

城市大型综合交通枢纽 建筑技术研究

——上海铁路南站建筑技术

陈东杰 王美华 钱 培 编著



中国建筑工业出版社

城市大型综合交通枢纽 建筑技术研究

——上海铁路南站建筑技术

陈东杰 王美华 钱 培 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

城市大型综合交通枢纽建筑技术研究/陈东杰,王美华,钱培编著.
北京:中国建筑工业出版社,2006
ISBN 7-112-08473-3

I. 城... II. ①陈...②王...③钱... III. 城市-交通运输建筑-研究-上海市 IV. TU248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 080611 号

本书对上海铁路南站工程十二项重大工程技术仿真及试验研究做了全面整理,内容包括:特长平行相邻基坑施工技术研究、预留土堤相邻基坑施工技术研究、主站房风洞试验研究、超长大跨预应力环梁受力特性及施工工艺研究、主站房抗震性能研究、主站房钢结构抗火验算研究、主站房消防评估试验研究、主站房钢结构吊装技术研究、主站房屋面钢结构预应力张拉技术研究、无柱雨棚钢结构铸钢件节点试验研究和主站房阳光板屋面系统研究等。书中附有大量的计算数据和试验数据,内容丰富翔实。

本书可供有关工程技术、科研及教学人员参考。

* * *

责任编辑:郇锁林
责任设计:肖广慧
责任校对:汤小平

城市大型综合交通枢纽建筑技术研究

——上海铁路南站建筑技术

陈东杰 王美华 钱 培 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:26 字数:630千字

2006年9月第一版 2006年9月第一次印刷

印数:1—2500册 定价:45.00元

ISBN 7-112-08473-3

(15137)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

序

上海铁路南站是一座铁路与城市交通的综合换乘枢纽，同时也是特大型城市市内的换乘枢纽。“以人为本”的设计理念将铁路、城市轨道、城市高架、城市动力广场、公交车站及长途、近郊车站等多种交通相互间有机联系，融为一体。整个工程占地 60.32hm^2 ，全部地下工程建筑面积达 20万 m^2 ，相邻基坑施工是工程关键技术之一。主站房采用超大空间建筑布局，突破了国内现有的强制性规范。在结构上，采用大空间结构体系，屋面结构由 18 根 Y 形悬挑大梁组成，主梁由柱子支撑，内外圈柱子落在大尺寸预应力环梁上；环梁共有 5 道，最内圈周长为 477m ，最外圈周长为 772m ；整个屋面覆盖面积约 6万 m^2 ，钢结构安装总重量达 8000 多吨。主站房屋面系统大面积采用聚碳酸脂板，在国内外属于首次；在设计构思上，采用三层构造，既避免阳光直射，使光线柔和地进入室内，光线柔和，创造出宁静祥和的空间效果，并能够承受冰雹、雨水、风荷载等。主站房 Y 形主梁与内外柱相交节点，采用大尺度铸钢节点。此外，钢结构屋面呈曲线型，且内圈及外挑跨度均较大，属风载敏感结构，现行规范未提供类似结构的体形及风振系数等风载计算参数。这些重大技术问题为工程的顺利实施带来了挑战，这些问题的研究与解决决定着工程的成败。

本书对上海铁路南站工程中的特长平行相邻基坑、预留土堤相邻基坑、风洞试验、超长跨预应力环梁、房屋盖抗震性能、钢结构抗火、消防评估、钢结构铸钢节点试验、主站房钢结构吊装、屋面钢结构预应力张拉、阳光板屋面系统 and 无柱雨棚钢结构铸钢件等十二项重点工程技术的试验及仿真研究做了全面总结与整理，附有大量的计算和试验数据，内容丰富翔实，反映了当今重大工程技术研究的最新成果；其中所体现的对重大工程技术问题的研究思路、分析模式、试验方法及研究成果，对我们今后解决好类似的重大工程技术问题都有着十分宝贵借鉴意义。

中国工程院院士



前 言

作为标志性建筑的上海铁路南站是国家重点工程,是上海铁路枢纽的南大门,也是上海市重要的对外交通枢纽和市内换乘枢纽,对促进“长三角”地区的经济和社会发展有着十分重要的意义。上海铁路南站工程包括站屋工程、广场工程、客运车场、机务段、客技站、沪杭线区间改造、邮政转运站及市政配套工程。上海铁路南站站屋及广场工程位于沪闵路以南,石龙路以北,规划中桂林路以东,柳州路以西,总规划面积为 60.32hm^2 。站屋工程主要由主站房、行包房、售票房组成,并充分考虑了站屋与轨道交通、公交枢纽站、长途汽车站、近郊汽车站、出租车以及步行等其他交通方式的相互连接,使之成为综合性大型交通枢纽。

上海铁路南站工程的重要性决定了其上海 21 世纪标志性建筑的定位。富有个性、形象强烈的建筑形态与城市环境的和谐共生,赋予其夺目的形象和长久的生命力,形成一个抽象意义上的“车轮滚滚,与时俱进”的建筑形态,巨大的圆形屋盖结构由 2 列钢柱支撑,18 组“人”字形钢架体现出建筑的力度和美感。

