

专题报告

# 上海金茂大厦施工技术

叶可明, 范庆国

(上海建工(集团)总公司, 上海 200002)

**[摘要]** 上海金茂大厦采用钢筋混凝土核心筒与钢结构外框架相结合的混合体系, 是当今世界上排名第三高度的大楼。由于上海地区属软土地基, 因此金茂大厦的建造有着相当高的难度, 尤其是基础与上部结构的施工, 上海建工(集团)总公司从实际出发, 大力开展科研攻关, 在广泛汲取国内外成功经验的基础上, 因时、因地制宜, 形成了自己独创的施工工艺和严谨的科学管理体系, 解决了深基、巨柱和超高空浇筑与安装等一系列施工难题, 仅用4年时间就实现了大厦基本建成的预期目标, 创造了世界建筑史上又一新的高速度。

**[关键词]** 金茂大厦; 框—筒结构; 大口径钢管桩; 超深地下连续墙; 可转换整体式自升模板体系; 钢结构吊装

## 1 工程概况

### 1.1 工程规模

金茂大厦系由上海对外贸易中心股份有限公司投资, 建于上海浦东陆家嘴金融贸易区, 与著名的“东方明珠”电视塔相邻。该工程占地面积  $2.3 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 地下3层, 地上名义88层, 实际主楼达94层, 另有裙房5层, 总建筑面积  $29 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 建筑物顶端高度420.5 m, 是中国已结顶的第一高楼, 在世界上仅次于马来西亚吉隆坡城市中心广场(450 m)和美国芝加哥西尔斯大厦(443 m)。金茂大厦是一座多功能小社会性质的大楼, 集办公、酒店、购物、娱乐于一体, 其中主楼的1~52层用于办公, 53~87层为五星级酒店, 88层为观光层, 地下室、广场与裙房为停车、娱乐、购物等设施。大楼全貌见图1。

### 1.2 结构特点

金茂大厦主楼上部结构采用钢筋混凝土核心筒与钢结构外框架相结合的混合体系, 主要由四大部分组成:

(1) 核心内筒。平面呈八角形, 外包尺寸 27

$\times 27 \text{ m}$ , 53层以下有井字式内墙, 分隔成9格53层以上无中间隔墙, 为一空心钢筋混凝土筒体;



图1 金茂大厦全景

Fig.1 Profile of Jinmao Building

(2) 外框架。在主楼四侧各有二根巨形劲性钢筋混凝土柱, 由框架钢柱与钢梁与其相联, 形成环拥核心筒的外框架;

(3) 巨型钢桁架。这是超高层建筑内筒体与外

框架之间传递水平力与协调变形的重要构件，该工程共设三道，分别设在 24~26 层、51~53 层、85~87 层，三道桁架从外框的巨型柱伸入核心筒体的钢筋混凝土壁内，施工后不影响外观；

(4) 楼板。其主要施工方法是在钢梁上安置既可代替模板，又能承受一定荷载的压型钢板，上面适当配筋后浇混凝土。

金茂大厦五层裙房采用一般的多层框架钢结构体系。

金茂大厦主楼、裙房与广场地面之下均为三层地下室，地下室为钢筋混凝土结构，主楼下部为满堂 4m 厚基础板，裙房及广场下部为普通筏式基础。由于该工程基础底部采用盲沟集流、人工排水系统，因此基底不考虑浮力，基础板相对较薄。

