

五、工程实例

(一)用盖挖逆筑法修建布鲁塞尔地铁米蒂(Midi)车站的设计与施工

1. 概况

布鲁塞尔地铁米蒂(Midi)车站长 150m, 宽 28m, 底板下缘标高为 - 22. 0m。该车站分三层: 第 - 层的功能为: 用楼梯、电梯与铁路车站相通有一个出入口通向米蒂塔的底部; 通向三条街道各有 - 个出入口。第二、第三层采用中央站台和侧式站台以及 - 级楼梯、电梯组成地铁换乘站, 实现站上换车。

既有的铁路高架桥是架在四排钢筋混凝土柱上的型钢混凝土梁。柱基为承台下的桩基, 桩打到地下 10m。车站结构的施工考虑了顶托中央两排柱的特点, 应避免对铁路高架桥的任何损害, 并且应使不均匀沉降减至最小, 保证即有轨道和道岔的正常使用。施工技术和步骤应保证列车的正常运行, 不影响米蒂车站的正常工作。

车站位置的地质情况: 地面以下 - 4. 00m 为回填土, 由砂、粉土和石块组成; 其下至 - 16. 50 ~ - 18. 00m 为冲积层, 由粘土、粉土和石英砂组成; 以下至 - 40. 00 ~ - 42. 00m 为灰粘土、薄层细砂; 再下面是非常致密的砂, 夹有粘土; 深达 - 70. 00m 为基岩。

2. 车站工程

车站工程包括以下内容:

- 连续墙(边墙);
- 用沉柱法(Sunkencol umns method)使型钢柱就位;
- 顶板由两跨预应力混凝土梁组成, 它支承在边墙和中间柱上, 顶板上覆盖薄板。
- 中间层楼板由两块钢筋混凝土板组成, 它由边墙和中间柱支承;
- 钢筋混凝土底板, 以重量来平衡浮力。

3. 技术方案

地铁车站采用“布鲁塞尔法”(即盖挖逆筑法)完成:

- (1)建立地下连续墙(边墙)和中间柱;
 - (2)施作顶板, 它支承铁路桥的两个中央支柱;
 - (3)挖土到中间层楼板标高, 灌注钢筋混凝土楼板。土方挖到最后 - 层时, 需设由站台所提供的中间支撑。
- 在建立南边墙时, 承台下的 - 排斜桩被撤除。为避免既有结构的失稳, 换桩时放置液压千斤顶。

4. 连续墙和中间柱

考虑到土壤的不均匀性、基底土薄、车站深等特点, 连续墙埋深达 32m, 到达粘土不透水层。连续墙受铁路桥列车、土压、水压的作用, 取厚度 1. 5m。中间柱沉放到孔中, 未用膨润土泥浆。中间柱作为中间层楼板的中央支承点, 直到框架结构完成。中间柱由深达地下 40m 的柱基支承着。

连续墙起三个作用:

- (1)由于它埋入不透水的粘土层, 形成一个封闭的沉井, 能保护周围结构下面的地下水位不致受施工影响。
- (2)它承受施工荷载, 特别是在框架结构形成之前。
- (3)它作为框架结构和顶托结构的挡墙那样工作。

铁路桥的存在对连续墙和中间柱的施工产生的问题:

- 由于桥梁柱脚非常接近开挖的槽壁, 桥梁有下沉的危险, 会影响铁路的正常运营。
- 由于桥下的自由空间小和桥柱的密布, 使施工受到限制。

5. 冻结技术

由于连续墙施工采用的膨润土泥浆对槽壁土壤因开挖引起的破裂不能提供足够的防护, 而且开挖连续墙沟槽会使土壤减压使周围结构产生沉降, 为此采用冻结土壤的方法来解决这 - 问题。

采用冻结土壤的技术, 可以达到下述目的:

- (1)开挖期间冰墙把附近的桥基荷载传到基坑的基底中去。
- (2)利用上述的荷载传递以及形成的冰拱(ice arch), 来减少沟壁土压。
- (3)保护土壤内部结构, 避免土壤减压失稳。
- (4)阻止任何可能出现的移动。

同时采用连续墙和冻结两项技术, 是全新的技术, 会带来 - 些困难。这是两个互相矛盾的标准的协调; 冰墙要尽可能紧靠连续墙, 为实现其稳定作用, 但这种布置对开挖沟槽造成明显的危险。

掌握冻结的传播情况相当困难。事实上, 即使冻结作业停止, 但冻结还将随时间继续扩散。这可以用冻结土的热梯度来解释——冻结土的近区总比远区冷。在连续墙位置的两侧构筑冻结墙时, 掌握冻结的传播更为困难。因此冰的形成作为冻结速度函数, 应与连续墙的施工保持协调。

在施工之前做过 - 系列现场试验, 以确定冻结土的特点, 以及形成具有必要的力学性质的冰墙所需时间。当冰墙形成时, 把热电偶放到沉桩的最深处监测冻结情况。

为减少连续墙坍塌的危险，墙的节段单元长度定为 3m，这样在小距离范围内冰墙能抗住因开挖连续墙引起土的运动所产生的压力。

然而在沉放中间柱时并未采用冻结技术，这是因为：- 是开挖量小，二是它与桥基呈直角，这种布置是有利的监测铁路桥的情况表明，冻结达到目的。尽管工作很谨慎，仍发生几毫米的沉降，但这对铁路运营不产生有害影响。

6. 降低作业的标高

在桥下进行连续墙和中间柱的施工自由空间有限，为了获得最大的净空，把操作的标高降到埋有桥基的结构第 - 层，于是可得到自由空间高度 5.8mm，因此可采用高效挖土机械，但在桥基处仍受到限制。

由于高度限制，连续墙的钢筋笼每节的高度定为 5m，接头处采用螺纹连接。

中间柱的型钢，如同连续墙中的钢筋笼那样，也分成 5m - 节，接头处用螺栓连接，接头为平面接触。

每根型钢柱承受 1600t 最大荷载、用两上工字钢焊接在 - 起，灌注混凝土时把工字钢断面包在里面。

直到框架结构形成之前，框架是被楼层和底层的撑杆(brace)撑住的。 - 旦框架结构形成，便可使柱与撑杆分离，使柱在最后阶段立在框架底板上，整个结构对浮力具有均匀的抗力。

结构自重经中(-)柱分布到底板上，把底板上部的钢筋混凝土作成撑杆(brace)的形状，在底板下部则是不用布筋的。

7. 顶板结构

连续墙和中间柱完成后构筑顶板，顶板承受上部荷载，又把荷载传到新支承上。

对中间支承采用特殊设计，使之可能消除连续墙和中间柱的相对沉降，逐个启动柱顶的千斤顶，恢复原有高程。

由于顶板必须承受很大荷载，每个桥基荷载 1100 - 1300t。顶板由许多预应力混凝土梁(两跨)组成，它由连续墙和中间柱支承。

顶板采用预应力混凝土梁的优点是：

- 保证梁的连续，强钢索在端面形成足够压力，以消除混凝土在不同时期的任何运动。
- 减少新梁挠度。
- 梁的高度小，承受荷载大。

由于新混凝土把桥基包容在内，故桥基不再拆除。

顶板的施工步骤如下：

- (1)开挖至地面以下 2m；
- (2)在梁中预设钢筋和钢索；
- (3)立模板、灌注混凝土，把桥基包在混凝土内，将薄板覆盖在顶板(梁)上；
- (4)混凝土达到 - 定强度后，对钢索和钢筋施加预应力。

在此以后，梁能承受桥梁柱传来的荷载，此时即可拆除支托桩。

重要的是小心监视支托桩基的位移。当荷载加到连续墙和中间柱上去后，会有较多沉降，这种沉降会危及铁路作业，甚至引起列车脱轨。新支承产生沉降对正常的铁路运营来说是不允许的，为此采用强有力的千斤顶来调整既有桥基的高程，每 - 千斤顶的顶升力为 650t。两跨梁的接头是铰接的，薄板上有沉降缝，这就有可能独立地重新调整中央桥基的高度，甚至是在最后阶段也有调整的可能。