在设计理念上,本着“以人为本”的原则,努力将上海铁路南站建设成为与城市规划相协调,满足功能需求、适度超前,讲究效益,体现当今国际先进水平的现代化的铁路客站;充分体现上海铁路南站作为上海市重要的对外交通枢纽和市内换乘枢纽的特点,从功能上最大限度地方便旅客,以实现快速疏散,“以流为主”,解决好地铁、轻轨、城市公交、高速高架道路等与客站之间的联系,使其相互间有机联系,融为一体;充分展现上海铁路南站作为上海城市陆上门户的标志性形象,注重环境意识,合理布置广场空间,提高景观效果。

上海铁路南站站屋工程建筑面积为 56718m^2 ,高架站屋主体檐口高度 24.4m ,中心制高点高度 42.7m (距基本站台),站屋最高聚集人数按 6000 人考虑,上海南站近期办理旅客列车 46 对,其中市郊列车 10 对;远期办理旅客列车 63 对,其中市郊列车 12 对。主站屋采用南北贯通、高进低出的高架候车的布置方式,9.900m 标高的环形出发平台,南北下沉广场的到达旅客上客区,以及其他交通设施的布置,为旅客提供了最便利的换乘条件。

主站屋所有公共区域均考虑残疾人通行设施。工程耐火等级为一级。在环保设计上,站屋污水合流经广场排入城市污水管网,主体站屋钢结构屋盖内侧设多孔铝合金板吸声吊顶,降低大空间噪声,主站屋的绿化环境设计采用集中式大面积绿化的手法,在南北广场分设坡形绿化广场,以草坪为主,乔木、灌木相结合,空间层次丰富。垃圾收集采用定点收集方式,定时清运至行车工程垃圾处理站。主站屋外围护主要采用低反射中空玻璃,屋盖采用双层聚碳酸酯玻璃和金属遮阳网片,充分利用自然光。9.900m 标高以下部位主要采用清水混凝土材料,达到粗犷、稳固的视觉效果,9.900m 标高以上部位采用高技术玻璃、新型屋面材料、连接精密的钢结构体系、铝合金遮阳系统,通过材料虚实对比、表

面质感及色彩的变幻,取得精致细腻的外观效果。整体建筑形象气势磅礴,具有极强的视觉冲击力和标志性特征。

在结构设计上,屋顶部分为中心带内压环的大跨度钢结构屋面,环绕主站屋的环通车道与主体结构连成整体。结构的设计使用年限为100年。工程设防烈度为7度,地震影响接近震考虑,场地土类别为IV类,建筑主站屋框架及剪力墙的抗震等级均为二级。由于工程铁路线、地铁及轻轨纵横交叉,为了达到支撑钢屋盖的柱子呈环向等距布置的要求来体现建筑师的设计意图,在标高9.900m平台上设置转换大梁,用以支撑上部钢屋盖传来的柱子荷重,由于转换梁高度对下月台的楼梯的通行净高有影响,考虑转换大梁及周边环梁均采用有粘结预应力宽扁梁,为增加转换梁的刚度,转换梁的截面采用工字型,而环向大梁与径向连系梁的空隙用于风管及水电管的穿行。为减小站台上柱子的尺寸,增加结构的延性,柱子考虑采用内置钢管混凝土。环绕主站屋的环通车道与9.900m标高平台结构连成整体,但主体结构与外围高架道路均设缝断开。为尽量减小9.900m标高平台结构的侧移,减小对上部钢屋盖受力的影响,在底层适当位置布置剪力墙体。考虑留设8条施工后浇带以减小混凝土的收缩应力,同时在进行9.900m标高结构的计算中,考虑了 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 温度的影响。7.500m标高与9.900m标高的联系坡道及候车平台四周的月牙形扭面均采用钢结构。

站屋屋面外形中部呈圆锥形,而外周悬挑部分则略为上翘,整个屋面结构由18根Y形主梁支撑,而主梁又支撑在内外两圈柱子之上,主梁最内端支撑在直径为26m的中心内压环上。主梁平面形状为Y形,截面形式为变截面的橄榄形,内柱以内部分增设拉杆和腹杆成为桁架,此种形式不仅增加了主梁的刚度,而且可防止在不对称荷载作用下内压环的摆动。主梁橄榄形截面的上下弦为 $250\text{mm} \times 250\text{mm} \times 25\text{mm}$ 的方管,梁外壁钢板厚度为10mm,每隔3m设置T形内加劲肋。环向檩条的下弦从主梁截面中穿过。

内柱共有18根,直径为800mm,外柱共有36根,直径为1000mm,为保证整个结构体系的稳定,柱脚均考虑采用刚性柱脚。主梁支撑在柱顶Y形的钢铸件支座之上,沿主梁轴向的支座形式为铰支座。屋顶中心内压环:主梁的顶端支撑在中心内压环上,中心内压环为设有斜杆的三角形桁架,其刚度足以承受主梁传来的压力。

为增加内环的刚度,减少柱底弯矩,除屋面布置有环向檩条外,在内环柱顶设置了大直径钢棒以承受环向拉力,外环则结合排水沟的设计,布置了环向桁架,此外为防止外环沿环向的扭转,每根外柱均设置了两根固定拉杆,同时在内外柱之间及内环与中心环之间也布置有拉索,以进一步增加内外环的抗扭能力。为减小屋面外挑部分在竖向荷载作用下的变形,沿屋盖结构四周也设置了拉力环带。

