

PHC 管桩荷载传递的试验研究

Experimental research on load transfer mechanism of pretensioned high strength spun concrete piles

施 峰

(福建省建筑科学研究院, 福建 福州 350025)

摘 要: 通过在预应力高强混凝土管桩(PHC 桩)的桩顶、桩端及桩周各主要土层的分界面埋设钢筋计的精细静荷载试验, 研究了高强预应力混凝土管桩的荷载传递机理, 分析了侧阻力、端阻力的变化规律, 实测了压桩力与入土深度的相互关系。

关键词: 预应力高强混凝土管桩(PHC 管桩); 荷载传递机理; 桩侧阻力; 桩端阻力

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)01-0095-05

作者简介: 施 峰(1964-), 男, 福建福州人, 工学硕士, 教授级高级工程师, 主要从事地基基础方面的研究工作。

SHI Feng

(Fujian Institute of Building Research, Fuzhou 350025, China)

Abstract: Based on the static loading tests on pretension high strength concrete piles with strain gauges mounted at the top and toe of pile and at the interfaces of soil layer, the load transfer mechanism of PHC piles was studied, and the behaviors of skin resistance and toe resistance were analyzed. The relations of the jacking pressure of test piles to the embedded depth were measured.

Key words: pretensioned spun high strength concrete piles (PHC piles); load transfer mechanism; skin resistance; toe resistance

0 前 言^①

预应力高强混凝土管桩(以下简称 PHC 管桩)具有施工速度快、价格低、承载力高、质量稳定、养护时间短、施工方便等诸多优点。近年来在福建沿海地区得到了越来越广泛的使用, 据估计, 目前福建沿海软土地地区约有 50% 以上的工程均使用 PHC 管桩作为基础工程。研究桩的荷载传递过程, 对合理地进行桩基的设计、施工和试验都具有重要意义。国内外对灌注桩(包括冲钻孔灌注桩、人工挖孔桩等)的荷载传递规律进行了较多、较系统的研究, 而对 PHC 管桩的荷载传递过程、受力机理、承载特性尚未进行系统的研究, 相关报道尚不多见。本文通过 3 根埋设有钢筋计的 PHC 管桩的静荷载试验, 研究 PHC 管桩在轴向荷载作用下, 桩侧摩阻力与桩端阻力共同承担外荷载的相互关系, 以及它们的发挥过程和分布规律, 并分析了引起桩侧摩阻力变化的可能因素。

1 现场试验

1.1 试验概况

拟建物为文体中心, 建筑面积为 12347 m², 基桩采用 ϕ 500 PHC 管桩, 壁厚为 100 mm, 桩长为 42 m 左右, 桩尖用钢桩靴, 采用液压静力压桩法施工, 终压力为 4509 kN。拟建场地土层自上而下为: ①杂填土, 厚 0.30~1.90 m; ②粉质黏土 I, 可塑, 厚 0.60~2.90 m;

③中砂 I, 饱和, 稍密, 厚 8.20~10.80 m; ④中砂 II, 饱和, 松散, 厚 0.80~2.80 m; ⑤中砂 III, 饱和, 稍密, 厚 2.70~5.60 m; ⑥淤泥质土, 流塑, 厚 18.70~21.50 m; ⑦粉质黏土 II, 可塑、稍密, $I_L = 0.54$, 厚 1.00~4.30 m; ⑧粉土, 厚 0.10~4.00 m; ⑨粉砂, 厚 0.30~4.30 m; ⑩圆砾, 中密, 为桩基持力层, 揭露厚度为 4~5 m。桩基础基本上为单桩承台或双桩承台, 单桩承载力设计值为 2800 kN, 桩身混凝土强度等级为 C80, 为了尽可能将桩试验到极限状态, 静荷载按材料强度控制为 5000 kN 进行^[1]。为了了解 PHC 管桩在桩顶荷载作用下的荷载传递机理及各分层土层的侧阻力以及桩端阻力, 在桩顶、桩端及各主要土层的分界面上均埋设了电阻应变式钢筋计, 每个测点上安装了三个钢筋计, 标定面上安装了四个钢筋计。由于 PHC 管桩约有 300 mm 的空芯, 为了方便埋设钢筋计, 在管桩的空芯内增放钢筋笼, 钢筋笼直径为 250 mm 左右, 然后将钢筋计绑扎在钢筋笼上放置到预定的桩顶、桩端或土层分界面。为了使钢筋计能与管桩同步工作, 变形能协调一致, 在 PHC 管桩管芯内填充混凝土强度等级为 C40 以上的高标号混凝土并用振捣器将混凝土振捣密实。共对 3 根桩进行了精细的静荷载试验。试验结果见表 1。试验过程按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)中的有关规定进行^[2]。

