

软土地区特殊实验装置的深基坑施工技术

严德华¹ 沈维雄²

- | | | |
|------------------|----|--------|
| 1. 上海新建设工程咨询有限公司 | 上海 | 200123 |
| 2. 上海建工七建集团有限公司 | 上海 | 200050 |

摘要: 在软土地层的深基坑支护工程中,若施工稍有不慎,不仅危及基坑本身安全,还将会影响周围的建筑物、道路和各种地下设施,造成巨大的损失。因此探讨软土地区深基坑支护施工技术显得十分重要。本文在用作特殊实验装置的11.75m深基坑软土施工中,分析了施工的重点、难点及软土地区深基坑施工过程中影响因素^[1],介绍了围护设计方案,重点阐述了施工组织技术,通过合理的组织管理对施工安全、质量和如期完工起到决定性作用,可为软土地区同类型工程提供参考与借鉴作用。

关键词: 软土地区; 深基坑; 施工组织技术

**Construction technology of deep foundation pit for special
experimental installation in soft soil area**

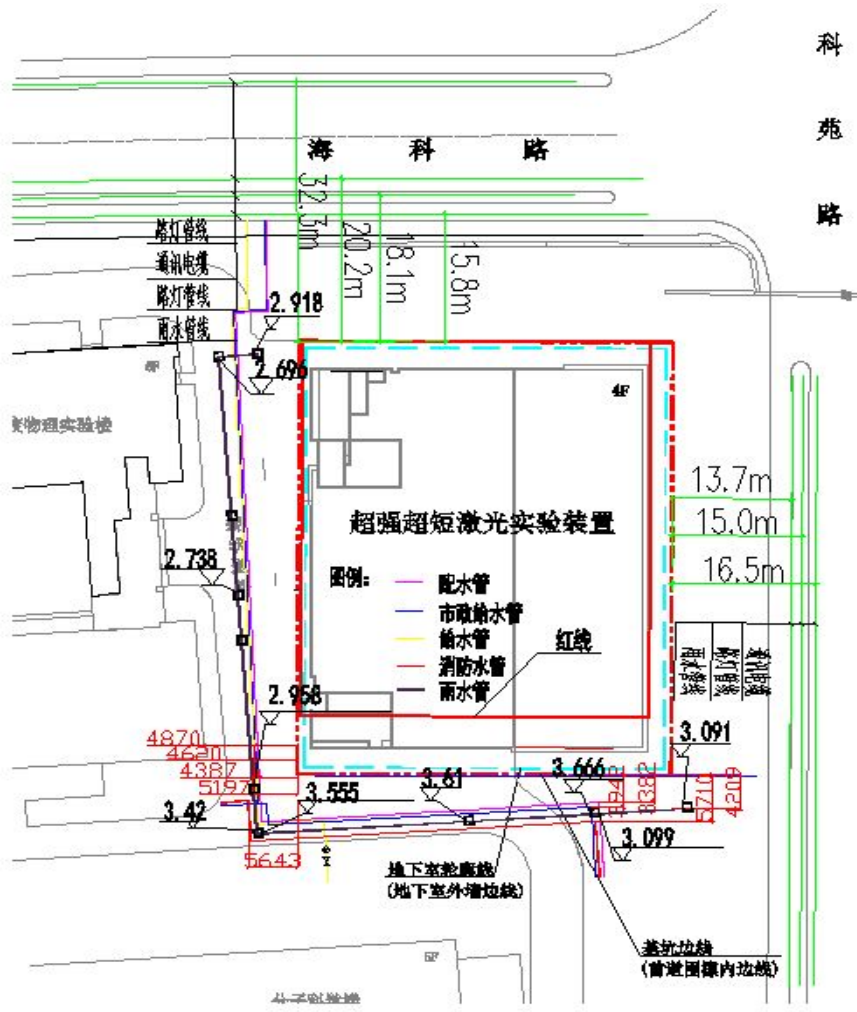
Yan dehua¹ Shen weixiong².