金茂大厦主要采用人工地基，主楼桩采用  $\phi 900$  mm 钢管桩一直打到地质构造中的第九层土，即地下 83 m 处，裙房采用小型钢管桩，打到第七

层土。

### 1.3 工程施工概况

该工程由美国 SOM 设计事务所承担扩大初步设计，上海建工集团总公司为总承包。上海建工设计研究院负责土建施工图设计及各工种施工图总协调，土建主体由上海市第一建筑工程公司主承包，钢结构由日本新日铁承包制作，上海市机械施工公司负责钢结构总管理与现场吊装，外围玻璃幕墙由德国格特纳公司承包，其他分项有国内外分包公司几十家。工程从 1994 年起步打桩，1995 年初开始做地下连续墙及地下基础施工，1996 年进入地面结构施工，1997 年 8 月主体结构封顶，1998 年 8 月 28 日基本建成，逐步投入使用。合计总工期仅 4 年，总投资约合人民币  $40 \times 10^8$  元。

## 2 基础施工技术

### 2.1 基础平面及承台剖面见图 2、图 3。

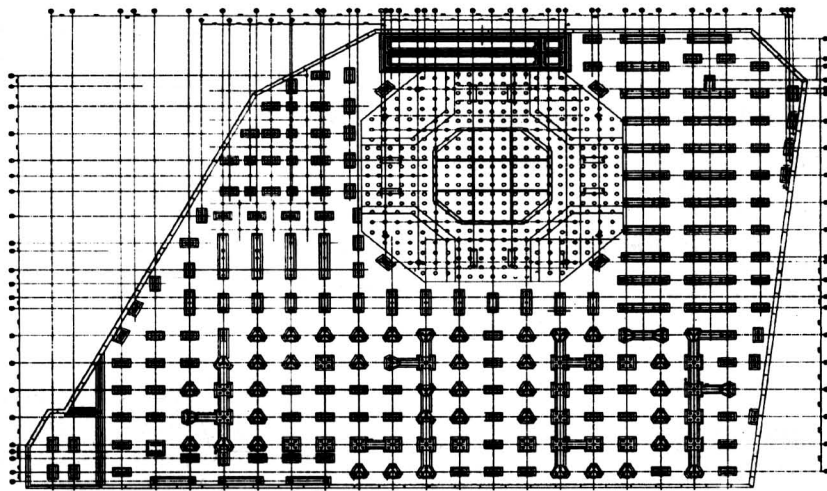


图 2 基础平面

Fig.2 Foundation plan

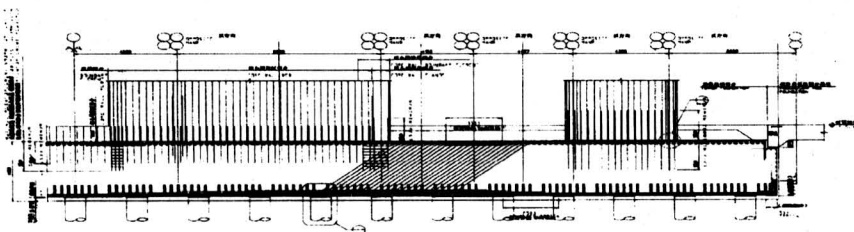


图 3 基础承台剖面

Fig.3 Pad section

## 2.2 人工地基

主楼与裙房结构支承均采用钢管桩，用机械打入。主楼钢管桩打入深度达 83 m，先采用 10 t 柴油锤，后采用 30 t 桩锤，送桩深度 15~19 m。

## 2.3 地下室外墙（地下连续墙施工）

该工程地下室外墙与基坑支护挡土挡水墙合一，采用地下连续墙。地下连续墙厚 1 m，深 36 m，沿建筑物外围周长共 568.4 m，总计  $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，采用 C40 混凝土浇筑，总用钢量 3 000 t。为了防水同时也为了加快施工速度，连续墙各槽段间接头均采用企口式接头。36 m 深的地下连续墙在上海也属较深案例，以前很少施工，而且该工程所在地下 29~36 m 处遇有俗称“铁板砂”的坚硬砂层，普通成槽机无法进行。经过研究试验，最后采用两钻一抓的办法，即先在两端钻孔后再用成槽机抓斗取土，从而解决了施工难题。