站屋内采用真空卫生排水系统,系国内外大面积采用。屋面采用虹吸排水系统。

工程用电负荷等级为一级负荷。在人员较集中的场所设置EPS集中供电式应急照明电源箱,作为应急照明备用电源,供主站屋疏散、诱导照明用电。工程一级负荷由二路电源同时供电,末端自切。

主站屋、行包房及内部用房均设置集中空调系统,且各自具有独立的冷热源。

主站屋广厅及普通旅客候车厅区域的高大空间采用自然排烟方式。火灾发生时,由消防控制中心发出信号,电动开启设置在屋顶的自然排烟窗进行排烟。排烟窗面积共 390m^2 ,约占广厅和普通旅客候车厅地面面积之和的1.5%。

弱电系统主要有：综合布线系统（GCS）、电话通信系统（CNS）、计算机网络系统（OAS）、有线电视系统（CATV）、安保系统、客运及应急广播系统、时钟系统、旅客引导显示系统、旅客信息查询系统、集成管理系统。

上海铁路南客站是项规模庞大的系统工程，其结构与铁路南站、地铁一号线、轨道交通明珠线及轻轨 L1 线的结构相接，在平面及空间上相互重叠，地下、地面交通可相互换乘，因此也形成了地铁站、轻轨站与南客站同步施工的特点。工程实施中，采取南北分块施工，缩短施工工期。

本书对上海铁路南站工程中的软土特长平行相邻基坑、预留土堤相邻基坑、风洞试验、超长大跨预应力环梁、房屋盖抗震性能、钢结构抗火、消防评估、钢结构铸钢节点试验、主站房钢结构吊装、屋面钢结构预应力张拉、阳光板屋面系统和无柱雨棚钢结构铸钢件等十二项重大工程技术的试验及仿真研究做了全面总结与整理。这些成果是上海铁路局、同济大学、华东建筑设计研究院有限公司、铁道第四勘察设计院、上海建工（集团）总公司、上海第七建筑工程有限公司、上海建工机械施工股份有限公司、江南重工股份有限公司、中铁二十四局集团有限公司、中铁四局集团有限公司、珠海市晶艺玻璃工程有限公司等所有参与上海铁路南站工程建设者的辛勤劳动与智慧结晶。

本书由陈东杰、王美华、钱培编著，傅钦华、程学东、韩志伟、朱世镇、夏阳、方继、杨磊、张云鹤、陆成、胡莲花、臧伟林、潘忠庆、袁斌、吴玉勇等参编，感谢赵翠书、黄鼎业、李国强、徐伟、罗忆、罗永峰、吴欣之、蒋首超、顾明、陈以一、赵勇等对上海铁路南站工程建设所做的贡献以及对重大工程技术研究所给予的支持和帮助。由于全书涉及内容较广，错误和不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 特长平行相邻基坑施工技术研究	1
第一节 概述	1
第二节 工程概况及工艺特点	4
第三节 相邻基坑平行开挖有限元分析	6
第四节 相邻基坑开挖实现及监测分析	28
第二章 预留土堤相邻基坑施工技术研究	37
第一节 工程概况及工艺特点	37
第二节 预留土堤相邻基坑开挖有限元分析	40
第三节 相邻基坑预留土堤开挖实现及监测分析	48
第四节 本章小结	59
第三章 主站房风洞试验研究	60
第一节 概述	60
第二节 风洞试验	60
第三节 屋盖结构风致响应分析	106
第四章 超长跨预应力环梁受力特性及施工工艺研究	116
第一节 空间曲线筋摩擦和锚固预应力损失计算	116
第二节 摩擦损失测试及摩擦系数反演	123
第三节 主站房环梁部分有限元分析	129
第四节 超长混凝土框架梁的温度收缩裂缝分析和控制	155
第五节 超长预应力混凝土框架梁的布索方案	162
第六节 结论及建议	168
第五章 主站房屋盖抗震性能研究	170
第一节 绪论	170
第二节 研究内容与模型	173
第三节 大跨新型钢屋盖结构的动力特性研究	174
第四节 大跨新型钢屋盖结构的时程分析	180
第六章 主站房钢结构抗火验算研究	202
第一节 主要工作及验算依据	202

第二节	火灾场景	202
第三节	屋面钢构件温度计算	204
第四节	结构反应分析	205
第五节	分析结果	207
第六节	结论与建议	222
第七章	主站屋消防仿真分析	223
第一节	评估内容及目标	223
第二节	评估方法	223
第三节	火灾场景	227
第四节	上海铁路南站的 CFD 模型	234
第五节	CFD 模拟结果	236
第六节	CFD 模拟结果讨论	247
第七节	紧急疏散	248
第八节	屋面钢架结构的评估	250
第九节	建议	250
第十节	结论	251
第八章	主站房铸钢节点试验研究	253
第一节	工程概况与试验目的	253
第二节	试验方案	256
第三节	材性试验	264
第四节	主要试验测试结果	265
第五节	有限元分析与试验结果的对比	276
第六节	结论	285
第九章	主站房钢结构吊装施工技术研究	286
第一节	概述	286
第二节	施工工艺	290
第三节	测量校正	299
第四节	焊接工艺	301
第五节	质量措施	304
第六节	安全技术措施	305
第七节	安全用电措施	307
第十章	屋面钢结构预应力张拉技术研究	308
第一节	屋面钢结构体系	308
第二节	施工方案	311
第三节	分析验算	312