- | |
|---|
| 1. Shanghai new construction Consulting Co. Ltd. Shanghai 200123 |
| 2. Shanghai construction engineering seven Construction Group Co. Ltd.
Shanghai 200050 |

1. 工程概况

1.1 项目概况

本项目为上海超强超短激光实验装置大楼,简称(SUIF),位于上海浦东新区张江科技园B1-2地块,是中科院上海光机所强场激光物理国家重点实验室。用于研究国际先进技术10PW(千万亿瓦,拍瓦)级超强超短激光装置的重要关键项目。本项目为地下二层、地上四层。由于科学研究在恒温恒湿抗震方面的特殊需要,其中地下一层及地下二层,在②轴-④轴交①-③轴地下一层及地下二层上下合为一层(如剖面图所示),结构高度从12.20m至-0.45m,高11.75m,此区域为大空间用房实验设备用房(万级净化区),也是本项目的重点施工部位。



总平面图



围护结构平面图

1.2 周边环境条件

本项目基坑边东至科苑路 11m，北至海科路 15m，西侧为上海科技大学高能量密度物理实验楼，距基坑边线仅 10.4m，南侧为分子科学楼，距基坑边线 21.7m。

场地周边路线比较复杂。基坑东侧由远至近（16.5m-13.7m）范围内分别布置： $\Phi 40$ 通讯电缆， $\Phi 60$ 路灯管线， $\Phi 80$ 雨水管线；基坑北侧由远至近

（32.3m-15.8m）范围内分别布设： $\Phi 60$ 路灯管线、 $\Phi 40$ 通讯电缆、 $\Phi 60$ 路灯管线、 $\Phi 800$ 雨水管线，基坑西侧由远及近（5.6m-4.3m）范围内分别布设： $\Phi 100$ 消防水管、 $\Phi 800$ 雨水管、 $\Phi 150$ 市政给水管、 $\Phi 80$ 配水管；

基坑南侧由远至近（5.7m-4m）范围内分别布设： $\Phi 800$ 雨水管和 $\Phi 150$ 市政给水管等。

1.3 地层与分布特征

本工程场地位于古河道地层分布区，中下部分布有厚度较大的第⑥层粘性土，同时缺失第⑥层粉质粘土，且第⑦层粉性土和砂土受古河道切割影响，层顶有一定的起伏。本场地在 60.3m 深度范围内的地基土按成因、时代、沉积特征及地质

性质不同，根据上海市工程建设规范《岩土工程勘察规范》（DGJ08-37-2012）相关条文及区域地质资料可以分为6个层次。1. 第①层杂填土；2. 第②层灰黄色粘土；3. 第③层灰色淤泥质粉质粘土，第③夹层灰色粘质粉土；4. 第④层灰色淤泥质粘土；5. 第⑤-1层灰色粘土，第⑤-1-2层灰色粉质粘土夹粉砂，第⑤-3层灰色粉质粘土，第⑤-4层暗绿色粉质粘土；6. 第⑦-1层灰色粉砂，第⑦-1夹层灰色粉质粘土，第⑦-2层灰色细砂。

1.4 水文地质条件

本场地地下水类型主要有浅部土层的潜水和深部第⑦层粉性土层中的承压水。场内浅部地下水属潜水类型，受大气降水及地表水补给。地下水位埋深0.45m-2.20m，场地内无污染源，地下水对混凝土均无腐蚀性。

2. 施工重点、难点分析

1) 基坑开挖深度较大，周围环境复杂。

本工程地处上海科技大学校内，基坑南北向长，东西向短，呈长方形，周边场地狭小且平行于临近已建分子科学楼，除防噪防尘要求外，施工防震动要求高，土方开挖受到周边环境的约束。

2) 工期紧张，施工操作面紧缺，管理难度大

“当年开工、当年建成、当年出成果”是对本项目的要求，工期十分紧迫，而且施工可用操作面较小，围护桩、立柱桩、止水桩，坑内加固工程需同步、交叉施工，设备投入量较多；钢支撑拆除与地下结构工程需同步、交叉施工；施工设备和操作人员等投入量增加，给现场施工协调和管理带来难度。

