堆村加芯搅拌桩试验研究[J]. 昆明: 昆明冶金高等专科学校学报, 2003(3): 1-6.
- [2] 刘杰, 等. 组合桩承载力的试验研究[J]. 天津大学学报, 2003(1): 124-128.
- [3] 成立芹. 水泥土搅拌组合桩承载能力研究[J]. 建筑技术开发, 2002(11): 33-36.
- [4] 刘金砺. 桩基础设计与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 31-36.
- [5] GB 50010-2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [6] JGJ 94-94 建筑桩基设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [7] 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.
- [8] JGJ 79-2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

(上接第 49 页)

6 结束语

本文通过设计一种异步的消息传输机制, 弥补了基于 CORBA 标准的消息的异步传输的不足, 并用 OMG 接口定义语言给出了描述, 使消息可以在异构环境中进行互操作, 并实现了跨平台和跨软件环境的异步消息传递. 随着社会的进步和信息社会的日新月异, 中间件技术会越来越受到重视, 中间件在软件中的地位也会越来越重要.

参考文献:

- [1] 朱其亮, 郑斌. CORBA 原理及应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001: 15-18.
- [2] 王军. 基于 JMS 的消息中间件设计与实现[J]. 计算机应用, 2003, 23(8): 64-67.
- [3] 周泽华, 等. 消息中间件管理器的设计和实现[J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(3): 318-323.
- [4] 杨勇卫, 郑有才. 基于 TCP/IP 的通信中间件的实现[J]. 航空计算技术, 2002, 32(3): 125-128.
- [5] 张军, 冯丽辉, 王莉, 等. 基于动态数据交换及 JAVA Applet 技术实现实时 Web 虚拟仪器[J]. 昆明理工大学(理工版), 2005, 30(2): 50-54.