第四节	方案分析	313
第五节	方案比较	361
第六节	结论与建议	366
第十一章	车站无柱雨棚铸钢节点试验研究	367
第一节	概况	367
第二节	试验设计	369
第三节	试验结果	375
第十二章	阳光板屋面系统研究	381
第一节	前言	381
第二节	工程概况	382
第三节	阳光板屋面系统力学性能分析	385
第四节	试验研究	387
第五节	结论	389
参考文献		390
上海铁路南站建设大事记		393

第一章 特长平行相邻基坑施工技术研究

第一节 概 述

一、上海南站地下工程组成

上海铁路南站是上海市 21 世纪标志性建筑,是上海市重要的对外交通枢纽和市内换乘枢纽,工程建筑设计理念超前,“以人为本”的设计理念将地铁、轻轨、城市公交、高速高架道路等与客站相互间有机联系,融为一体。整个工程占地 60.03hm^2 ,包括主站房及南北广场等在内的地下工程的建筑面积 20 多万 m^2 。其中,圆形主站屋直径 270m,地下汇集了地铁 R1 线车站(以下简称 R1 线)、地铁明珠线车站(以下简称 M3 线)、轻轨 L1 线车站(以下简称 L1 线)、行包邮政联系地道(以下简称联系地道)、主站屋设备地道、旅客出站地道、南北广场联系地道、行包地道及邮政地道等地下结构(图 1-1-1),共划分为 6 个开挖区域,其中 4 个区域在主站房下。上海南站相邻地下工程施工主要采用二

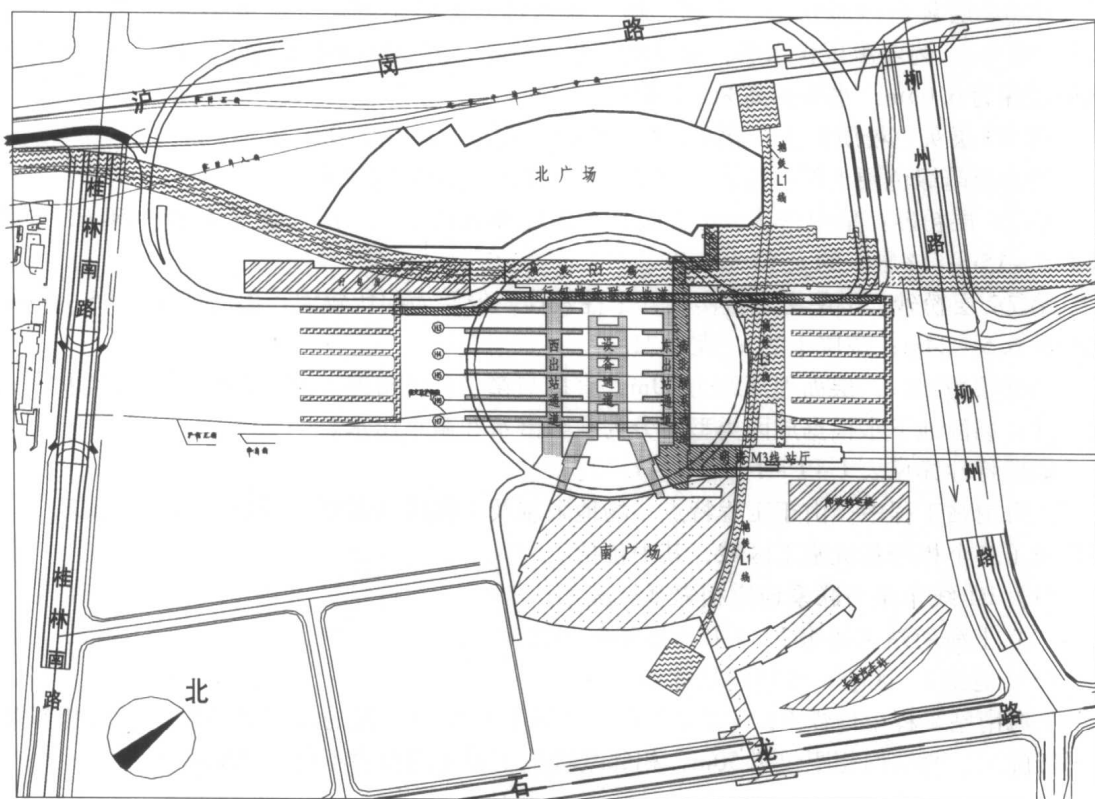


图 1-1-1 上海南站地下工程构成

种方式进行：一种是在1区内的以R1线车站与联系地道为代表的特长相邻基坑平行施工形式，另一种是在2区、3区内采取的预留土堤相邻基坑施工。相邻基坑施工直接影响着上海南站整个工程的安全、质量、工期和成本。本章主要讨论特长平行相邻基坑施工技术。