3) 地质情况复杂，对围护施工影响较大

地质勘察显示，钻孔灌注桩成孔施工时遇第③、④层为淤泥质软土层易发生缩径情况，第⑤层粉土易发生塌孔情况；基坑开挖深度范围内存在第③、④层淤泥质软土层，饱和、流塑，软土抗剪强度低，灵敏度中~高具有触变性和流变性特点，易发生缩径情况；浅部地层主要以软弱的粘性土为主，对围护变形控制不利。

4) 受用地限制，围护桩和建筑外墙板间距仅有1300mm，要求围护桩垂直度控制在1/200以内，以便保证有最小操作面。

5) 实验精密装置对基础变形要求高

本工程为国家重大科研工程，实验精密装置对其基础变形都是极为敏感的，特别是装置的基础不同点之间的相对变形，如果相对变形过大，一方面可能导致对精密装置自身的损害；另一方面影响精密装置的工作性能。本工程试验区域基础最大允许沉降量为 10mm。

3. 基坑支护设计及降水方案

3.1 基坑等级

本工程基坑面积约 2304 m²，自然地坪平均绝对标高为 4.5m（相对标高 -0.75m），基坑普遍开挖深度为 13.10m（内部基坑挖深 13.20m），西侧与北侧挖深 11.55m。基坑安全等级一级，环境保护等级二级。

3.2 围护结构与支撑体系

本工程采用钻孔灌注桩围护结构+三轴搅拌桩止水+三道混凝土支撑体系，坑内采用高压旋喷桩加固。

如表 1 所示

钻孔灌注桩	桩型	桩径 (mm)	桩长 (m)	桩数 (根)	砼等级
	围护桩 (西侧)	Φ1100@1300	30.5	41	C30 水下 C35
	围护桩	Φ1100@1300	29.5	108	
立柱桩	桩型	桩径 (mm)	桩长 (m)	桩数 (根)	砼等级
	LZ1-3	Φ850	33~34.5	10	C30 水下 C35
	LZ4 (利用工程桩)	Φ600 (后注浆)	45	31	
止水帷幕	类型	桩径	桩长 (m)	工作量 (m ³)	水泥掺量
	三轴搅拌桩	Φ850@1200	22	3970.12	20%
坑内加固	类型	桩径 (mm)	桩长 (m)	工作量 (m ³)	水泥掺量
	高压旋喷桩	Φ800@1200	6.5~6.55	4372.19	25%
支撑及围檩	支撑中心标高 (m)	支撑截面 (mm)	围檩截面 (mm)	联系杆	砼等级
	-1.75 (第一道)	800×1100	1300×800	800×800	C35
	-5.75 (第二道)	900×900	1300×900	700×900	C35
	-9.75 (第三道)	900×900	1300×900	700×900	C35
支撑立柱	支撑立柱采用型钢格构柱+立柱桩形式。基坑底面以上采用 480×480 型钢格构柱，4L160×16 钢格构立柱（栈桥下采用 4L180×16 钢格构立柱）。坑底以下设置立柱桩，立柱桩采用 Φ850 钻孔灌注桩。				

3.3 基坑降水和排水方案

1)本场地深部第⑦层是上海地区的第一承压含水层,根据上海地区的区域资料可知第⑦层中的承压水埋深一般在 3~12m,低于潜水水位,并呈年周期性变化。

勘察期间所测得的地下水稳定水位埋深一般在 1.60m~1.80m 之间,相应标高在 2.78m~2.95m 之间,平均值为 2.86m。根据本工程基坑围护结构的设计情况,本降水设计方案采用深井进行基底以上和基底附近潜水的降水。

2)对于本工程来说,降水效果的好坏直接影响到基坑施工质量、对周边环境乃至工期影响,经分析和计算,当基坑开挖深度不超过 18.0m 时,本工程基坑不需要对第⑦层进行降水处理。现场共布置 12 口降水井,井深约 18.0~20.0m,采用 4mm 厚 $\Phi 273\text{mm}$ 钢管(圆孔滤管),成孔直径 650mm,采用真空抽水,土方开挖前每天控制出水总量,避免超降造成对周边环境的不利影响,分层降水,降一层挖一层,每层降水在 5 天左右,为确保大底板施工质量又考虑到本工程的止水帷幕效果和后续基础结构施工作业面需求,在大底板施工完成后封井。