8. 中间层楼板和底板

中间层楼板和底板可在没有交通干扰的情况下在地下施工。开挖土方，用普通方法完成中间层楼板和底板。

一个经济而原始的方案是，采用第 3 层的站台混凝土结构，作为支撑(brace)承受连续墙的侧压力。

度板特别厚(2.8m)，为的是产生 - 种附加的恒载，这是保证整个结构抵抗下部的浮力以达到垂直方向所要求的平衡。

(二)上海地铁淮海路三车站采用“- 明二暗”法施工

“- 明二暗”施工法是指地下车站顶板以上部分的地下空间采用明挖施工，而顶板以下部分的站厅、站台两层则采用暗挖逆筑施工的 - 种特殊施工方法，不同于国内外常用的暗挖逆筑施工法。

1. 工程概况

淮海路地处上海繁华的商业中心地区，街道两旁建筑物林立密集，地面交通十分繁忙，行人游客拥挤。

地铁 1 号线工程在穿越淮海路中，设有常熟路、陕西南路和黄陂南路三站，其中常熟站到陕西南路站和陕西南路站到黄陂南路站间的中心距离分别为 959m 和 1385m。由于线路设计上的要求。常熟路站平面设计中其北侧呈 R3000m 的曲线形，而陕西南路站南、北两侧则均呈 R3000m 的曲线形，三车站纵向都设置了 2%。的坡度，以满足车站排水需要。车站顶部复土深度约 2.6 ~ 2.7m，有 8 ~ 9 根地下管线埋放其中。

在淮海路上进行车站施工，除了要保证其工程本身的安全、质量和进度等要求外，另外重要的是如何确保车站周围环境的安全和保持正常的生活、工作要求。由于车站外边缘离旁侧建筑物最邻近处仅有 1 ~ 2m，街面两侧建筑物大都是 40—50 年代建造的 2—3 层砖木混合结构，这给地铁车站施工带来了较为困难的工作条件。

三车站的主要尺寸列表如下。

表 12 单位：m

站名	长度	宽度	复土深度	开挖深度	结构形式
常熟路站	232	17.6/19.2	2.7	14.3/16	双层单柱框架结构
陕西南路站	218	19.6/21.2	2.6	14/16	双层双柱框架结构
黄陂南路站	223.6	19.1/20.7	2.6	13/16	双层双柱框架结构

每个地下车站都设有站厅和站台两层，站厅层作为旅客上下、集散和售检票用，其内还设有 - 些公共服务设施，站厅层和车站的四个出入口相接；站台层则为旅客候车用，并有自动扶梯(上行)和人行楼梯(下行)和站厅层相通，根据客流量的不同设置了不同宽度的站台，常熟路站、陕西南路站和黄陂南路站的站台宽度分别为 10m、12m 和 11.5m。

2. 方案的由来和形成

地铁淮海路三车站在扩初设计中原本采用明挖法施工方案，按此方案的安排，车站土建施工工期将需 2 年以上的时间，在此期间对淮海路地铁车站的地段采用半封路的方式，淮海路上的地面交通和商业活动将受到较长时间的影响。根据市政府领导的指示要求，淮海路地铁车站施工、盾构隧道施工、淮海路地下管线的敷设和路面的修复等对地面交通的封闭、影响时间要压缩在 - 年以内。市建委科技委在组织了有关施工单位和技术专家对车站的施工方案的作了研究和论证后，认为要贯彻市府会议的精神，只有采用逆筑施工才能得到保证，又为了改善敷设地下管线的工作条件，车站顶板及其以上部分宜采用明挖施工，而顶板以下的站厅、站台两层则仍采用暗挖施工，这样就最终形成了采用“- 明两暗”的逆筑施工方案。淮海路上新的路面复盖后，地铁车站暗挖施工中的土方、材料、设备和施工人员等均由设在路旁的地铁出入口内进出，而该出入口的平面尺寸和深度也从原来的设计尺寸予以扩大和延深。

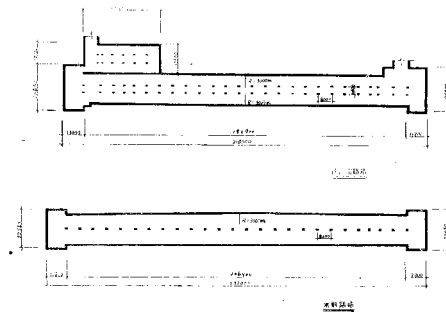


图 24 地铁车站平面图

3、车站实施方案的基本要求

3.1 工期要求

(1)1992 年春节后到 1993 年春节前(淮海路封路期间)

1992 年春节后的 8 个月时间内要创造逆筑暗挖施工的工作条件。

在此期间的最后 100 天时间，向市政部门提供进行新的地下管线敷设和路面修复的工作条件，顶板上的场地，车站施工单位不再占用。

为盾构施工(盾构吊运、推进、调头等)提供独立的车站端头井(含出入口、风井等)的场地和空间。

(2)到 1993 年年底前要完成地铁车站的全部土建工程(不含建筑装饰工程)。

3.2 在前 - 段规定期限内，为加快车站施工进度，有利于管线敷设，计划采和“- 明两暗”施工方案，但在不影响管线敷设和路面修复的前提下，可适当加大明挖施工的工程量。

3.3 车站施工中采取的各项技术措施必须对车站邻近的建筑物和管线进行保护，确保安全，尽可能减少对社会、居民的生活、工作的影响和干扰。

3.4 选用的施工方案和技术措施必须稳妥可靠，适合上海地质条件和现有的技术水平、装备以及工程现场的实现情况，充分发挥各施工单位的特长和经验。

3.5 车站施工期间，允许必要的社会车辆予以通行。

3.6 在保证工期、安全、质量的前提下，尽可能减少工程投资。

3.7 采用暗挖施工后，对原车站设计的总体布局，车站建筑、机电设备等设计布置应尽可能地少改变和少更动。

3.8 车站暗挖施工期间，淮海路下的盾构施工也将同时实施，车站端头井施工完成后要及时转让给盾构施工单位。以利进行盾构施工的前期准备工作。车站端头井设计要求做到独立成井，除车站的使用荷载外，还得考虑盾构吊运、掉头和推进所引起的各种施工荷载。

3.9 淮海路恢复地面交通后，除得到批准的个别地段外，将不允许：再在街道上进行车站暗挖施工的活动，所有施工场地和施工活动将局限在街道旁侧的出入口邻近区域内。

4、车站结构设计

根据车站实施方案的基本要求制订了车站结构设计的具体意见。

4.1 地下墙

(1)单层侧墙结构：从加快车站建设进度、节约工程投资以及对侧墙结构便于抗渗处理的角度出发，地铁淮海路三车站的地下墙不仅作为施工阶段的基坑围护结构。又是今后车站的永久性侧墙结构，其内侧将不设钢筋砼内衬墙。考虑到基坑十分贴近建

筑物以及减少地下墙接缝数量以限制接缝渗水量的综合因素，地下墙的槽宽要求不超过 $6.5i_n$ 。

(2)墙厚的决定：按设计计算，从提高基坑围护结构的刚度，阻止地下墙的水平变位和地面的沉降量，另又作为车站永久性的单层侧墙结构，墙的厚度宜选用 800mm。根据设计和工程的实践经验，要提高地下墙的刚度来限制其水平变位，较有效及经济的方法是选择好支撑系统，而增加地下墙的厚度尽管可提高地下墙的刚度，但 1000mm 厚的地下墙的费用：降比 800mm 厚的地下墙增加 200—300 万元(指每 - 个车站)。

(3)地下墙的入土深度：淮海路三地铁站的地下墙入土深度 - 般都在 $0.8H$ 以上(H 为基坑开挖深度)，要求墙脚能伸入到中压缩性的粉质粘土层(号土)中去，其中陕西南路车站的地下墙墙脚已伸入到暗绿色硬粘土层中。

当车站邻近有建筑物时，应严格控制地面沉降量，在粘土层中地下墙墙脚入土深度要满足基坑底部抗隆起安全系数 $K = 1.8-2.0$ 的要求，这样地面沉降量可控制在 30mm 内。