二、工程地质情况

工程所在地区广泛分布第四系全新统（ Q_4 ）软土层，为典型的海相软土层，具有高含水量、高孔隙比、低强度等特点，地震基本烈度为7度。

场地处于古河道分布区，地层变化情况复杂，具有缺失第⑥层暗绿色硬土层、第⑤层厚度较大且土性变化较大、第⑦层埋藏较深且标高变化较大的特点。工程区域现状地势平坦，地面标高一般为4.400~4.600m（取平均值4.500）。各土层主要分布如下：

第①层杂填土：含少量碎石，松散，下部含植物根茎；层厚0.7~4.5m。

第②层褐黄色粉质黏土：可~软塑，局部为黏土；层厚0.6~2.8m。

第③层灰色淤泥质粉质黏土：流塑，土质不均匀，高压缩性；层厚1.2~7.2m。

第④层灰色淤泥质黏土：流塑，局部含云母和薄砂层；层厚6.0~11.5m。

第⑤1层灰色粉质黏土：软塑，夹少量片层砂，局部为粉土，高压缩性、高灵敏度；层厚2.0~6.9m。

第⑤2层灰色砂质粉土：中密，湿，含云母，土质不均匀，局部夹少量黏片；层厚2.5~10.0m。为弱承压含水层，水位动态相对稳定，经场地降水头注水试验测定，其稳定水位埋深为6.05m，水头标高为-1.65m。

第⑤3层灰色粉质黏土：软塑，高压缩性；层厚0.7~23.0m。

第⑥层暗绿色硬土层：受古河道切割和沉积环境的影响缺失。

第⑦1层粉砂：呈中密状，土性较佳，但层面起伏较大；层面埋深为30~50m，厚度为2.5~15m；该层土的 p_c 值为9.72。

第⑦2层粉砂：呈中密~密实状，土性较佳，但层面起伏较大；层面埋深为45~60m，厚度为6.5~24m；该层土的 p_c 值为21.37。

第⑨层粉细砂：层面埋深约为70m，直接与第⑦2层相连，该层厚大且呈密实状，土层较佳；场区地下水根据成因类型可分为孔隙潜水和微承压水。

地层特性详见表1-1-1、图1-1-2。

上海南站工程中，由于工程特点、场地限制及工程进展需要，圆形主站房区域地下工程形成了多个相邻基坑施工区域，其中包括：

- (1) R1线车站与联系地道相邻基坑施工；
- (2) 上海南站主站房2、3及4区相邻基坑施工；
- (3) 地铁L1区间3区相邻基坑施工。

上海南站工程中地铁R1线车站与行包邮政联系地道工程的施工是典型的特长相邻基坑平行施工，两结构相距仅7.50m，相邻基坑施工相互间有着不可忽视的影响。

地层特性表

表 1-1-1

土层层号	土层名称	层 厚 (m)	层底标高 (m)	颜色	湿度	状态	密实度	压缩性	土层描述
①1	杂填土	0.80 ~ 1.74 14.60	3.59 ~ 2.68 -10.22	杂 ~ 黄	很湿		松散		夹煤渣、石块及混凝土块等杂物，下部以黏土为主
①2	浜土	1.50 ~ 2.06 2.60	1.29 ~ 0.74 0.10	黑色	饱和	流塑			含多量黑色有机质，夹碎石、煤屑等杂物
②	黏土	0.50 ~ 1.62 2.40	1.95 ~ 1.17 0.52	褐黄 ~ 灰黄	湿 ~ 很湿	可塑 ~ 软塑		中等	含氯化铁及铁锰质结核。随深度增加土质变软，局部为粉质黏土
③	淤泥质粉质黏土	1.20 ~ 2.3 3.70	-0.14 ~ -1.19 -2.33	灰	饱和	流塑		高等	含云母、夹薄层粉砂，局部夹砂质粉土团块
④	淤泥质黏土	1.90 ~ 10.35 12.00	-10.88 ~ -11.7 -12.64	灰	饱中	流塑		高等	含云母、夹薄层粉砂，底部夹贝壳碎屑
⑤1	黏土夹黏质粉土	2.30 ~ 3.61 4.30	-14.36 ~ -15.32 -16.19	褐灰	很湿	软塑		高等	含云母、腐植质，黏土与黏质粉土量互层状分布
⑤2	砂质粉土	5.50 ~ 7.20 8.30	-21.18 ~ -22.5 -23.89	灰 ~ 青灰	饱和		稍密 ~ 中密	中等	含云母、腐植质，夹薄层黏性土
⑤3	粉质黏土	0.60 ~ 14.78 24.70	-22.58 ~ -37.5 -47.33	褐灰	湿	软塑 ~ 可塑		中等	含云母、有机质，偶见钙质结核；夹薄层粉砂及粉砂团块，土质不均
⑥	粉质黏土	1.40 ~ 2.72 4.00	-24.18 ~ -26.04 -29.07	暗绿	湿 ~ 稍湿	可塑 ~ 硬塑		中等	含氯化铁及铁锰质斑点
⑦1-1	砂质黏土	1.20 ~ 3.27 9.00	-28.14 ~ -39.9 -48.73	灰绿 ~ 草黄	饱和		中密 ~ 密实	中等	含云母、氯化铁，局部夹黏性土
⑦1 夹	粉质黏土 夹砂质粉土	0.90 ~ 2.70 5.70	-31.38 ~ -42.7 -50.04	草黄 ~ 褐灰	湿 ~ 稍湿	可塑		中等	含云母、氯化铁条纹，局部夹砂质粉土
⑦1-2	粉砂	1.70 ~ 5.61 10.90	-35.45 ~ -47.3 -56.64	草黄 ~ 青灰	饱和		中密 ~ 密实	中等	含云母、氯化铁，局部夹多量粉性土。局部（如 C31）静态 p_s 值较小
⑦2	粉细砂	8.50 ~ 17.68 29.00	-63.85 ~ -64.7 -65.80	草黄 ~ 青灰	饱和		密实	中 ~ 低等	含云母、氯化铁条纹，颗粒以长石、石英为主
⑨1	粉细砂	6.00 ~ 6.74 8.00	-70.89 ~ -71.5 -72.30	青灰	饱和		密实	中 ~ 低等	含云母，夹薄层黏性土及粉质黏土
⑨2	粉细砂	未钻穿	未钻穿	青灰	饱和		密实	中 ~ 低等	含云母，夹中砂。9 孔夹粉质黏土透镜体