3)基坑内外设置排水明沟、集水井构成的集水明排系统,确保能将雨水及污水及时排出坑外。沿场地周边四周设置排水明沟,排水沟为 400×400,每隔 50m 设置一个 800×800×800 的集水井,采用砖砌,砂浆抹面。

4)基坑开挖后在基坑四周及基坑中挖设 300×300 临时排水沟,排水沟间距为 20m,在四周角点处挖设 800×800×800 集水井。坑内积水及井点降水抽出的水可排至集水井内,再由潜水泵强排至坡顶排水沟内,再经沉淀后排入周边市政雨水井及污水井内。

5)基础底板土方开挖时,随垫层修筑排水盲沟,并利用底板内的深坑作为集水井,将积水集中至深坑统一由排水泵排放至地面。为避免加大实际开挖深度,坑内排水系统排水沟离开围护桩边的距离至少 2m 以上。

4. 深基坑施工技术和组织措施

4.1 深基坑桩基围护施工阶段

1)深基坑桩基施工与围护施工部署划分为 5 个阶段,共用 69 个日历天完成:
第一施工段:三轴搅拌桩从基坑北侧(2-3 轴)由西向东开始施工(1 台)。

第二施工段:三轴搅拌桩施工至基坑南侧(1 轴)后穿插施工工程灌注桩(2 台),从基坑南侧 B 轴-3 轴范围内向北施工。

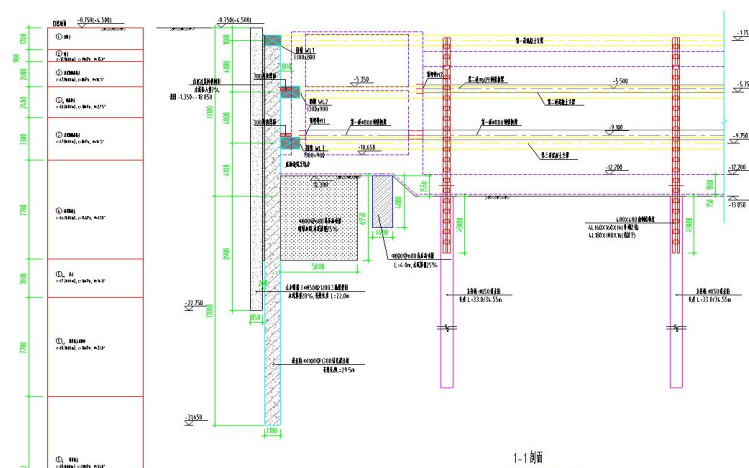
第三施工段:三轴搅拌桩全部完成后由 7 台灌注桩设备施工工程灌注桩(及后注浆)。