① 收稿日期: 2003-02-26

表 1 各试桩有关参数和试验结果

Table 1 Results and parameters of test piles

试桩 编号	桩长 /m	桩 外径 /mm	终压 桩力 /kN	试验间 歇时间 /d	试验最 大荷载 /kN	相应桩 侧阻力 /kN	相应桩 端阻力 /kN	最终 沉降 /mm	残余 沉降 /mm	持力层
S ₁	43.00	500	4509	10	5000	4494.6	505.4	18.11	7.75	进入圆砾 0.3 m
S ₂	42.00	500	4509	11	5000	4388.9	611.1	18.32	7.79	进入圆砾 0.1 m
S ₃	43.00	500	4509	14	5000	4571.7	428.3	14.53	7.44	进入圆砾 0.9 m

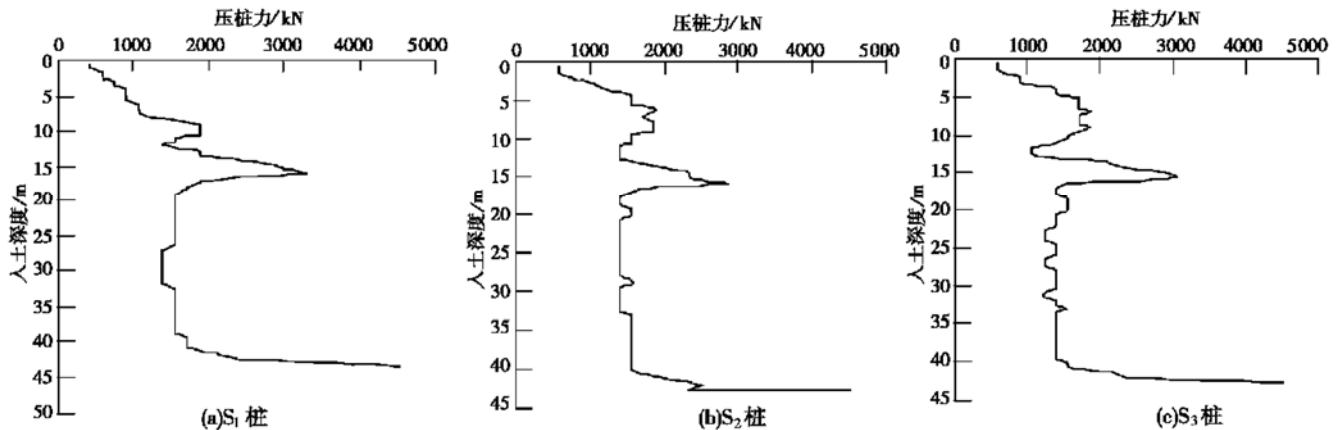


图 1 各试桩压桩力随入土深度变化情况

Fig. 1 Relations of the jacking pressure of test piles to the penetrated depth

1.2 桩身钢筋砼应力应变关系

由实测各级荷载下标定面的轴向应变值和对应的应变计算值,可得各试桩标定面钢筋砼的轴向应力与应变关系

$$\sigma = a_0 + a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2. \quad (1)$$

1.3 桩身轴力计算

根据预埋钢筋计实测的应变数据,计算各测量截面的轴力为

$$Q_{ij} = A \sigma(\varepsilon_j). \quad (2)$$

式中 Q_{ij} 为第 i 截面在第 j 级荷载下的轴力; ε_j 为第 i 截面在第 j 级荷载下的轴向应变; A 为桩身平均横截面积。

1.4 平均桩侧阻力

各土层的平均侧阻力可按下式计算:

$$q_{si} = (Q_i - Q_{i+1})/F_i, \quad (3)$$

式中 F_i 为第 i 桩节的侧表面积。

1.5 桩端承载力

桩端承载力按下式计算:

$$q_p = Q_n/A_0, \quad (4)$$

式中 Q_n 为桩端轴向力(kN), A_0 为桩端面积(m²)。

1.6 桩身各应变实测截面的位移

桩身各应变实测截面的位移 s_j 按下式计算:

$$s_j = s_0 - \sum_{i=1}^j \frac{L_i}{2} (\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}), \quad (5)$$