## 2.4 基坑支护体系

2.4.1 基本方案。该工程基坑周长 568 m，深度 15~19 m，面积近  $2 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，总挖土量达  $32 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。美国 SOM 设计公司原设计方案是一次将土全部挖出基坑，其基坑围护采用多层斜拉锚的方法，也已完成了初步设计并由德国公司做了斜拉锚的试验。

对于这样的方案，按上海的实际情况，我们进行了认真分析，觉得有四大缺点：上海是软土地基，斜拉锚变形很大，而且万一有一根失效，危险

性极大；斜拉锚总量达 2 000 余根，从试验的速度看，施工进度很难保证；成本高，与其它方案相比，并无经济上的优越性；大基坑全面打开，水土保持难以控制，影响环境安全。后来，由上海建工集团对基坑支护方案进行优化，决定采用整个基坑分而治之的钢筋混凝土支撑方案，即整个大基坑设三道支撑，在主楼部位加设第四道支撑，主楼部位与大坑之间暂由临时钢筋混凝土排桩分开，可以先将主楼基坑施工到底，其他部分再按施工力量、时间与空间的安排，以最优组合分步实施。

2.4.2 支护方案分部实施的力学分析成果。关于支护结构的力学分析有许多的计算假定与方法，我们进行了多种土压力的计算。如静止土压力、水土分算压力、水土合算土压力等。挡土墙按多点支撑的连续梁和下部插入弹性土体计算。计算结果相差很大，最大控制变矩差值达一倍，最后根据类似工程实测情况作出技术决断，采用水土合算较小控制应力的结果见图 4。实践证明也较经济合理。

## 2.5 基坑挖土及支撑的实施步骤

2.5.1 在地下墙及主辅楼之间的临时排桩完成以后，随之投入 6 台挖土机齐头后退进行施工，先全面开挖第一道支撑底以上的土方（约  $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ）。此时地下墙为悬臂支挡方式。当工作面开出以后，即进行第一道钢筋混凝土支撑施工，见图 5。从图 5 可以看见挖土还在进行，而第一道支撑已在制作。

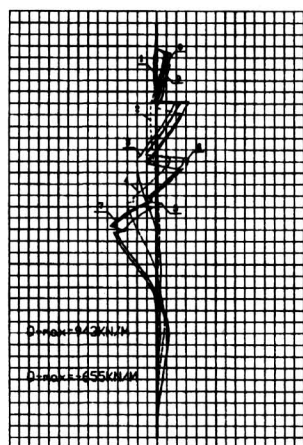


图 4-1 弯矩包络图  
Moment

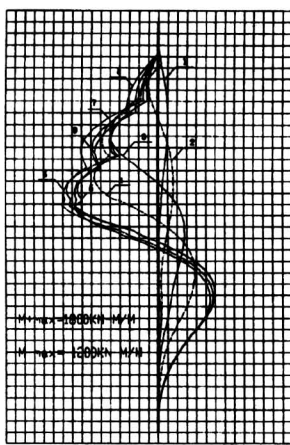


图 4-2 剪力包络图  
Shear force

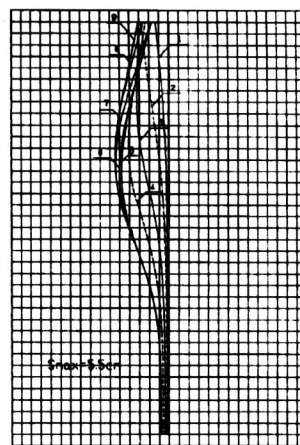


图 4-3 位移包络图  
Displacement

图 4 包络图

Fig.4 Envelope diagrams



图 5 制作第一道支撑

Fig.5 Working face of the first layer of shoring

2.5.2 在第一道支撑面上修建塔吊轨道及交通道路，为主楼基坑及下一步大面积基坑全面开挖作施工准备。实际上，此时整个工地的操作平面已移至这道支撑上面，许多材料及临时设施也都放在这层平面，为便于交通，另设有斜坡道与市区道路相接。