(4)地下墙垂直沉降量的控制：逆筑施工在基坑开挖过程中，地下墙和中间柱桩共同承担着车站顶部的全部垂直荷重(底板未发挥结构效应前)。由于地下墙底部清孔不善，多少存在着 - 些残渣淤泥量。在垂直荷重的作用下地下墙会产生 - 定的垂直沉降量，因而增加了地面沉降量；另外若地下墙和车站内的柱桩间出现了超过设计要求的沉降差就会导致顶板的开裂、渗水。为此，

在地铁淮海路三车站的每幅地下墙槽段内均设置了 2—3 根 $1" - 1\frac{1}{2}"$ 的注浆用的铁管，对槽底的淤泥残渣层进行加固，加固后残渣层的强度和压缩模量应大于原状土的指标，加固实施过程中应尽可能地减小注浆压力，防止由于过高的注浆压力而扰动槽底及其邻近处的地层。

(5)泥浆槽段的稳定：在建筑物密集地区进行地下墙施工，对泥浆槽段的稳定要给予足够重视， - 般在地下墙成槽时引起的地面沉降量大致在几个毫米范围内，然而由于施工管理不善也会引起槽段土壁的局部塌坍，引起较大的地面沉降量，因此在成槽过程中泥浆质量和液位高低应给予严格的控制。泥浆槽段的稳定可按下列公式进行验算：

$$\text{稳定系数 } N = \frac{rH - r'H'}{S} \leq 4$$

式中： r, r' ——地层和泥浆的重度(kN/m^3)

H, H' ——泥浆槽段深度和泥浆液位(m)

S ——地层的不排水抗剪强度(kN/m^2)

N 值的选取应视基坑外围地面沉降量控制程度的要求以及地下墙施工工艺的合理、有效程度而定；要注意粘性土壤的蠕变性(时间因素的影响)对 N 值的影响。

当地面以下局部深度范围(地面以下 4 ~ 5m)内含有松散、杂填土层和地下废弃管线时，更应事先予以勘测和采取必要的措施，必要时还得对该类地层进行加固处理。

(6)接缝构造：除车站端头井部分因盾构施工需要，按独立成井考虑，在地下墙内侧设置约 400mm 厚的钢筋砼内衬外，在车站的“标准段”部分利用地下墙作为永久性侧墙，不再设内衬。为改善车站侧墙防水抗渗的工作条件以及抵抗因车站纵向变形引起的剪力。在地下墙接缝内设置了接头钢板，钢板的设计要满足防水、强度和抗蚀的要求。

(7)钢筋连接器的选用；为改善侧墙和顶板、中楼板和底板间的联接效果，在地下墙钢筋笼内按设计预定的位置布设了钢筋连接器，对钢筋连接器的要求是除了满足设计强度外，更重要的是限制变形的要求。钢筋连接器的安设还能起限制地下墙和顶板的交接处因地下墙在基坑开挖中外倾出现裂缝的效果。

钢筋连接器的要求：

a、满足屈服强度 s

b、当应力达到 $0.6 s$ 时，其卸荷时的残余伸长变形 $\leq 0.1\text{mm}$ ；

c、极限强度 $1.25 s$ 。

实践证明，钢筋连接器操作方便，受力性能良好，只要用扭力扳手将钢筋的丝扣端拧紧在钢筋连接器螺母内，即能达到设计预定的受力要求。钢筋连接器要求能正确埋设在地下墙钢筋笼的预定位置，其高程误差量为 50mm。

4.2 支撑系统

地铁淮海路三车站的开挖深度都在 13-14m 左右，端头井开挖深度则在 16m 以上。按设计要求，在基坑内设置了 5 道支撑，支撑水平间距在 3—4m 左右，支撑选用 609X16 钢管，其设计承载力为 2300kN 以上。

鉴于确保支撑施工的质量(支撑及时，施工预应力值，支撑偏心量的控制)对能否限制地下墙的水平变位和控制地面沉降量是一个极其重要的施工措施，必须予以高度重视和严格执行有关规定。

(1)第一道支撑：按支撑系统的总体布置要求，一般情况下，第一道支撑应尽可能接近地面，给予及时安装，防止地下墙出现悬臂长度过大引起水平变位，从工程实践的经验来看，这对克服浅层地层的沉降，减少对环境的影响是很有效的。基坑内第一道支撑中心的高度在离地面约 1.5m 处，也有利顶板的砼施工。

(2)支撑程序，基坑开挖中，第一、二道支撑的高度范围内均进行明挖施工，第二道支撑中心离地面约 5 ~ 5.5m，第二道支撑安装就位后，就进行顶板砼施工，待顶板砼达到设计强度后即拆除第一道支撑，创造地下管线敷设和道路修复的条件，以下的工作即在暗挖条件下进行。先把第二道支撑下移到第三道支撑位置，安装好第四道支撑后即行浇注中楼板，最后安装第五道支撑，第五道支撑的设置位置 - 般宜尽量靠近坑底，然而由于车站暗挖施工中可能选用小型施工机械，必须保持 2.5m 左右的高度。

(3)钢支撑设计和实施：当基坑长度的局部范围内需要进行坑外跟踪注浆，则其设计承载能力应增大 20%左右；此外要使支撑发挥有效的支承作用，必须控制其偏心量。钢支撑自加工制作、分节拼装以及在基坑内安装实施的全过程，其累计偏心量不得超过 50mm，在支撑设计中，其断面和接头螺栓等都得计及这 - 偏心量。

(4)支撑预应力和架设：支撑预应力的施加应按设计要求进行，一般支撑的预应力值为设计轴力的 70% - 100%，支撑预应力施加后的效果表现在实测的地下墙水平变位值较接近理论计算值，另外又增大了地下墙和地层间的摩阻力，减少地下墙的垂直沉降量。

在暗挖施工中曾拟利用作为顶板、中楼板的模板支承工字钢作为支撑用，后因支撑施加预应力的困难和工时的冗长而予以放弃。

4.3 钢管桩

暗挖施工期间当底板还未浇筑时，车站上部的全部荷重将由设在柱子位置上的钢管桩和地下墙共同承担，而桩基的设计要求是仅作为施工阶段的承重结构，对车站使用阶段的荷重将不计及桩基的作用。按设计，黄陂南路站和陕西南路站的桩基将承受 6000kN 以上的荷重，而常熟路站桩基则为 4000kN 以上的荷重。

(1)桩的选型：在暗挖施工中对桩基的要求是除了满足其必要的承载能力外，还需严格控制沉降量，以减少其和地下墙间的沉降差。曾在钢管桩和钻孔灌注桩之间进行比较，尽管钢管桩在打桩会产生一定的噪音和振动，但桩基的承载力和沉降量会满足设计的预定要求(实测钢管桩的极限承载力在 11000 ~ 12000kN 间)，另外钢管桩的选用也避免了钻孔桩施工中泥浆污染的缺点。而钻孔桩根据设计要求，桩径要在 1200mm 左右，这种大口径的钻孔桩目前在上海地区还是缺乏经验和工程实例不多，且钻孔桩在受荷后其沉降量不易得到控制，因此桩基选型结果是决定选用 900mm 的钢管桩，桩的入土深度约 50 ~ 56m 不等，桩基底部已深入到粉细砂土层(号土)中。每根钢管桩由 4 根单节桩(长约 12 ~ 14m)组成，单节钢管由 8 的 A，钢板滚制焊接而成。经动态测定法测出试桩的实际承载力为设计承载力的 2 倍左右。

为减少打桩对周围环境的影响，决定采用重锤轻打的工艺，锤重选用 7.2t。经测定，地面振动加速度的影响大致在 120 ~ 150cm / s² 左右，垂直方向的影响大于水平方向的影响，在 10m 以外的环境，振动影响显著减小。

(2)钢管桩和 H 型钢柱的连接：桩基按设计要求就位后，H 型钢柱即可插入钢管桩内从地铁车站的钢管桩施工的实际情况来看，900 钢管桩内的土塞高度约为 90%左右的桩深，在清除泥土至底板下的要求深度后，在桩内将支座板焊接在预设的支承加劲肋上，H 型钢柱就座落在支承板上，周围并用砼填实。暗挖时车站中央的顶板梁、楼板梁与 H 型钢柱连接，荷载也由 H 型钢柱传递至底板下的钢管桩上。