式中 s_0 为桩顶位移实测值, L_i 为第 i 断面和第 $i+1$

断面之间的桩长。

2 试验结果分析

2.1 压桩力与入土深度的变化规律

压桩力的大小在一定程度上反应了不同土层的软硬程度。为了了解在压桩过程中压桩力的变化规律,在施工时,每压入 50 cm,记录一次压桩力,压桩力与入土深度的变化规律见图 1。

从图 1 可以看出桩进入杂填土及粉质黏土 I 时,压桩力仅 426~587 kN,当桩进入中砂 I 时,随着入土深度的增加,压桩力从 587 kN 增加到 1873 kN,到中砂 II 又减小一些,再到中砂 III 随着入土深度的增加,压桩力又逐渐增大,最大增加到 3320 kN,进入到淤泥质土层后压桩力又显著减小,最小减少到 1390 kN,到了持力层后桩压力骤然增加到终压力 4509 kN。这说明压桩过程与地质报告中所反应的土层的软硬情况基本一致。

2.2 受力机理分析

(1) $Q-s$ 曲线分析

受工程桩条件的限制,本次试验未能进行到桩端土体极限状态,但已使试桩纵向应力达到材料极限强度的标准值。静荷载试验的 $Q-s$ 曲线的线型是桩身材料或桩周土破坏机理和破坏模式的宏观反映。本次试验的 $Q-s$ 曲线见图 2。从图中可以看出 3 根桩的 $Q-s$ 曲线线型相似,均呈缓变型,当加载到 5000 kN

时,没有出现明显的向下转折段,也没有出现第二拐点,没有达到极限状态。计算这3根桩弹性压缩变形量基本上与实测桩顶沉降量一致,说明桩顶沉降基本上为桩身的弹性压缩变形引起。卸载后残余沉降为7.44~7.79 mm之间,比较均匀,说明桩的持力层较好。单桩承载力满足设计要求。

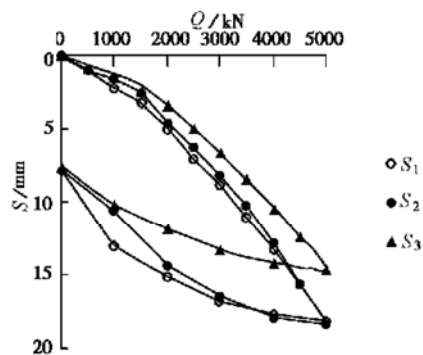
图2 $Q-s$ 曲线

Fig. 2 Static load test curves

(2) 实测各试桩桩身轴力传递特性

各试桩实测轴力分布图示于图3。从图3中可以看出:桩身0~18 m范围内,桩身轴力传递较快,轴力图上的斜率较大;桩身17.0~38.0 m之间,轴力变化较小,轴力图斜率较小。这主要是由于0~18 m桩周土为中砂,侧摩阻力较高,而17.0~38.0 m桩周土层为淤泥质土,侧摩阻力较低。再往下土层为粉质黏土或粉砂,强度比淤泥质土高,则轴力变化又增大,斜率又提高。从图3还可以看出,桩顶荷载是逐渐地从上向下传递,中砂段承担了相当大的摩阻力。在最大试验荷载5000 kN作用下, S_1 S_2 S_3 桩中砂段分别承担了2284, 2120, 2493 kN的承载力,分别占桩顶荷载的45.7%, 42.4%和49.9%;淤泥质土段分别承担了1149, 1733, 1211 kN,分别占桩顶荷载的23.0%, 34.7%和24.2%;桩端荷载分别为505, 611, 428 kN,仅分别占桩顶荷载的10.1%, 12.2%和8.6%;桩端承载力占桩顶荷载的10%左右。对于长达40余m的PHC管桩,3根桩的长径比分别为86.2, 84.2和82.2,其受力特性为端承摩擦桩,以摩擦力为主。