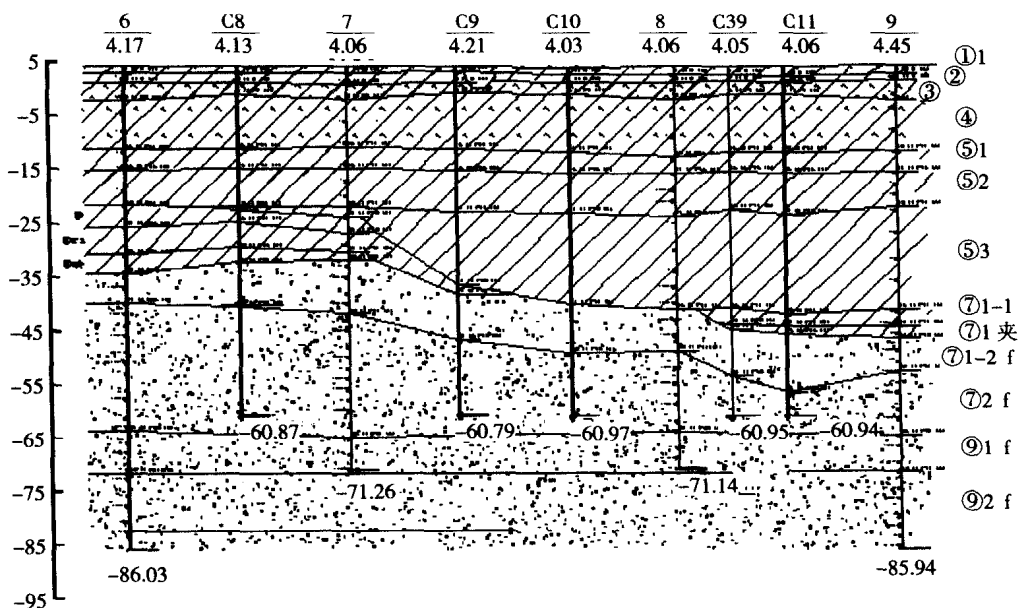


图 1-1-2 上海南站典型地质剖面

第二节 工程概况及工艺特点

一、工程概况

R1 线上海南站站改建工程改建线路总长约 2.08km。改建后的 R1 线上海南站位于距原站址以南约 200m 处、上海南站主站屋北端下，地下二层三跨箱型框架结构，采用明挖顺做法施工，基坑标准段宽度约 23m，基坑长度约 274m，标准段挖深 14.42m，设四道 $\phi 609 \times 16$ 钢管支撑。基坑深度为 14 ~ 15m，围护结构采用 0.8m 厚地墙，内衬采用 400mm 厚钢筋混凝土墙。

联系地道与 R1 线围护结构的南侧相距 7.50m（图 1-2-1），R1 线结构北侧就是北广场地下结构。联系地道从主站屋西侧的行包房起进入主站屋向东穿行，渐渐由浅入深，并从东侧 L1 线站厅结构的底下横穿而过，之后折而向南穿过铁路线由石龙路一侧出地面，全长约 435.4m，由于穿越 L1 线站厅结构，挖深最深处在 15.86m，其余挖深在 5.2 ~ 10.77 ~ 15.86m，其中：

GDK1 + 145.755 ~ GDK1 + 017.200	挖深 5.2 ~ 10.77m
GDK1 + 017.200 ~ GDK0 + 887.000	挖深 10.77 ~ 11.05m
GDK0 + 887.000 ~ L1 线中心	挖深 11.05 ~ 15.86m
L1 线中心 ~ GDK0 + 758.500	挖深 15.86 ~ 10.52m
GDK0 + 758.500 ~ GDK0 + 706.275	挖深 10.52 ~ 5.2m

工程地面相对标高为 -2.030m（相对标高）。联系地道围护根据不同挖深，分别采用地下连续墙与 $\phi 850$ SMW 工法桩形式（表 1-2-1）。其中地下连续墙 800mm 厚，混凝土为水下 C30，抗渗 P8；墙顶标高为 +0.530m、+4.50m 和 -2.724m，墙底标高为 -16.000 ~ -21.500m。SMW 工法桩 H 型钢规格为 700mm $\times$ 300mm $\times$ 13mm $\times$ 24mm，桩长