4.4 坑内外地基加固

基坑开挖前预先在坑内或坑底以下的，一定深度范围内进行地基加固处理，无疑会减少围护结构的变位量，提高坑底稳定性以及减少地下结构物的后期沉降量。

地基加固型式的选择要根据对基坑外邻近地区构筑物保护和地面沉降量控制以及保证坑底稳定等要求予以决定。

(1)内井点降水：当基坑外围的地面沉降量允许达到 50mm 左右，且井点管又设置在水平渗透系数 $K_H = 10^{-8} \text{cm/s}$ 或粘性土夹有薄层的粉细砂的地层情况下，采用内井点降水是，一种行之有效，甚为经济的地基加固方法。内井点常采用在 400mm 以上的钢管内设置潜水泵或喷射井点。当辅以真空装置后则会取得更好的效果。为防止坑内降水对抗外水位的影响，井点的滤头布置应高于围护结构底边以上 3 ~ 4m。在基坑开挖前 10 ~ 15 天预先对地层进行排水固结，土层的抗剪强度可提高 15% ~ 30%左右。

采用暗挖逆筑施工时，内井点管最早要在底板强度达到预定要求时才能停止降水。

从工程实践的经验来看，单个内井点降水效果的影响范围视地质条件的不同，大致可在 75 ~ 100m² 范围。

(2)水泥加固：当对抗外的地面沉降量要求控制的 0.2%H 的范围内(一般地铁车站为 30mm)时，仅采用内井点降水不能满足预期要求，需要进行坑底水泥加固。为节约水泥加固的工程量，常在坑底以下的，一定深度范围内进行抽条加固，土壤经水泥加固后其静力触探强度 $P_2 \geq 1.5 \text{MPa}$ 。抽条加固的做法是在地准地下墙接缝中心位置布置 3m×4m(宽×高)的加固条撑。坑内进行水泥地基加固的方法众多，有分层注浆、劈裂注浆和深层搅拌等，宜选用深层搅拌为好。淮海路地铁三车站在坑内进行地层加固方法因环境保护要求和地层条件的不同而异。

黄陂南路站北侧均为年久的 2—3 层砖木结构建筑，故沿车站全长范围内进行抽条加固。

陕西南路站地下墙墙脚深入到暗绿色硬粘土层中，故不作水泥抽条加固，仅选用内井点降水。

常熟路路西段 80m 范围内的北侧站邻处有 6 层的淮海大楼，为控制地面沉降，故在该段范围内进行水泥抽条加固，而东段的环境条件尚好，故仅选用内井点降水。

(3)值得提的是当基坑开挖中其周围地面的沉降量已临近预定的控制要求时，不给予及时处理，就会超过规定引起对周围环境的影响，这就需要进行跟踪注浆处理，在地下墙上预埋注浆管或在需要注浆时随时凿孔埋管。跟踪注浆的效应是及时向地层内进行充填注浆，抑制了当基坑继续向下开挖中地下墙进一步产生位移、变形而引起的地面沉降量。

跟踪注浆宜采用双液注浆工艺，注浆材料为水泥浆，也可掺中一些其他如粉煤灰等材料以及水玻璃，注浆点大致在离地下墙边缘 1—1.5m 处，压力宜控制在 0.2 ~ 0.3MPa 左右，当进行跟踪注浆时，应事先检查坑内支撑的安设质量，坑内钢支撑的设计承载力应提高 20%左右。

5. 工程监测

地铁淮海路三车站采用“一明二暗”施工方法在上海地区实属首次应用，不论从设计方案、施工实践等方面均缺乏经验。再加上需要对邻近环境保护的要求，应在车站施工中提供各种信息，以便及时采取措施予以改正。另外这种逆筑施工法也是今后市区深基坑施工中一个基本施工方法，需要通过目前的施工实践给予从结构设计方案、施工工艺到环境保护等技术措施方面进行总结和提高。

工程监测的主要内容：

- (1) 地下墙水平位移和垂直沉降量；
- (2) 地下墙和钢管桩间的沉降差异量；

- (3) 钢管桩的承载力及其施工时的噪音和振动的影响；
- (4) 深基坑施工中坑外周边地面和地层不同深度处的位移；
- (5) 车站纵向沉降量及坑底回弹量；
- (6) 地下墙底和结构底板下承压力的变化；
- (7) 支撑轴力；
- (8) 车站端墙的结构应力；
- (9) 其它。

(三) 淮海路地铁车站逆作法施工若干问题的研究

1、逆作法施工工艺(-明二暗)

基坑开挖有放坡开挖和支护开挖两大类，当基坑距周围建筑物、地下管线等较近时都采用支护开挖。我们这儿要介绍的逆筑法其实是 - 种盖挖法(支护开挖的 - 种形式)，即 - 明二暗。在地下连续墙施工的同时，在内部结构设计桩位处打入大口径开口钢管桩，通过 H 型钢同内部结构顶、楼板相连接降力传到钢管桩上。车站结构顶板是采用逆筑明挖法施工，当顶板浇筑完以后，随即进行上部市政管线施工和道路大修，在道路的两侧预备出入口或临时出土口，作为暗挖时运送土方，材料设备的通道。其内部结构中，底板施工是考虑逆筑暗挖，即先挖土至中楼板处，浇筑中楼板。再施工底板。由于区间隧道盾构同车站结构施工是同步进行的，所以在端头井设计时考虑了扩大端头井做盾构施：正时的进出通道。

2、钢板式止水接头

淮海路 3 座地铁车站，内部结构完成后，墙体即作为车站主体结构，不再设内衬墙。因此，车站地下连续墙标准段墙体要有防水抗渗性能。另 - 方面采用逆筑法施工，先浇筑结构顶板，然后再进行内部土方的分层开挖，地下连续墙墙体不可避免地随着开挖深度的增加而逐渐发生水平和垂直变形。怎样保持地下连续墙的整体性减少沉降，使顶板不至于由于墙体的不均匀沉降而开裂，这又要求地下连续墙接头有 - 定的抗剪能力。为此我们采用了十字钢板接头，止水钢板在开挖面以下有 - 排方孔，开挖面以上的端缘做成锯齿形，以便能和砼紧密地咬合，保证其在嵌固的基础上有 - 定的抗剪能力，增强地下连续墙的整体性。在堵板的外侧陆续放入接头箱和锁口管，把砼的侧压力传到槽壁孔端，即防止堵板跨中变形砼浇筑时绕流占据空间。又保证止水钢板和便于相邻幅的成槽施工。从几个车站止水接头的实践看来，接头形式应尽量简单，这样便于闭合幅施工时刷壁，保证其接头质量。

3、钢管桩

对于市中心打大口径的钢管桩，也是 - 项有待探索的新问题。如土塞高度、噪音、振动对周围环境的影响等。加之淮海路两侧老式建筑较多，结构及基础形式复杂多变。针对这些情况我们对土塞现象、停打标准、桩的承载力等——系列问题做了 - 些探讨。

3.1 土塞现象

为了评价开口钢管的可打入性，必须弄清开口桩内的土塞性状。由于国内大口径开口钢管桩使用的很少，所以也很缺乏这方面的资料。从有关资料关于土塞性状的研究，仅是根据同 - 直径的钢管桩做 - 些数据统计而言，不能反映桩长、沉桩加速度、土的物理力学性质、桩的直径等众多因素的影响。

3.2 沉桩速度和周围环境

影响沉桩速度的因素很多，像桩锤、桩径、壁厚、土的物理力学指标等等，事先很难估计。本着这个问题我们对三地铁车站施工大口径钢管桩做了监测，虽然加速度、位移振幅均在 - 定范围内波动，但还是有其共性。从监测资料分析看来，桩入土至 25m 时振幅最大，以后振动随桩入土深度的增加而减少。由于桩是垂直打击的，故垂直振动大于水平振动。另外我们还对沉桩挤土量对周围环境的影响作了 - 些分析，从计算机绘制的常熟路地铁车站竖向变形形图看来，开口钢管桩的挤土量是很小的，沉桩对周围土的扰动会引起周围地形的竖向变化，挤土量可看成等同于钢管桩的体积。