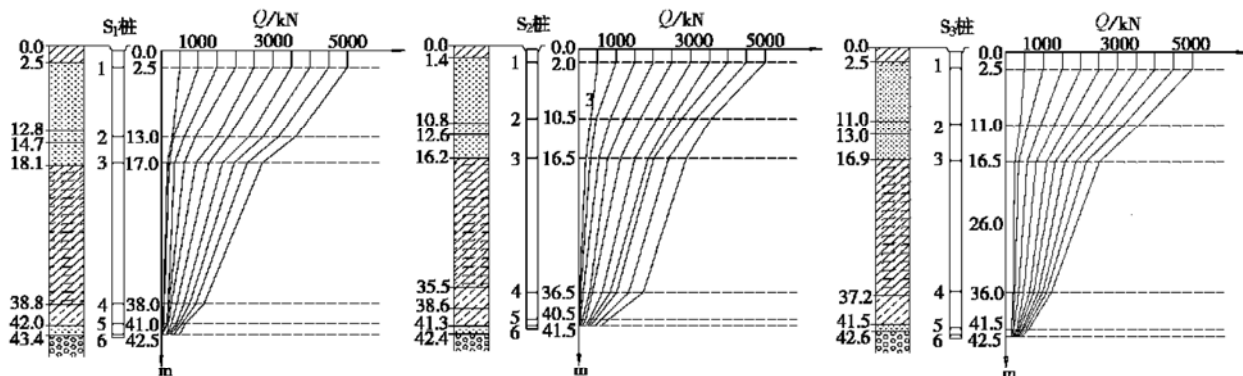


图3 各试桩桩身轴力分布图

Fig. 3 Axial force distribution curves of test piles

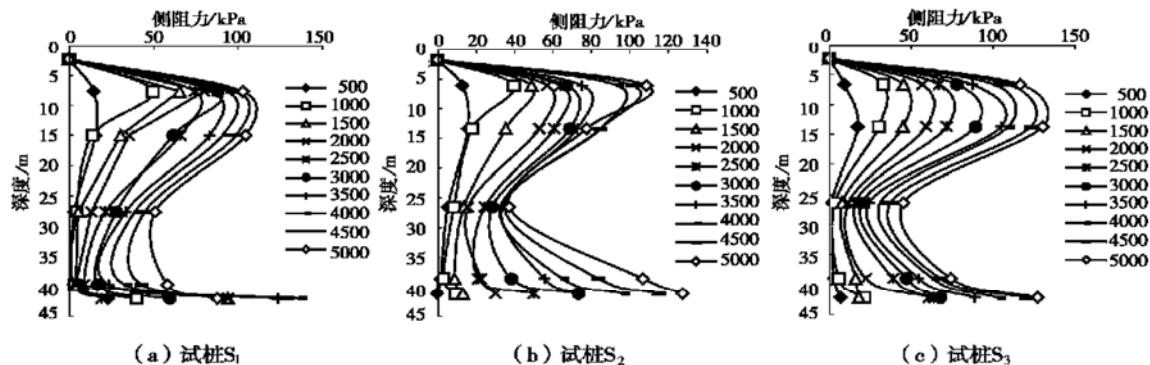
(a) 试桩 S_1 (b) 试桩 S_2 (c) 试桩 S_3

图4 各试桩桩侧阻力分布曲线

Fig. 4 Skin friction distribution curves of test piles

表 2 极限桩侧阻力对比关系

Table 2 Comparison of ultimate skin resistance

土层名称	极限桩侧阻力/kPa					
	地质报告	实测值	“94”规范	福建省规范	广东省标准 ^[3] (DBJ/T15- 22- 98)冲钻孔灌注桩(地质报告)	
中砂 I	45	> 80	54	60	54~ 74	43
中砂 III	46	80~ 100	54	60	54~ 74	44
淤泥质土	24	30~ 45	20~ 28	14~ 30	20~ 28	24
粉质黏土	57	> 70	50~ 66	35~ 50	50~ 66	55
粉砂	23	> 80	22~ 42		22~ 44	22