第四施工段:工程灌注桩完成后从东南角分别向北、向西两个方向施工围护灌注桩(4 台)。

第五施工段:围护灌注桩完后施工高压旋喷桩(2 台)坑内加固及压密注浆(1 套)。

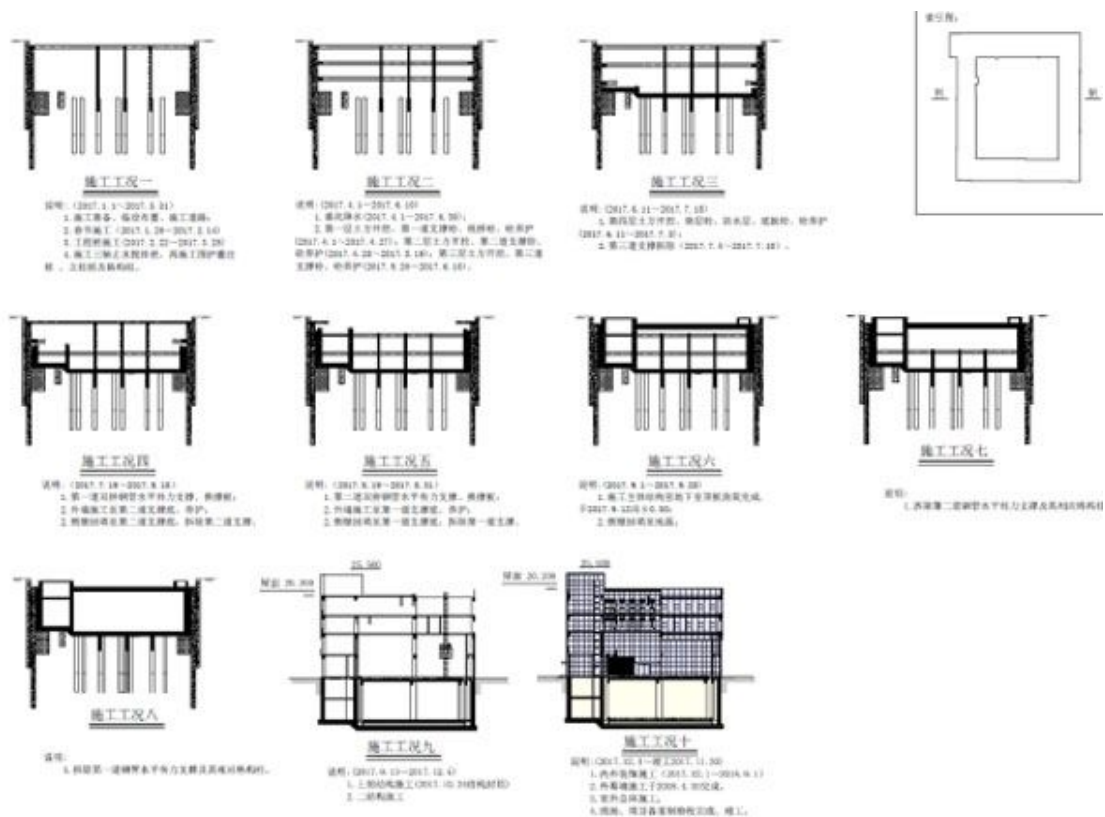
2) 对于实验装置结构防震要求,前期与设计紧密沟通,最终采用钻孔灌注桩桩端后注浆+1500mm 厚筏板的结构形式,并优化了桩位布局,另外通过优化施工工艺,确保注浆量达到 3T,确保结构达到以上微变形控制要求。

4.2 土方开挖阶段



剖面图

本场地标高-0.75m,地下室地板垫层底标高西侧为-12.30m,东侧为-13.85m,挖深一般约为 11.65~13.10m (见剖面图),集水井等局部深坑落深 0.25~0.4m,总土方量约 3.2 万 m^3 。采用明挖顺筑法施工^[2]。沿基坑深度方向从上至下挖土至相应支撑底部,然后及时设置支撑,直到挖至坑底做素混凝土垫层并浇筑混凝土底板。地下室结构施工与支撑拆除交替进行。待底板完成后拆除第三道支撑,施工墙板、换撑板、侧壁回填(施工第一道钢管支撑),拆除第二道支撑,施工墙板、换撑板、地下一层板、侧壁回填(施工第二道 609 钢管支撑),最后拆除第一道支撑(含栈桥),施工地下室顶板、侧壁回填。(见施工工况图)



施工工况图

1) 施工现场车辆进出口位于场地北侧海科路施工大门,由于施工场地狭小,基坑周边没有多余场地,基坑土方分区开挖,南侧为①区、北侧为②区,(见围护结构平面图),共四层(每层不大于 3.5m)。土方开挖依次由南向北分两块进行开挖,具体顺序为①区→②区。