4、支撑系统

逆筑暗挖法施工是在顶板完成的情况下，基坑内进行的支护开挖。由于顶板的巨大刚性，其地下连续墙的水平位移比顺筑明挖法要小的多，所以对周围建筑物产生沉降的影响也要小。同时逆筑法施工是在顶板复土荷载完成的情况下进行的，其实是 - 种欠补偿式开挖。我们知道顺筑法深基坑支护开挖，其地下连续墙垂直位移的变化规律是随着基坑开挖深度的增加先回弹再沉降，而逆筑法由于上部荷载的补偿作用，其地下墙的垂直回弹和再沉降位移要小的多，基坑处于空间受力状态，稳定性也要比顺筑法好。同时由于顶、楼板同地下墙的连接采用了钢筋锥螺纹连接器，使得我们在考虑支撑系统的设计时，地下墙和楼板的接头可按刚接处理，这样我们在用有限元分析计算时，可考虑由于上部复土荷载产生的负弯矩对地下墙侧向土压产生弯矩的抵消作用，从而在地下墙设计时可以适当减少地下墙的配筋，支撑系统的设计时减少支撑的道数，达到节约投资和方便施工的目的。笔者曾对陕西南路车站的基坑支撑系统在考虑上述有利因素的情况下利用有限元法进行过分析计算，对原设计的支撑系统进行了调整。从陕西南路车站深基坑开挖的实践看来，效果相当好。

5、施工监测

由于逆筑法施工技术在国内尚无先例，因此我们想通过严密地施工监控，探求适合我国国情的施工工艺。同时我们还准备根据机构的受力机理，各阶段的变形规律来验证原结构设计，探求逆筑法的结构优化设计方案。为此我们对位移、分层沉降、土压力、钢筋计、支撑轴力等进行了全面监测。

5.1 土压力

基坑开挖前地下连续墙侧向埋设土压力为静止土压力。实测静止土压力接近 $K_0 = 1 - \sin \varphi'$ 分布。随着基坑的开挖，墙体向基坑方向产生一定的水平位移，土压力向主动土压力发展呈减少趋势，但由于逆筑施工，顶、楼的刚性较大，且支撑又施加了预应力，从土压力实测值看来变化不大，墙体的变形也较小。因此可看成是静止土压力。

5.2 地下连续墙的水平位移

根据上海地区过法深基坑开挖的经验，采用明挖顺筑法，一般基坑墙体的最大水平位移为开挖深度的 0.4% 左右。但由于实行了逆筑法施工，从我们对墙体位移的实测值看来，最大水平位移为基坑开挖深度的 0.2% 左右。而且水平位移的大部分值发生在明挖阶段，即顶板施工阶段。见图 25 其相应引起周围地表沉降以及建筑物和地下管线的变形和沉降也比顺筑法小的多。

5.3 钢筋应力

根据布置地下连续墙及开挖面上的钢筋计实测资料表明。墙体沿深度呈受弯状态，在地表下 6m 以上迎土面受拉开挖面受压。最大压应力在开挖面 5.45m 处为 -26MPa。最大拉应力在迎土面 4.5m 处为 14MPa。6m 以下开挖面受拉，迎土面受压。最大拉应力发生在开挖面 13.5m 处，为 30MPa。最大压应力在迎土面 14.5m 处，为 43MPa。

6、结论

根据淮海路地铁车站逆筑法施工的实践。量测的结果，认为：

- (1) 钢板止水接头可增加地下连续墙的整体性，但为了便于闭合幅成槽刷壁。其接头形式应尽量简单。
- (2) 开口钢管桩切土贯入时，其土芯高度建议按以下式计算：

$$l = H - \sum_{i=1}^n \frac{0.4 f_{li}}{E_{si} D} (h_i^2 - h_{i-1}^2)$$

f_{li} - 第 i 层土的摩阻力；

E_{si} - 第 i 层土的压缩模量；

D - 钢管桩内径；

H, h_i, h_{i-1} - 分别为地面到第 i 层和第 $i-1$ 层土底面的距离；

H - 钢管桩长度

- (3) 采用钢筋锚螺纹连接器，其墙板结点应按刚接考虑，对逆筑法施工来说，由于上郡复土荷载的作用，可简化基坑支撑施工工艺。

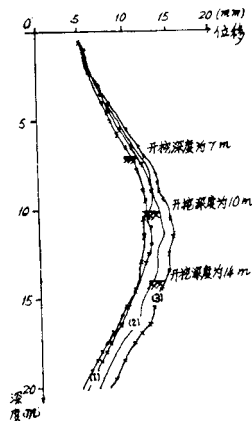


图 25 墙体水平位移

- (4) 考虑逆筑法施工工艺，地—厂连续墙设计时侧向荷载应按静止土压力进行计算。

- (5) 逆筑法施工工艺有利于对周围建筑物和地下管线的保护。

(四) 上海黄陂路地铁站逆筑法施工

1. 工程概况

上海地铁 - 号线黄陂路车站位于淮海中路、黄陂路与淡水路之间，北侧靠尚贤坊、双禾村，南侧毗邻比乐中学和宝康里。

整个车站侧墙采用地下连续墙围护结构。在标准段部分。地 F 连续墙又是今后车站的永久性侧墙结构，其内侧不设钢筋混凝土内衬墙，墙体连接采用具有一定抗剪强度的刚性防水接头(东、西端头井除外)。为了提高基坑围护结构的刚度，限止地下墙的水干变形和地面的沉降量，地下连续墙的厚度为 0.8 米。地下墙入土深度一般都在 0.8H 以上(H 为基坑开挖深度)，中要求墙脚能伸入中压缩性的粉质粘土(号土)中。

车站总长 223.8 米。其中，标准段结构长 194.7 米，宽 19.4 米，采用双层双柱三跨板梁式框架结构，顶板厚 0.7 米，站厅板中段厚 0.45 米，两侧端厚 0.4 米，底板厚 0.8 米。见图 27。

为了采用“逆筑法”施工工法，顶板和中楼板的底模施工均采用钢平台吊模施工。顶板及中楼板钢平台支承在标准段内 46 根“H”型钢柱和两侧地下连续墙上，其中钢平台浇捣入钢筋混凝土结构内，“H”型钢柱使用阶段外包钢筋混凝土结构，柱间距 8.2 米，底板采用钢筋混凝土结构。

脚基础，下有人防设施。

c. 五层楼房，该建筑原设计为三层后加盖至五层。基础底曾挖做地下人防，后采取过某些补救措施，据观察，现还在继续沉降。

d. 淮海中路东南侧，淡水路与马当路之间有 - 多层建筑，现为比乐中学，结构状况尚好。

e. 在整个逆筑施工期间，淮海路上的商业仍然照常营业，在商店门口留出 1.5 米宽道路供人行行走。

2、桩基工程施工

(1) 桩基

本车站的土建施工采用“逆筑”工法，在施工期间车站结构重量及其封顶后的附加荷载均需造钢管桩承担，因此，本工序是一道关键性工序。

沿车站中心线两侧打设两排 46 根钢管桩。钢管桩外径 = 900mm，壁厚 = 20mm，每根长 60 米，分四节，每节 15 米，钢管桩接头采用半自动焊接。在距钢管桩顶部 18.5 米处，焊接支承牛腿和环形支承板以供“H”型钢柱安装。每根桩承受 600 吨荷载，极限荷载为 1200 吨。柱基持力层为灰色粉细砂层(性质见前工程地质)。

设计要求沉桩垂直精度为 $<0.3\% - 0.2\%$ ，柱平面位移为 $<30\text{mm}$ 。

(2) “H”型钢柱安装和球铰施工：

“H”型钢柱规格形式为 404×407mm，每根柱长约 21.0m。在钢管桩内安装“H”型钢柱。在施工阶段作为临时结构支撑，车站主体结构顶板、中楼板及复土和路面车辆荷载，通过“H”型钢柱传递给钢管柱。