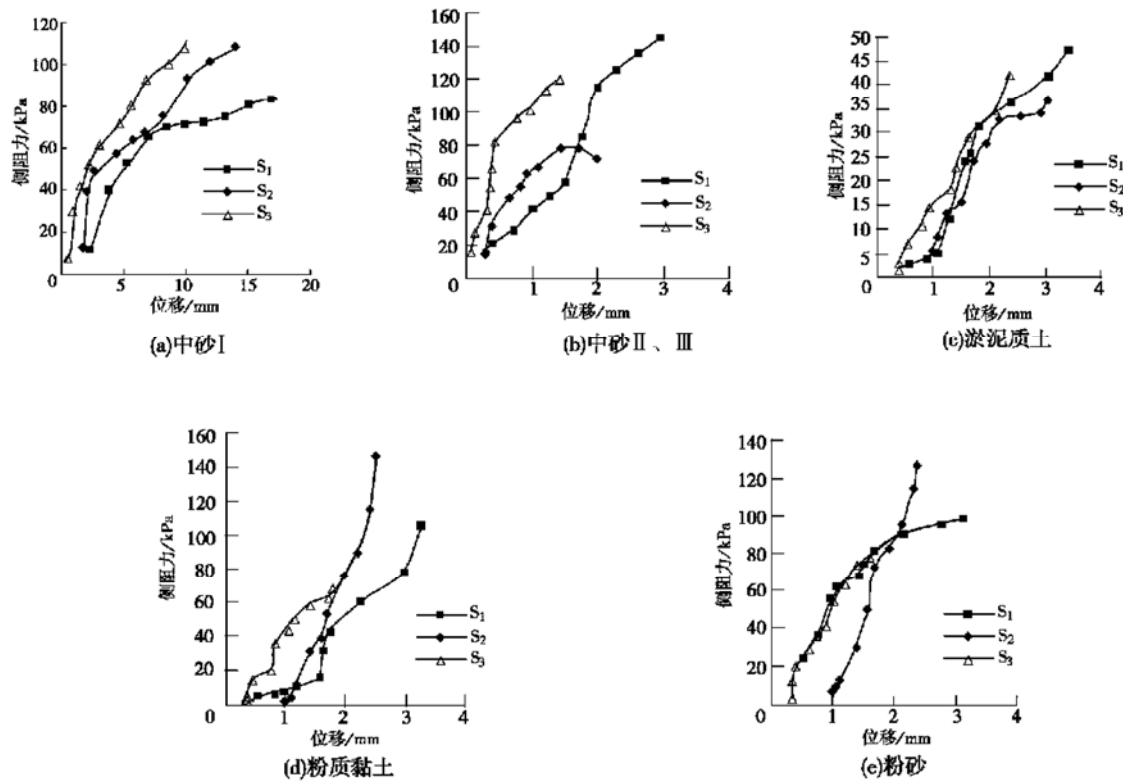


图 5 桩周阻力及相对位移关系曲线

Fig. 5 Relations of pile friction to relative displacement

(3) 桩侧摩阻力性状分析

各桩段侧摩阻力平均值可根据实测的轴力除以面积得到,如图 4 所示,主要土层的桩周阻力及相对位移关系曲线见图 5。众所周知,桩侧阻力的大小与桩土之间的相对位移、刚度比、作用在桩侧表面的水平应力以及土的特性有关。淤泥质土桩侧的摩阻力相对较小,较大的桩侧摩阻力主要在桩的上半段中砂 I、II、III 到了下半段的淤泥质土时桩侧摩阻力显著下降,靠近持力层附近较好的土质时,摩阻力又显著增加。摩阻力近似呈“R”字型分布。从图 5 可以看出,随桩土相对位移的增加,各土层的摩阻力随着桩土相对位移的增加而增加,即使在灌注桩中常常表现为加工软化型土层如淤泥质土等,在本次试验中亦还看不出有明显的软化迹象。实测的桩侧摩阻力与规范值、勘察

报告推荐值以及灌注桩之间的比较见表 2。

从表 2 中可以看出实测值均比地质报告、“94”规范、福建省规范以及广东省标准有较大幅度的提高。在桩周相同土层的条件下,极限桩侧摩阻力亦比福州地区冲钻孔灌注桩的指标有较大幅度的提高,甚至提高 2 倍以上。在桩的压入过程中,将使桩周一定径向距离处和桩尖以下垂直处的砂土粒发生位移,并改变其密度^[4]。本工程桩的上半段主要为稍密状态的中砂,在施工过程中,使桩周的中砂因侧向挤压而趋于密实,导致产生“强化”效应,桩侧摩阻力大大提高。同样粉砂的侧摩阻力也会有一定程度的提高。本工程下半段的淤泥质土属于饱和软土,土体渗透系数较小,瞬时排水固结效应不显著,体积压缩变形小,侧向压力增加,在压桩过程中使桩侧土受到挤压、扰动和重塑。易