2) 根据以往的施工经验和本基坑的受力分析,尽早形成 A 轴—G 轴东西方向的砼支撑,以控制围护体变形。

3) 土方开挖过程中待上道支撑和栈桥的砼强度达到设计要求后,方可开挖下一层土方。

4) 土方开挖垫层及支撑施工遵循“分层、分块、留土护壁、对称、限时”的原则。根据地下室的特点,结合周边环境情况,基底分两块进行开挖,分块开挖基底土方后,随土方工程进度依次及时进行垫层、防水层,基础底板混凝土整体浇筑施工。

5) 在支撑施工阶段,土方开挖后,及时进行支撑的施工,减少基坑暴露时间,严格控制基坑变形。

6) 控制基坑围护的变形和周边构造物的沉降,重点在于组织车辆有秩序的

进行渣土运输，运用“时空效应”^[31]；以减小基坑围护位移。

4.3 实验装置地下室大底板混凝土施工

本工程基础底板采用桩筏基础底板类型，底板厚度为 1500mm，砼 3450m³，属于大体积混凝土。整个基础底板分为两块高低跨区域，高跨区为 2 轴以西、1/F 轴以北“L”型区域，低跨区为 2~4 轴交 A~1/F 轴区域内，实验装置的需要，底板整体一同浇筑，不设置后浇带。

(1) 为合理有效地利用施工场地和人力、物力资源，并根据基坑开挖分区流程，将地下室底板按高低跨 2 个区域进行施工，配备 2 台汽车泵悬臂布料。为减少围护变形，保证基坑安全，底板砼浇筑时合理安排施工进度，与土方开挖密切配合，由低跨向高跨，分块实施。

(2) 试验装置基础大底板混凝土配合比的确定

砼级配：C35P8

坍落度：140±30mm

原材料品种	水泥 Po42.5	饮用水	碎石 5~25mm	中砂	粉煤灰	外参料 矿粉	减水剂
用量 Kg/m ³	219	160	1038	815	69	76	3.28

(3) 混凝土振捣期间每根泵管至少有 4 台振动机负责配合振捣，振动机移动间距为 400mm 左右，流淌部分及时跟踪振捣。浇筑后的混凝土，在振动界限以前给予二次振捣。二次振捣选择在混凝土初凝以前，防止混凝土施工“冷缝”的产生。

(4) 大流动性混凝土在浇筑、振捣过程中，上涌的泌水和浮浆顺混凝土坡面下流到坑底。由于混凝土垫层在施工时，已预先在横向上做出 2cm 的坡度，使大部分泌水顺垫层坡度通过两侧模板底部预留孔排出坑外。少量来不及排除的泌水随着混凝土浇筑向前推进被赶至基坑顶端，由顶端模板下部的预留孔排至坑外。

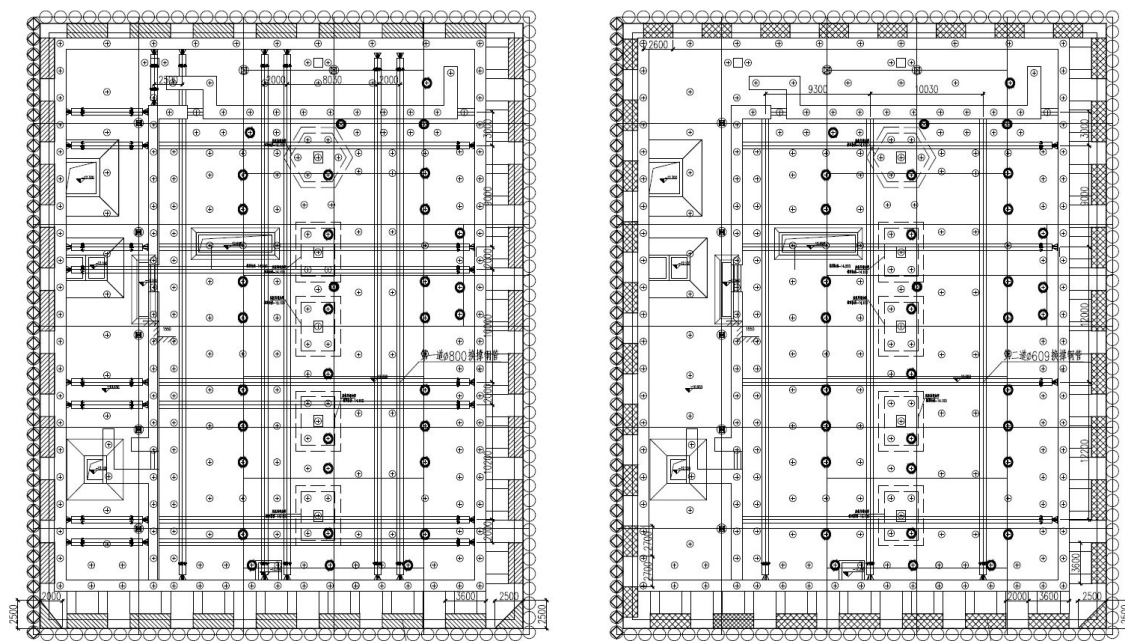
(5) 为避免大体积混凝土在硬化过程中产生内外温差过大，在混凝土施工及养护过程中进行温度监控。现场温度监测从混凝土浇筑开始，到温度趋于稳定为止。监控连续，并根据混凝土温度升降的速度调整监控频次，混凝土内外温差控制在 25℃ 以内。