2.5.3 在主楼基坑土方进行开挖时，先将主楼周边土方挖成斜坡，直到第二道支撑底，随即施工主楼部位基坑的第二道支撑。

2.5.4 继续进行主楼基坑的挖土工作，并将临时坡道建造至主楼基坑中部，尔后随挖随撑，直至主楼基坑底，见图 6。



图 6 临时坡道

Fig.6 Temporary slop

2.5.5 在主楼底板施工的同时，局部裙房基坑也开始进行第二道支撑挖土。当主楼底板混凝土浇筑完成后，一方面进行主楼地下室施工，另一方面对整个大基坑的其余部分全面进行向下挖土施工，为加快挖土效率，保证施工安全，在大基坑内的第一道支撑上设置交通道路及挖土机停机平台，见图 7。

2.5.6 基坑降水及地基加固。在整个基坑挖土过程中同时进行深井降水及局部土体注浆加固，其中

虽也经历过下部承压水由钻探孔道冲出坑底的险情，但基本上采用传统的施工方法。



图 7 支撑上的停机平台

Fig.7 Parking platform on the shoring

2.5.7 施工全过程进行基坑变形监控，挖土阶段周边水平与垂直变形基本上控制在 50 mm 左右。

## 2.6 主楼底板标高号大体混凝土施工

主楼承台底板，长 64 m、宽 64 m、厚 4 m，混凝土 C50，总方量为 13 500 m<sup>3</sup>，如此高标号的大体积混凝土，在上海尚无先例，国际上也少见。美国 SOM 公司原设计将底板分为 8 块浇筑，以避免因温差收缩等造成破坏性裂缝，但问题是在分成 8 块施工后，在深基坑坑内施工工期势必延长，风险加大。所以，上海建工集团在进行深入研究并经试验验证后，决定改为 13 500 m<sup>3</sup> 混凝土一次连续浇筑的施工方案。在这中间采取的主要技术路线是内冷却外保温的温控办法，具体有如下措施：

2.6.1 改善混凝土组成的原材料与优化配合比。采用 525 矿渣水泥，掺加粉煤灰、缓凝减水剂，并对粗细骨料的品种、规格均有严格要求。

2.6.2 混凝土体外保温保湿。因为造成裂缝的最大问题是大体积混凝土体内外温差，特别是高标号混凝土温度很高，所以要在混凝土体外采用塑料薄膜与草袋覆盖保温保湿。

2.6.3 混凝土体内降温，为减少混凝土体内温升及缩短降温期，在混凝土左右部（即 4m 高度内）排放冷却水管，在混凝土入模后即进行有控制地通水，进行循环冷却。

2.6.4 配置适当的钢筋抗裂。按施工工况对基础已有配筋进行抗裂计算，使配置的钢筋均能够满足抗裂要求。

2.6.5 信息化施工控制。在施工之前，根据已定的工况条件进行 4 m×4 m×4 m 同样配筋率及混

凝土配比的大试件试验。试验时按预定工艺对冷却水及混凝土温度等参数进行监控记录,在试验成功的基础上,将数据输入电脑,作为参照点。在实际工程中进行全面的电脑温控,金茂大厦整个基础承

台共设 127 个测点,按信息监控通水量、水温及保温措施。实施结果,虽然中心温度达到 97.5℃,但基础未见裂缝产生,而且经过钻芯检查,强度与弹性模量均符合要求。测温结果见表 1。

表 1 测温轴各中心点混凝土温度情况

Table 1 Centre concrete temperature Condition

测点号	A3	B4	C3	C5	D4	D5	F3	F4	G5	H3	I5	J3	M2	Q2	R3	T3
入模温度/℃	27.1	29.2	31.3	31.1	30.9	30.2	26.8	30.3	30.3	36.6	36.2	28.6	30	29.8	28.9	34
最高温度/℃	74	89.8	93.1	93.8	94	96.7	93.3	90.1	95.8	95	89.6	70.1	75.4	72	97.5	71.2
最高温升/℃	46.9	60.6	61.8	62.7	63.1	66.5	66.5	59.8	65.5	58.4	53.4	41.5	45.4	42.2	68.6	37.2
温升时间/h	32	38	41	37	41	39	42	41	40	50	46	35	54	45	52	36