引起超孔隙水压力,土体产生横向位移和竖向隆起,压桩时桩侧有效应力减小,桩侧阻力不大(如图 1 所示),但由于本工程上半段土层主要为透水性较好的中砂,具有较好的排水通道,因此,超孔隙水消散较快,土体固结显著,触变恢复,有效应力增加,桩侧摩阻力在压桩后增长较快。3 根桩试验时间距压桩时间仅有十多天时间,从实测结果看,亦比地质报告和规范值有一定程度的提高,压桩地面也没有什么隆起。因此,有必要进行现场更多足尺试验,积累更多的实测数据,才能对 PHC 管桩桩周的工作情况进行更进一步的了解。

3 结 论

(1) 随着 PHC 管桩的广泛应用,很有必要对其荷载传递机理进行研究,作为挤土桩,其存在着与灌注桩不同特点的规律。

(2) 随着桩顶荷载的增加,桩侧摩阻力是自上而下逐步发挥,桩侧摩阻力和桩端阻力并非同时发挥作用,侧摩阻力的发挥程度远大于端阻力的发挥程度。

(3) 在工作荷载作用下,约有 95% 的工作荷载均

由桩侧摩阻力承担,在最大试验荷载 5000 kN 作用下,桩端承载力仅占 10% 左右,工作机理为端承摩擦桩,以摩擦力为主。

(4) 由于 PHC 管桩属挤土桩,在施工过程中,使得桩周砂土的密实度得到提高;桩周淤泥质土由于上覆砂层的排水作用,孔隙水压力消散较快,有效应力增加显著。因此,实测得到的桩侧摩阻力比规范值和地质报告推荐值均大得多,该工程桩的承载力尚有一定的潜力。

参加试验工作的还有许国平、张耀年、陈孝贤等同志。

参考文献:

- [1] 阮起楠. 预应力混凝土管桩[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
- [2] JGJ94-94, 建筑桩基技术规范[S].
- [3] DBJ/T15-22-98, 预应力混凝土管桩基础技术规程[S].
- [4] 冶金工业部建筑研究总院. 地基处理技术(3)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.

4th International Conference on

DAM ENGINEERING(CALL FOR PAPERS AND EARLY REGISTRATION)

18- 20 October 2004: Nanjing, China

Organised by: Hohai University, Nanjing, China; China Society for Hydraulic Engineering; China Society for Hydropower Engineering.

Introduction: With the rapid economic and industrial growth of many regions in Asia, the development of water resources is a vital element of the infrastructure to satisfy the ever-increasing demand for power, irrigation and drinking water supply. This development includes both the construction of new facilities and the rehabilitation of existing older plants. Dams are usually the key element in such facilities and their economic construction and safety are of paramount importance.

The principal aim of the conference is to provide a forum for the exchange of experiences amongst dam designers, constructors and operators on the behaviour of dams. The conference shall review the state-of-the-art of dam engineering and the practice of monitoring and safety control. Emphasis shall be on practical aspects, while scientific issues will complement the improvement of the state-of-the-art in design and construction.

The themes of the conference will include: state-of-the-art in

the design of dams; modern analysis theory and methods of dams; arch dams, gravity dams, embankment dams, etc; planning, analysis, design and construction of dams; dam reliability and safety assessment; construction materials for dams; stability of dams; dam foundation and seepage; seismic and earthquake behavior of dams; dam instrumentation and monitoring; dam maintenance and management systems; dam optimisation and expert system; rehabilitation of old dams and dam heightening; environmental aspects and legal issues; health inspection of dams.

All enquiries and registration to: The Conference Director(DM04), 150 Orchard Road # 07- 14, Orchard Plaza, Singapore 238841. Tel: (065) 67332922 Fax: (065) 62353530, E-mail: cipremie@ singnet. com. sg, Web: <http://www.cipremier.com>.

Conference Secretariat in China: Hohai University, Xi Kang Road 1, Nanjing 210098, P. R. China. Tel: (025) 83787781, Fax: (025) 83739219, E-mail: qingwenren@ yeah. net, Web: <http://www.dam04.com>.