(6) 根据底板的面积及混凝土浇筑的流程方向，在底板东南西北四个位置各布置一个测温点，墙板四周共布置 5 个测温点。测温点分别在混凝土厚度的不同深度布置测点，按 $1/3H$ 、 $1/2H$ 、 $2/3H$ 高度进行布置，混凝土浇筑完毕后进行施工全过程跟踪和监测。同时从混凝土浇筑 15min 后开始测温，混凝土升温阶段每隔 2h 测温 1 次，降温阶段每隔 4h 测温一次，24h 不间断，每次测温时做好大气温度、混凝土表面温度及测温的记录。

(7) 为避免出现塑性收缩裂缝，而影响混凝土结构安全，加强对混凝土的养护。

4.4 试验装置地下室大空间区域钢支撑换撑及拆除施工

1) 第一道钢管换撑采用 $\varnothing 800 \times 20$ 钢管，中心标高-9.1m；第二道钢管换撑采用 $\varnothing 609 \times 16$ 钢管，中心标高-5.50m，为加快施工进度钢管节点采用十字哈弗型快速接头形式。



钢管支撑平面图

2) 为减少基坑无支撑暴露时间，基坑开挖时，先将开挖位置所需支撑拼装完成，以缩短每循环支撑施工时间。

3) 支撑焊接前加设预应力，预应力在达到设计轴力的 80%（第一道钢支撑 200T/根、第二道钢支撑 100T/根）；预应力施加过程中检查支撑连接节点，预应力施加完毕在额定压力稳定后予以锁定。预应力施加完毕后，钢管支撑与围檩接

头部位（活络头）两侧加焊槽钢。

4) 钢管支撑拆除遵循先撑后拆的原则，即待混凝土强度达到设计要求指标后才予以拆除，支撑拆除步骤严格按规程操作。

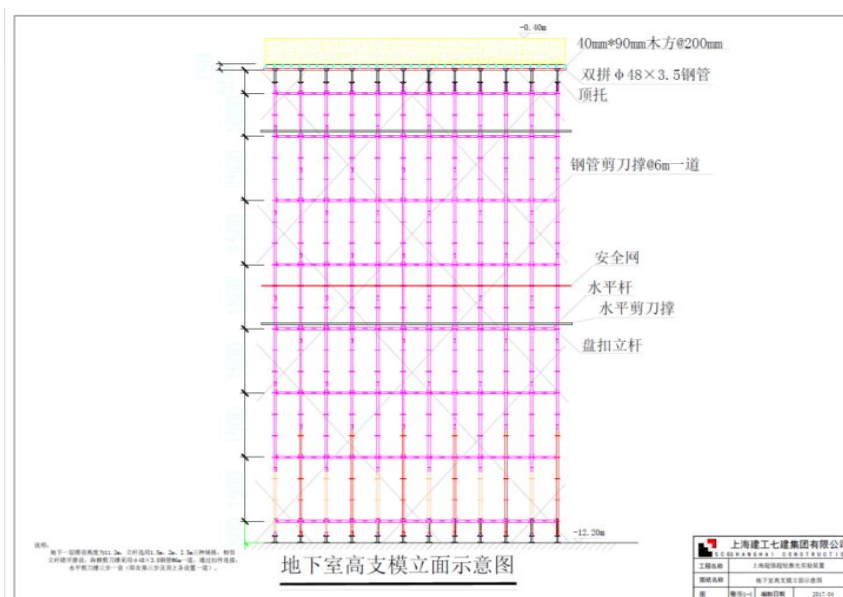
5) 受场地条件限制,地下室各层结构的施工总体顺序按从南向北进行施工,施工过程中对拆撑流程和顶板施工顺序进行合理规划。根据进度安排,支撑拆除时分段进行,利用栈桥作为材料堆放及车辆进出道路。