为 21m，间距 1200mm，坑内地基加固采用深层搅拌桩和高压旋喷桩相结合的形式。坑内采用轻型井点及深井进行坑内降水。

联系地道各段围护情况

表 1-2-1

分段	里 程	围护形式	围护长度/m	围护顶标高/m	支撑数量	支撑位置
1	GDK1 + 145.155 ~ GDK1 + 112.300	SMW 工法桩	32.855	-2.030	1	第一道离围护顶 500mm、1500mm
2	GDK1 + 112.300 ~ GDK1 + 059.230	SMW 工法桩	53.070	-2.030	2	第一道离围护顶 1200mm 第二道离底板面 1800mm
3	GDK1 + 059.230 ~ GDK1 + 47.650	SMW 工法桩	11.580	-6.300	1	第一道离围护顶 450mm
4	GDK1 + 47.650 ~ GDK1 + 17.200	SMW 工法桩	30.450	-6.300	2	第一道离围护顶 450mm 第二道离底板面 1800mm
5	GDK0 + 17.200 ~ GDK0 + 884.485	SMW 工法桩	132.715	-6.300	2	第一道离围护顶 450mm 第二道离底板面 2500mm
6	GDK0 + 884.485 ~ GDK0758.500	地连墙	125.985	-2.03 -6.30 -9.254	2~4	第一道离围护顶 1000mm 第二道离底板面 2500mm 第三道由第二道向上 4000mm
7	GDK0758.500 ~ GDK706.845	SMW 工法桩	51.655	-2.03	2~3	第一道离围护顶 1000mm 第二道离底板面 2500mm

整个联系地道以 L1 线车站为界划分为三个施工段，L1 线车站以西为第一段，L1 线车站站内为第二段，L1 线车站以东为第三段。施工结合 R1 线及 L1 线工程整体考虑：先做好联系地道围护及基底加固，然后进行大开挖至 -6.300m 标高，再进行联系地道开挖，开挖随 R1 线结构由西向东推进。