由于钢管柱内涌土较高，故需将-18.5m 以上的土都将取掉，才能安装球铰，在取土和焊接安装球铰中，要采取通风和通讯措施。

“H”型钢柱顶面没有顶板，中间设站厅“H”梁牛腿的剪力板，并设安装孔，便于进行安装。下部焊接“H”柱垫板、上球面支座及球体。在钢管桩环形支承板上还须安装平台及下球面座。其中下球面支座中心座标允许误差为 $\pm 3\text{mm}$ ，垂直度要求小于 $1/400$ ，不允许有扭转现象。

3、地下连续墙施工

(1) 施工程序

先施工东、西端头井及东、西通风亭地下连续墙，再施工标准段及出入口地下连续墙。

地下连续墙施工流程如下：

(2) 成槽施工及精度

本工程采用 MHL—80120 型液压挖槽机施工地下连续墙，同时配备 KH - 180 型 50 吨大吊车。它装有两个方向的垂直精度传感器，并配有两个方向的纠偏装置，本工程按设计要求每幅地下连续墙垂直精度 $<1/300$ ，而据施工统计资料垂直精度达 $1/500$ 左右，满足了设计要求。

(3) 钢筋笼制作及吊放

设计的钢筋笼标准段为 27.5 米长，端头井为 30.5 米长，最重达 20 吨左右，采用 - 辆 100 吨大吊和 - 辆 50 吨大吊抬吊起吊方案，吊点用三点式(实际是九点受力)，为防止起吊中变形，在笼内布置了足够强度的水平框架和竖向桁架，并对起吊点都进行了加强，在实施起吊中，结果均未发生问题。整幅钢筋笼在统氏胎模上布筋焊接成型。

(4) 地下连续墙接头型式和特点

本工程地下连续墙接头为刚性止水接头，断面形状如图 28。

在施工中对止水接头板统长的平直度，导轨槽钢的平行度和对称度提出了相应的技术要求，以确保与导轨槽钢镶嵌配合的接头箱和接头板刷壁器能顺利施工，为了防止混凝土通过止水接头板两端与地下连续墙之间的空隙流入邻接槽段。在止水接头板两设置装配式止浆铁皮。在施工中将特制的刷壁器由止水接头板上导轨槽钢定位导向，紧贴接头板上往复复喷刷，除净附着在止水接头板上的泥土。混凝土导管通道设置益向接头部位靠拢，把导管接头面的距离缩短到 1 米之内，使接头部位的混凝土有良好的密实度和抗渗性能。

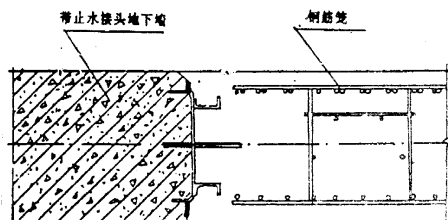


图 28

4、端头井深基坑开挖及结构施工

(1) 端头井施工顺序

黄陂路东站东、西端头井施工采用顺筑法施工工艺，即：土体开挖 钢支撑，循环往复至底板标高 浇捣底板钢筋混凝土，从下至上顺序浇筑钢筋混凝土内衬及顶板。端头井中楼板等内部结构均在盾构掘进施工后再进行施工。

(2) 基坑支撑方案

根据东、西端头井平面尺寸特点，在纵向(东西方向)采用直撑，横向(南北方向)采用斜撑，见图 29。

东、西端头井采用五道支撑，钢支撑直径采用 580mm 和 609mm，因两端头井南北端离地面建筑物很近，最近处仅 1.2 米左右，而且支撑轴力很大。经计算，600 钢支撑用于第三道东西方向纵向直撑和第二道斜撑。其余均为 580 钢支撑，其中，第三、四、五道斜撑采用两根上下并排 580 支撑。斜撑的钢牛腿必须与钢支撑密贴垂直，如有缝隙应用钢板或细石混凝土充填。钢牛腿与地下连续墙预埋件焊接质量 - 定要保证。为了保护端头井四周建筑物和地下管线，对钢支撑按设计轴力 80%-100%施加预应力。

(3)基坑开挖
东、西端头井开挖，严格按照“地铁工程地下墙深基坑施工技术要”(21 条)要求施工，必须遵循“先端部、后中间”的原则，即挖土施工先将南北端斜位置土方挖出，撑好斜撑后再挖中间段土方，见图 30。

(4)信息化施工
在整个端头井基坑开挖及支撑施工中，对每层开挖支撑的进展，对地下连续墙的变形和地层位移进行监测，主要包括地下连续墙变形观测及沉降观测，斜撑和直撑轴力测试，邻近建筑物沉降观测，以反馈的信息及时指导施工，必要时。可将南北方向直撑及时撑上。

通过对上述各种指标监测有效地保护周围建筑物的合理性。控制了地下连续墙的变形及深基坑的稳定，见表 14 - 表 16。

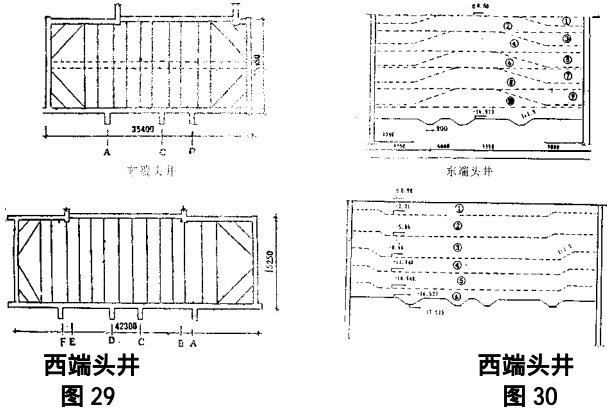


表 14 支撑轴力

支撑位	直设计轴力(t)	设计斜撑轴力(t)	实测轴力				测试效果
			东端头井	占设计比率	西端头井	占设计比率	
1	90	126					验证了斜支撑体系安全可靠
2	180	252	178	70%			
3	230	322			134.8	41%	
4	210	294	167	56%	110.5	32%	
5	200	280	73.8	26%	107.5	38%	

表 15 连续墙水平位移

位置	测点	最大水平位移	深度	水平位移/开挖深度	测试效果
东端头井	C18	36mm	18.5m	0.23%	保证基坑稳定墙体稳定
西端头井	C2	23mm	18m	0.14%	

表 16 建筑物沉降

位置	测点	最大沉降量(mm)	最大均匀沉降(mm)	最大沉降/开挖深度	底板浇筑前后沉降速度		测试效果
					前	后	
东端头井	JB23	15	0.6%	0.09%	1.5mm/day	0.08mm/day	保证了建筑物的完全
西端头井	JN1	18	0.5%	0.11%	1.5mm/day	0.09mm/day	

5. 车站标准段深基坑施工

5.1 标准段结构施工顺序及流程

(1)标准段结构 - 期工程施工
标准段 - 期基坑开挖分东西两段分别同时施：正。基坑东段采用 50 吨履带吊单侧抓土、吊装支撑及钢平台安装，基坑西段因两侧均有邻近建筑物，无施工便道，采用 50 吨及 100 吨履带吊或履带挖机，由西向东倒退抓土，及安装支撑和钢平台，基坑支撑视地下连续墙幅段宽度和设计轴力，分别采用 580 及 609 支撑，支撑施加轴力为设计轴力 80%~100%。

一期标准段施工流程为 地下连续墙内导墙凿除 基坑开挖 支撑安装 钢平台安装 顶板及部分站厅板结构施工 支撑拆除 防水层施工。

(2)标准段结构二期工程施工准备和施工流程
二期施工为“暗挖”施工，为解决逆筑施工期间支撑，钢平台等材料的水平、垂直运输及安装，支撑施加预应力设备运输，需要一期施工时在标准段及东西端头井顶板上埋设东西纵向间距 4.1 米 30 预埋螺丝三道，以便安装三道单轨 5n 吨电动葫芦。
在标准段二期施工前，首先必须先将东西端头井和 V 号出入口施工好，以便人员、施工材料和土方出入。出入口与标准