### 3 上部结构施工技术

#### 3.1 基本工艺及垂直运输的组织

3.1.1 钢筋混凝土核心筒的施工主要采用钢平台提模体系,该模板与外挂脚手架可随楼层施工上升而不需要垂直运输。混凝土则采用泵送,安排 2 台混凝土泵即可以一泵到顶,最高点达到 380 m 以上。对钢筋及其他辅助材料需要垂直运输的,另在核心筒筒壁上安装 1 台扶墙爬升式的 154EC 塔吊。

3.1.2 钢结构需要从地面吊到高空安装,工作量较大,在施工上将运输与吊装相结合,安排了 2 台 M440D 塔吊,附着在巨型钢柱上,使其随着钢结构的安装而上升,可以达到大楼顶点的吊装高度。

3.1.3 劲性钢筋混凝土巨柱施工,是在劲性钢柱外绑扎钢筋,模板采用可变截面的提模体系,混凝土采用泵送,因此其垂直运输不必再作专门安排。

3.1.4 人员上下及辅助材料运输采用 4 台施工电梯、2 台普通型电梯,从 -15 m~173.55 m、173.55 m~333.70 m 作接力运输。另外 2 台高速施工电梯从 ±0.00 到 333.70 m,当施工结构到顶部后,立即安装部分永久电梯,可作后阶段施工垂直运输之用。

#### 3.2 模板施工技术

3.2.1 核心筒模板体系。金茂大厦核心筒的上下形状基本一致,仅壁厚有不同,但由于有外伸钢桁架将筒身分成三段,故筒体模板不能连续上升施工,因此该工程模板体系决定采用曾在上海“东方明珠”电视塔施工中应用过的钢平台模板提升体系,再根据实际工况作了些改进:如遇外伸桁架处,可将该钢平台解体后越过钢桁架再重新组装上升。此套模板称为可转换整体式自升模板体系,整套模板体系分六大部分。