R1 线车站与行包联系地道形成相邻基坑施工，如图 1-2-1、图 1-2-2 所示。

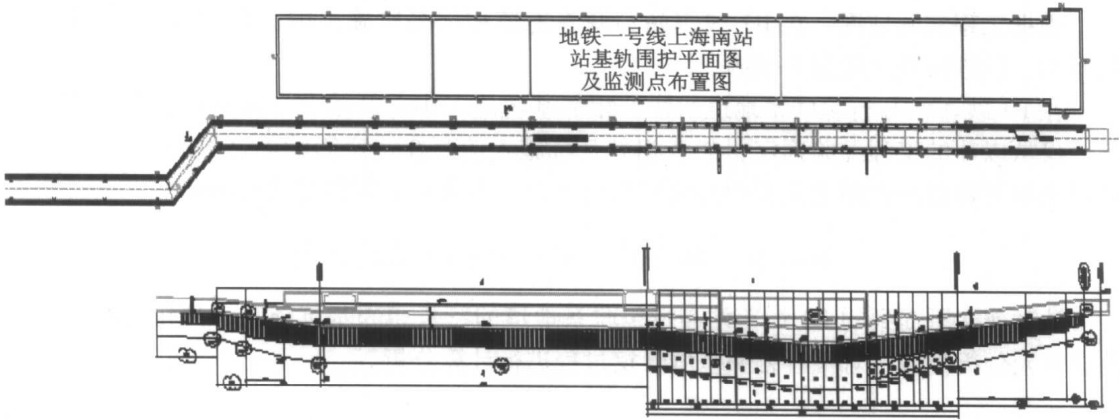


图 1-2-1 R1 线车站与联系地道特长基坑平行相邻

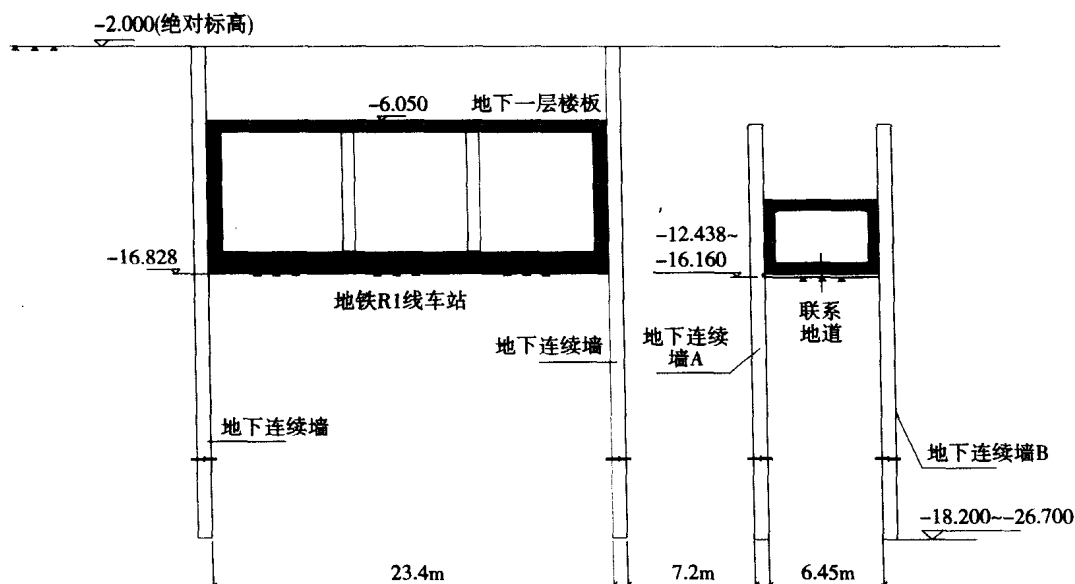


图 1-2-2 R1 线车站与联系地道基坑相邻关系剖面

二、工艺特点

从上述工程情况可以看出，R1 线车站与联系地道形成特长相邻基坑施工。其主要施工工艺特点如下：

(一) 每个基坑都比较长

R1 线改建工程线路总长约 2.08km，改建的车站部分基坑长度 274m，行包联系通道全长约 435.4m，此外，相邻二基坑都有一定深度，二者最大开挖深度都超过 15m。

(二) 二个基坑相邻很近

行包联系地道与 R1 线围护结构的外侧相距仅 7.50m，而开挖深度是邻近距离的 2 倍。

(三) 在施工顺序

根据工程实际情况，在 R1 线车站与联系地道相邻基坑施工中，先进行 R1 线车站基坑开挖，后进行联系地道基坑施工。

在 R1 线车站与行包联系地道的特长相邻基坑施工中，开挖有一定深度，相邻距离很近，仅从以往的工程经验判定，二者相邻基坑施工应存在一定影响。这种影响程度如何，以及采取何种措施控制是工程中必须解决的问题。本文在后面将对此做出介绍。

第三节 相邻基坑平行开挖有限元分析

针对前文所提到的 R1 线车站与行包联系地道的特长相邻基坑施工，简化出有代表性的有限元分析模型，对平行相邻基坑开挖过程进行计算分析。

一、相邻基坑平行开挖有限元分析模型及计算工况

(一) 有限元计算模型

沿基坑周边法线方向作一竖向剖面，取相邻基坑的围护壁结构、支撑、相邻基坑间的

土体及开挖影响范围内的土体为研究对象，该问题属于典型的平面应变问题，模型简化过程中考虑了对称性，取半结构进行分析，水平支撑按刚度等效的原则简化。

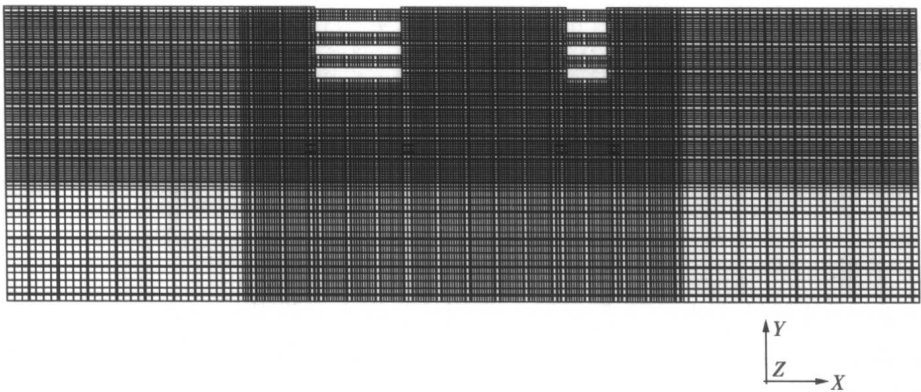


图 1-3-1 有限元计算网格

图 1-3-1 为有限元网格划分情况。网格划分上主要采用任意四边形单元（Arbitrary Quadrilateral Plane-strain），局部划分采用三角形单元（Plane Strain Triangle）以适应划分情况，单元均采用双线性内插函数，采用四个高斯积分点形成刚度。对于混凝土与土体接触问题，采用特殊单元（Special Element）- 摩擦及接触单元（Friction and Gap Link Element）模型。任意四边形单元有较高的精度，形状任意，容易适应复杂的边界条件。

计算范围与边界条件：水平范围取地下连续墙外侧 62m，即 $4h_0$ ，垂直计算范围取开挖面下 46.50m，即 $3h_0$ ，垂直断面上施加水平不动边界，水平断面上施加竖向不动边界。

材料模型与参数：综合考虑地质资料及有关试验材料，并结合上海地区岩土工程经验以后，计算中将土层划分为三层，工程地质材料计算参数取值见表 1-3-1。

土层力学参数					表 1-3-1	
土 层	弹性模量 (kPa)	泊松比	重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^\circ$)	层厚 (m)
浅层粉质黏土	3000	0.4	18.5	11	10.5	9.3
粉质黏土夹砂质粉土	6000	0.38	18.5	8	20	10.7
粉细砂	8000	0.35	19	5	32	20

地下连续墙围护壁结构采用弹性模型，地下连续墙和支撑弹性模量均取 $3 \times 10^7 \text{ kPa}$ ，泊松比 0.2。土体分析采用总应力法，岩土材料取 Drucker-Prager 模型，采用广义 von Mises 屈服条件：

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \frac{\sigma}{\sqrt{3}} = 0$$