6) 本项目的拆撑后的吊装运输通过 A~B 轴交 2~2/2 轴线的 6700 mm×6300 mm 预留孔进行,该预留孔也是本项目后期实验大空间地下室施工的唯一材料运输通道。

7) 本工程临近上海科技大学,按市政府及对文明施工的有关要求,为减少对周边环境的影响,主要采用静音片锯机械切割的方式拆除本基坑的钢筋混凝土支撑,拆除完毕第一时间外运。

4.5 试验装置地下室大空间顶板高大模板支撑体系

地下室大空间（房中房）顶板 2-4 轴交 A-1/F 轴，结构高度从-12.20m~-1.0m, 高 11.2m，支撑在基础底板上，楼板板厚 600mm，属于高支模区域。根据本工程特点采用盘扣式模板支撑体系，排架立杆间距 900*900，排架横杆步距 1500，竖向剪刀撑每 4m 设置 1 道。为实现计划工期，该高支模脚手架支撑体系直至洁净设备安装完工后洁净地板施工前才予以拆除。地下室大空间 2 台 5T 桁车辆的安装、洁净墙顶板材、净化设备和安装等均用该脚手架支撑体系施工。



4.5.1 混凝土浇筑措施

1) 结合工程特点，本方案的高支模的混凝土均采用汽车泵浇筑，严禁在出料口出现堆载。

2) 高支模区域柱子先行浇筑，排架与柱形成可靠连接。

3) 混凝土泵送出料时，沿同一方向同步推进，出料口的混凝土及时振捣赶平，严禁集中堆载；严格控制大梁混凝土的浇筑速度与液面上升高度。

4) 高支模的混凝土施工中，增加看模人员，加强对柱模、大梁及楼板支架的看护，配备对讲机，以便发现下沉、松动和变形情况及时联络解决。

4.5.2 模板拆除条件

按照《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB50204-2015）“模板拆除”的规定实施，为了保证砼质量，本工程所有梁、板及悬挑部位的砼底模均待强度达到设计强度 100%后拆模，所有梁侧模均在砼浇筑后 48 小时后拆模，以利于砼养护。

4.6 信息化施工

由于本工程的特殊性，在整个基坑开挖和地下室结构施工期间均做到信息化施工。本项目在基坑开挖结束后，除围护墙体在深 9-12m 处向基坑最大位移量达 41.1 mm，超过设计要求值 40 mm 外，其他各项监测数据均未超过设计和规范要求的报警值。

5. 结论

特殊实验装置深基坑施工必须要分析施工中重点、难点，事前精心策划，结合实际情况，制定有针对性的专项方案；施工过程中严格控制关键节点，合理组织施工才能确保工程质量和安全，并如期完工。

-----参考文献-----

[1]王耿.软土地区深基坑施工技术研究[J].中国新技术新品，2011（20）：58-58.

[2]周彦军，刘化宽.地下拱箱复合结构隧道明挖顺筑法修建关键技术[J].隧道建设，2013（5）：77-81.

[3]贾坚.软土时空效应原理在基坑工程中的应用[J].地下空间与工程学报，2005（4）：10-13.