第一部分 钢平台,是整套模板体系的承重平台及工作平台,在转换时,筒圈内分解为 9 块,见图 8。

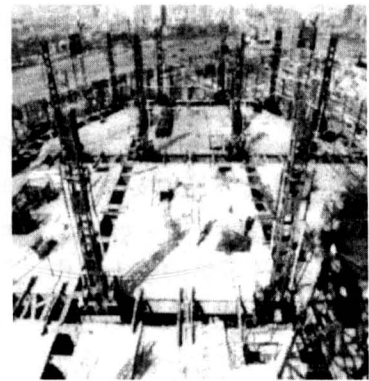


图 8 自升模板体系的钢平台

Fig.8 Steel platform of auto-moving form system

第二部分 劲性钢柱,共 28 根,浇在建筑在结构的筒壁内,随结构上升而接高,是钢平台的垂直支承点,见图 9。

第三部分 钢大模,是核心筒体的施工模板,挂在钢平台上,以在钢平台下作适当移动,可以改变筒身壁厚,拆模后可以清理。

第四部分 脚手架系统,该系统与模板一样接在钢平台下面,作为装拆模板、清理工作等用的脚手架,随钢平台上升而上升。

第五部分 提升机械系统,在每一个钢柱上有一个电动提升机,提升能力为 200 kN,支承在钢柱上,可以上升与下降,由计算机控制。

第六部分 计算机控制系统,即平台标高的监控系统,可及时将信息反馈给计算机,其水平控制标准在 ±10 mm 之内,当超过时,可以及时由



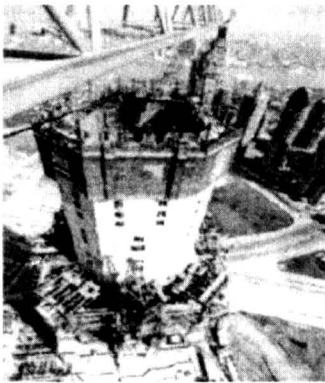


图 9 核心筒模板施工

Fig.9 Formwork of the core wall

计算机调节提升机，使平台以匀速水平上升。

核心筒模板体系施工时的实况见图 9。此种模板体系由于支承在钢柱上，基本不受刚浇捣的混凝土强度的制约，所以核心筒施工的最快速度达到一个月 13 层，而且模板刚度大，混凝土外形整齐。其中电梯井筒的垂直度当施工至 300 m 高时也仅偏差 8 mm。

3.2.2 巨型柱模板。巨型劲性钢筋混凝土柱是外伸桁架在钢框架上的支承柱，共 8 根，在地面时断面为  $5.0 \times 1.5$  m，分 5 次收分后到结构顶部时为  $3.5 \times 1.5$  m。该柱的混凝土浇捣工作紧跟在钢结构吊装之后，约相差 5~6 层。由于已经有劲性钢柱在巨柱内，模板与脚手架可以支承在劲性钢柱上，所以采用了以在钢柱上悬挂提升机为上升动力、在已浇制混凝土柱上设固定爬架的爬模体系。与一般爬模所不同的是：爬模外边开口（因为有一已架小钢梁的阻挡，需要跳过），另外模板及爬架可以收分。这些技术措施保证了只用一套爬架与模板，就可以从底部一直施工到顶，最快时也达到每月 13 层的速度。

### 3.3 混凝土泵送技术

金茂大厦主体混凝土结构的最高点为 382.5 m，混凝土共分 3 种标号：从基础到 200 m 左右为 C60，从 200 m~300 m 左右为 C50，300 m 以上为 C40。混凝土全部采用由工厂集中搅拌的商品混凝土，按施工计划由搅拌运输车运送到现场，再全部采用混凝土泵直接泵入模板内，由于泵送高度超过上海电视塔曾经施工过的 350 m 高度，因而成为新的泵送高度记录，这也是世界上建筑工程中的最高泵程，为了保证一泵顺利到顶，我们采取了如下几条技术措施：

3.3.1 选用 2 台德国 BSA-14000HD 型固定泵，一台使用一台备用，为了减少泵送压力损失，将泵管沿核心墙固定敷设，使之有可靠支承，同时，尽可能减少弯头，在弯头处全部用大弯头，并且明确每次使用后都必须及时加以维护保养。

3.3.2 选用材质较好的粗细骨料，优化配比。如细骨料，在天然砂中混和部分人工砂，粗骨料采用 5~16 mm、13~25 mm 两种石子混和，从骨料选择上保证性能优化。混凝土各高程的参考配比如表 2。

3.3.3 采用双掺技术优化混凝土性能。在混凝土内掺加 II 级粉煤灰及 FTH 高性能外加剂，以保证有较好的混凝土泵送性能，一般混凝土坍落度在 200 mm 左右。

3.3.4 施工时按季节与气温及时调整混凝土级配。

通过以上措施，比较顺利地实现了 382.5 m 高度混凝土一次泵送到顶的目标。

### 3.4 钢结构吊装施工

3.4.1 钢结构吊装施工采用起重能力为 6000kN·m 的 M440D 塔吊 2 台，分别附着在 2 个巨型柱之间，随着钢结构安装上升而爬升，钢结构外框架与核心筒由预埋钢件连接。钢结构件由工厂按图纸尺