段要事先打通，其中东、西端头井封堵地下连续墙用定向爆破方法炸除，Ⅰ、Ⅴ号封堵地下连续墙采用人工凿除。

另外还要事先考虑好照明、通风和排水等措施。

为了加快施工进度和周围的环境保护，还采用了井点和注浆地基加固等技术措施。

5.2 基坑开挖施工

(1) 基坑土体一期开挖

基坑开挖东西两段分别同时施工，东段以 10 轴开始向东施工，吊车在宝康里单侧作业，西段以 3 轴开始向东施工，吊车和履带挖机在结构平面内倒退作业，基坑放坡必须为 1:2。

因科研需要，即深基坑顺筑法和深基坑逆筑法施工比较和在工期允许的情况下，将 3~6 轴，13~16 轴，20—27 轴范围内，基坑开挖深度为 -10.5 米，其余地段均为 -5.6 米。

(2) 基坑土体二期开挖

8~14 轴中楼板及部分底板土方和 16~20 轴中楼板土方由单轨 5 吨电动葫芦垂直吊运，其它地段土方均由水平运输至最近的出入口，再由出入口上的吊车抓至土方运输车上。挖土和水平运输采用小型机械设备，运土便道设置在各层支撑上，土方采用分层开挖和全断面开挖，严禁大面积铺开挖土，每层挖土坡度不能超过 1:1，如作业段中有几层土同时施工，总坡度不得大于 1:2。挖土顺序是先从出入口和东、西端头井处开始挖土，然后再向内纵深处发展。

5.3 钢支撑安装施工

由于部分地段挖至 -10.5 米处，故支撑也完成了四道支撑，这样给逆筑支撑施工带来了许多方便。原来第四道支撑需从外面运进去，第一三道支撑由第二道支撑翻下，见图 31。

现在，只需合理地安排和调度，第三道支撑由第二道翻下，第四道支撑由做好的中楼板处第二道和第三道支撑翻下，其中支撑运输采用 5 吨电动葫芦水平运输和垂直运输并施加预应力。见图 32

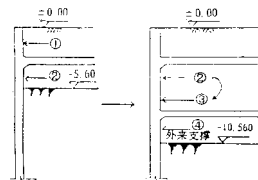


图 31

支撑应挖出 - 根位置就安装 - 根并及时施加预应力，施加预应力 80%~100%，中楼板和底板混凝土强度达 70% 以上方可拆除支撑。

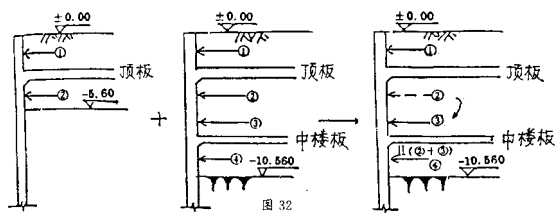


图 32

5.4 顶板施工

(1) 模板支护工程

根据逆筑法施工特点，本工程顶板及中楼板底模支护采用钢平台吊模，顶板钢平台纵钢梁采用 HE700A 型钢，纵 3—6 轴，22—23 轴，25~27 轴为上翻，其余为下翻，钢平台横梁采用 140_b，140_b，下焊接 U 型 16 圆钢，悬吊 I14，在 I14 上铺设 T-75 波纹板作顶板底模，上翻梁下相对应的波纹板采用 $\delta=1.2$ 毫米，其余用 $\delta=0.8$ 毫米。

(2) 混凝土工程

顶板厚 0.7 米，混凝土浇筑须先中间，后两翼向前浇筑，以防加翼处 I14 吊梁走动。顶板浇筑后，必须盖草包湿养 - 周，东端头井采用混凝土泵车软管布料。西端头井采用混凝土泵车硬管布料。

(3) 防水层工程

本工程防水层采用甲方提供的“必坚挺”，将车站顶板和上翻梁包住，在两侧地下连续墙上翻 50 厘米，再加 5 厘米砂浆和 15 厘米厚素混凝土保护层。

5.5 中楼板施工

(1) 底模支护工程

中楼板钢平台纵钢梁采用 HE550A 型钢，纵梁均为下翻梁，站厅板 3—5 轴，22~27 轴板厚 0.4 米，钢平台横梁用 I25_b，其余部分板厚 0.45 米，钢平台横梁采用 I28_b，横钢梁下均焊 12 圆钢，下悬吊与顶板相同规格的 I14，采用 T-38 波纹板作底模。

(2) 混凝土工程

中楼板厚 45 厘米及 40 厘米，在明筑阶段中采用混凝土泵车软管布料，逆筑阶段中采用混凝土泵车硬管布料，并需养护。

5.6 底板施工

标准底板共分 8 节，厚 0.8 米，采用商品混凝土，混凝土泵车硬管布料，混凝土—十二浇筑后需要养护。

6、施工监测及信息化施工

6.1 - 期施工对周围环境影响及信息化施工

在标准段基坑开挖和结构施工过程中,施工和监测工作同步进行,对于监测的数据进行分析研究,同时将分析研究结果及时反馈给施工单位,并指导施工。监测数据反映施工对施工现场周围环境影响相对较小。

(1)双禾村五层建筑物是沉降观测的重点。房屋纵向沉降 B₂₃点最大值为 42 毫米,纵向不均匀沉降为 1.7‰,横向不均匀沉降为 1.1‰,尽管沉降最大值超过 30 毫米,但不均匀沉降始终小于 2‰,房屋结构整体仍然安全,没有出现裂缝。

(2)地表最大沉降量为 21 毫米,发生在离地下连续墙 7.4 米处,地下连续墙最大水平位移 29 毫米,发生在地表下 13.5 米处,地下连续墙自身沉降几乎不变。反而略有上升。

总之,随着第 - 期施工的进行,对车站标准段北侧东西纵向建筑的监测,将监测的数据进行分析和研究,并及时反馈和指导施工,保护了双禾村、尚贤坊等建筑物的安全,保护了地下产线,减少了对周围环境的影响。

6.2 二期施工对周围环境影响及信息化施工

(1)地下连续墙水平位移

根据过去的工程经验,上海软土地基中的地下工程, - 般墙体最大水平位移约为开挖深度 0.04%左右,对于周围具有建筑物的基坑必须在 0.4 以下。由于实行—厂地基加固及施加支撑预应力,特别是逆作法施工,使得墙体位移值为开挖深度的 0.07 - 0.29%,具有足够安全度,数据见表 17。

表 1 7

编号	C5	C 6	C 7	C14	C16
最大水平位移 mm	20.5	20.6	34	15.5	9.8
最大开挖深度 m	14.0	14.0	11.5	14.0	14.0
(百分比)	0.15	0.15	0.29	0.11	0.07

表 1 8

编号	F ₁	F ₂	F ₄	F ₅
最大沉降量 (mm)	46	33	40	35
发生深度(m)	3.0	3.0	3.0	3.0

表 1 9

编号	F ₁	F ₂	F ₄
最大水平位移(mm)	34	32	36
最大开挖深度(m)	11.5	11.6	14.5
离坑边距离(m)	2.0	6.0	1.8

(2)土体分层沉降

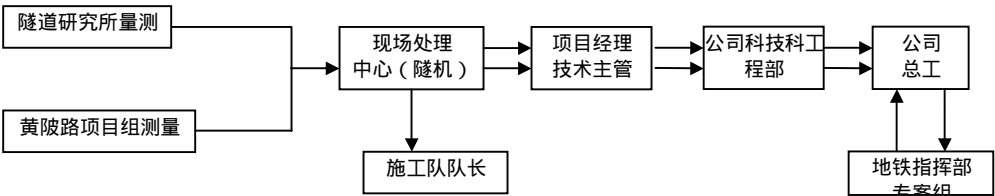
土层分层沉降随深度增加而减少,从现有测点来看,地表下 3 米处沉降量最大,21 米沉降量最小,推算沉降零点在地表下约 30 米处。见表 18。