表 2 C60、C50、C40 混凝土配合比

Table 2 C60、C50、C40 concrete mixture ratio

结构部位	核心筒/m	-15.00~225.80	225.70~261.70	261.70~306.50	306.50~382.50
	巨型柱/m	-15.00~177.50	177.50~264.90	264.90~296.90	296.90~333.70
强度等级		C60	C50	C40	C40
水泥 (P.0525)		1	1	1	1
砂 (中砂)		1.14	1.302	1.716	1.862
石		1.88	2.141	2.356	2.023
粉煤灰级磨细 (II 级)		0.075	0.128	0.173	0.167
外加剂		0.0236 (FTH-2C)	0.0236 (FTH-2C)	0.0236 (FTH-2C)	0.0236 (FTH-2C)
水		0.35	0.415	0.481	0.483
水泥用量 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )		530	467	410	420

寸加工,随着高度的增加,可能有部分钢构件将产生弹性压缩,所以对后续钢结构的安装应按工地实测进行适当调整,个别部位以垫片调整高度。该工程钢结构的吊装与电焊均采用常规方法,整个钢结构安装的高度约低于混凝土核心筒10层高度,由于采取了相应的措施,施工得以顺利进行。施工实况见图10。

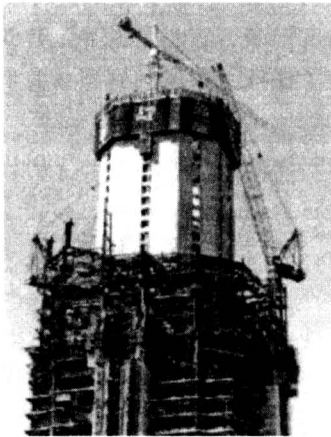


图10 钢结构吊装施工

Fig.10 Hoisting steel structure

3.4.2 外伸桁架的吊装是金茂大厦施工的关键之一,因为外伸桁架主体是浇筑在核心筒内的,其外伸部分又与桁架钢结构组合在一起,所以当核心筒施工至24层、51层时,核心筒的钢筋混凝土施工就要停止,进行外伸桁架的安装。此桁架约占二层楼高度,所以安装时要搭设临时支架以保证位置及几何尺寸的正确性。

桁架经过校核安装正确无误后,其在筒体内部的架体按核心筒体混凝土的同配比,采用临时散装模板封没后浇筑的方法,仅将连接框架部分的节点板露在筒壁之外,见图11。

等到框架部分钢结构安装到达外伸桁架高度时,再将这部分的外伸桁架联接节点板与框架梁柱的钢结构一起安装,此时的钢结构安装要信息化施工,因为结构的弹性压缩,要使已在核心筒的部分与新安装的部分标高轴线吻合,就必须根据信息来调整,而最后的连接误差则可通过设计留有的长圆形孔调节来进行调整就位。

3.4.3 塔顶安装。金茂大厦外形似中国宝塔,因此在其顶部有一钢结构的塔顶,重逾30t,这样庞大的空间桁架塔,在这样的高度,若采用一台

M440D塔吊显然是无法安装的。本次施工经过反复论证,排除了提升法与直升飞机吊装等方案,而且大胆地采用在400m高空应用双机抬吊、一次到位的方法,比较经济快速地完成了施工结顶任务,施工实况见图12。

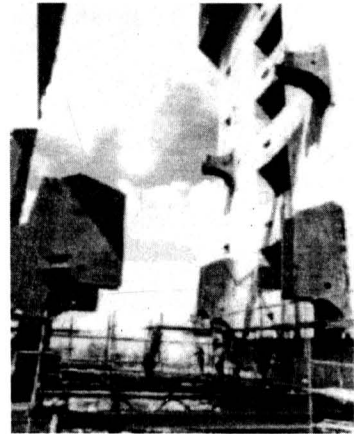


图11 钢节点板

Fig.11 Steel node plates

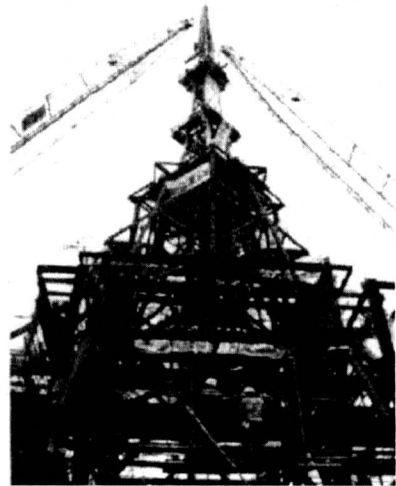


图12 塔顶钢结构安装

Fig.12 Erection of structural steel head of the tower

## 4 总承包管理与有效的立体流水作业

### 4.1 有效的总承包管理

建筑施工是由施工技术与施工组织两部分有机结合在一起的,光有先进与成熟的施工技术只能保证建成而不一定能高质量快速地建成。高度排名世

界第三、建筑面积达  $29 \times 10^4 \text{ m}^2$  的金茂大厦能在 4 年内建成，说明在施工管理上也是成功的。其一，该工程由上海建工集团总公司承包，依靠自己属下的上海建工设计研究院进行土建施工图设计与各工种施工图协调，首先从技术上保证了总承包的技术权威性与可操作性。其二，在现场项目经理部，建立了较好的组织管理体制。总承包经理可以通过文件及各种会议制度，依据总分包合同，进行有效的管理，在施工高峰时，工地有 2 500 多人操作，仍然是有序地立体流水作业，基本上实现文明高效施工。

#### 4.2 严格的施工进度控制

总承包管理对整个工程的主要节点都有着严密的计划目标，其特点是利用大工程有灵活的空间调度来争取时间。该工程的施工关键路线实现了最大限度的流水作业，例如：

(1) 基础施工与上部结构立体交叉流水作业。主楼基坑无支撑施工技术也保证了主楼的地下室与

上部结构施工可以不受大基坑施工的约束和影响，当地下室工程全部达到  $\pm 0.00$  标高时，主楼结构施工已近 20 层了。

(2) 核心筒与钢结构流水作业。核心筒施工先行，外围钢框架安装跟上，使主体结构流水作业有一个较大的踏步台阶，以充分发挥垂直运输各吊机的作用，并且有较大的工作面可以进行较多的交叉作业施工与准备。

(3) 玻璃幕墙及内部各工种及时插入施工。在施工组织中，充分利用大楼空间，开展尽可能多的工种流水作业，其中正式电梯先行及时安装，又在交通运输上保证了各工种的作业效率。

(4) 主体结构到顶后总体施工迅速开展。

由于充分利用了建筑空间，实现全过程流水作业，最后基本上实现一年基础，一年半上部结构，一年半装饰总体的进度，仅用 4 年时间基本逐步交付使用，这是国内施工的最新水平，也是世界上建设如此规模大厦的又一新的高速度。

## Construction Technology of Shanghai Jinmao Building

Ye Keming, Fan Qingguo

(Shanghai Construction (Group) General Co. Shanghai 200002, China)

**[Abstract]** Shanghai Jinmao building is the 3rd highest building in the world at present. The main building consists of reinforced concrete core wall and exterior structure steel frame. It is rather difficult to construct this edifice in such a poor soil condition in Shanghai. Proceeding from actual facts, Shanghai Construction Groups (SCG) makes efforts to conduct technology innovation, and absorbs advanced experiences domestic and abroad wildly. A unit of unique construction technique and a suitable managing system were developed with the growth of this building. SCG successfully solved a series of construction difficulties including deep-foundation work, mega-columns construction, high-altitude construction and erection, and so on. It only spent 4 years on this building, which set a high-speed record in construction history.

**[Key words]** Jinmao Building; extra-deep slurry wall; extra-high building; big-size steel tube pile; installation of steel structure; changeable integrated auto-moving form system