(3)土体水平位移基坑开挖深度越深,离基坑越近,土体水平位移越大。见表 19。

6.3 施工监测的反馈和指导作用

通过测试资料研究和分析,不仅综合了解结构在施工过程中的外荷载和内力及变形特征,而且验证了逆筑法施工各阶段结构荷载分布和传递过程,同时可以了解基坑周围土体的沉降又深层土体的运动规律。并对整个车站逆筑施工中起丁重要的指导意义。

黄陂路地铁车站施工监测已积累了大量的数据,为了更好的管理保存开发及指导施工,各测试项目数据均在计算机卜完成了管理,并且制定了严格的监测网络。



7. 结束语

(1)黄陂路地铁车站主体结构于 1993 年 5 月 28 日完工,比原合同工期提前 8 个月,社会效益、经济效益都是相当大的,为公司树立了信誉和良好的企业形象。淮海路是上海著名的商业街,每一年净利达一亿元。淮海路提前近一个月通车和恢复商业街营业。其社会效益是不可低估的。

黄陂路地铁车站施工由于采用了逆筑法工法,使一期工程进度加快,工期缩短,为二期工程打下了坚实的基础,二期工程提前近一个月,而总工期缩短了近 8 个月。不论对施工现场环境和施工环境,逆筑法施工比顺筑法施工安全有保证,而且施工质量也易保证。

(2)由于施工二期方案的合理性,给二期施工和盾构施工带来了许多有利条件。

由于二期施工将第三道和第四道支撑完成了部分,这样二期施工无须将支撑再从地面驳运进顶板下面施工现场,只需合理地运用调配已有的支撑即可。

由于先将东、西端头处中楼板和底板施工完毕,这些工作为地铁 1#、2#、3#盾构从黄陂路地铁车站进出洞和掘进施工创造了有利条件。

(五)地铁车站结构逆筑法的设计与施工

1. 逆筑施工的车站结构施工设计

1.1 结构总体施工设计构思

逆筑法的一般做法是首先构筑围护结构(包括地下连续墙及中间支承柱),再在地下连续墙的顶端浇筑顶板结构混凝土、覆土、修复路面,或者架设临时道路板以恢复地面交通,然后自上而下进行暗挖作业、浇筑主体结构的楼板,最后浇筑底板结构混凝土。根据黄陂路车站所处的具体环境条件结合淮海路上地—F 管线改造工程,我们确定采用“一明二暗”的建筑结构施工方案。“一明”就是指先明挖至地表以下 5m 左右,随后浇筑车站顶板结构混凝土。“二暗”是指在顶板以下暗挖作业,浇筑站厅板和底板的结构混凝土。结构总体的布置结合地下车站功能要求和逆做法施工特点,将车站的出入口及两端隧道掘进盾构工作井作为“二暗”施工的施工通道。顺此,出入口及端头井采用顺筑施工。并且与车站顶板明挖逆筑施工同步完成,为暗挖逆筑施工创造有利条件。

1.2 主体结构设计

主体结构为双层、双柱箱型结构。竖向荷载由中柱及连续墙承担,水平向土压负荷也由连续墙抵挡。主体结构的设计必须能承受施工阶段负荷及使用阶段的负荷。与顺筑施工相比,逆筑施工阶段的结构设计更具复杂性。

1.2.1 连续墙的设计

作为主体结构的一部分,连续墙必须保证纵向连续,即幅与幅的接缝具有抗剪力学性能,因此每两幅连续墙中先行幅连续墙的两端设计成刚性接口。后续幅连续墙的钢筋笼插进接口,浇灌混凝土后就能达到两幅连续墙刚性连接,接头还具有止水的性能。连续墙与楼板结构还必须刚性连接,因此,设计制作钢筋笼时依楼板标高预埋钢筋接驳器,待楼板施工时,将主筋与其相连,实现箱式结构的刚性角节点。这样,连续墙毋需内衬就可承担竖向负荷及抵挡侧向土压,经设计计算的连续墙壁厚为 0.8m。

1.2.2 中间柱和桩基设计

主体结构的横截面为双层三跨双柱形式,中间支承柱采用临时柱与永久柱相结合的设计方案。临时柱为高强度 H 型钢柱,能承受逆筑施工阶段的荷载;永久柱为钢筋混凝土柱,将临时钢柱包在里面,使成为主体结构的中柱。柱基采用桩基,一柱一桩,仅作逆筑施工时的承载结构用,桩基承载力为 6000kN,设计按照沉降变形控制,目的是避免柱之间、柱与连续墙之间较大的差异沉降而影响楼板结构的受力性能。桩基设计选用 $\phi 900\text{mm} \times 20\text{mm} \times 60\text{m}$ 的钢管桩。H 型钢柱插入钢管柱中,在底板结构以下 3.5m 处与桩轴心相接。

1.2.3 楼板结构设计

顶板及中楼板的结构施工立模是逆筑施工的技术关键。由于通常的钢筋混凝土结构难以满足建筑施工的工程要求,所以选用劲性钢筋混凝土结构作为顶板、中楼板结构利用劲性钢结构骨架悬吊钢平台底模,使底模能承受顶板、中楼板的钢筋混凝土的混凝土自重及施工荷载。这种结构的最大优点在于顶板或中板未达到强度前,仍可继续建筑顶板或站厅板以下的结构,同时这种结构骨架又可成为永久结构的一部分,虽然费用较大,但可缩短施工周期。

1.3 围护结构的支护设计

围护结构的支护体系是与基坑开挖的工序相对应的。连续墙的支护由楼板结构和支撑共同承担,这样设计可充分发挥楼板结构刚度大、纵向连续的优点,使支护刚度增强,有效地限制连续壁侧向变形,同地还可适量减少支撑数。支撑共设五道,因地制宜地选用现存的 609 钢管拼装式支撑。当顶板或中楼板结构混凝土浇筑强度达到 70%以上时,支撑可由二道转下三道或四道转下五道,可节约逆筑的劳力和工时。

2、逆筑施工

2.1 施工组织设计

根据上述的环境要求,工程要求及工期要求编制施工组织书。将整个地下车站的主体结构逆筑施工过程分为三个主要阶段,即:深基坑开挖施工准备阶段;明挖逆筑阶段;暗挖逆筑阶段。对应编制三阶段施工组织手册。

2.1.1 深基坑开挖施工准备阶段

在这个阶段,组织实施地下连续墙施工、桩基施工、中柱吊装及其它辅助施工(包括井点管道埋设、地基注浆加固等)。其特点是机械化程度高、施工机械种类多。其中集中了全公司的主要施工机械,为了不影响公司其它工程项目的施工,施工必须速战

速决。施工组织设计书也就

抓住这 - 要点编制,做到各工种相互配合,交错施工,时间占满。实践结果,该阶段的施工仅花 4 个月就完成了 180 余幅连续墙段、40 根柱及桩基,创下每天制作 1~2 幅连续墙段的最高施工记录。

2.1.2 明挖逆筑阶段

在这个阶段,需编造车站顶板明挖逆筑、通道及端头井结构顺打、顶板以下管线敷设及路面修复的施工组织书。其特点是顺筑逆筑施工同步进行,充分发挥本公司顺筑施工的技术优势,集中力量快速完成车站的端头井和通道的结构施工,为暗挖逆筑创造良好施工条件。

2.1.3 暗挖逆筑施工

在明挖逆筑顶板结构的实践基础上,改进暗挖逆筑中楼板、底板结构的施工组织书。合理布置暗挖作业面,做到不同层交错段同时逆筑施工,垂直与平面的运输通道畅通,保持施工的连续,使施工速度增快、工期缩短。

本工程分三阶段编制施工组织书,突出了施工重点,实现了施工机械及劳力的优化配置,保证了主体结构施工的连续。工程实践表明,施工工期在大大缩短,比原计划提前 7 个月完成主体结构施工,说明这样的施工组织设计是行之有效的。

2.2 施工技术

逆筑施 5222 艺指的是 - 系列的地下结构施工技术按 - 定的顺序或组织分步实施。我们在黄陂路车站的逆筑施工中完善了 - 套适合软土地层的地下连续墙围护深基坑暗挖施工技术,其中有地下连续墙施工技术,支承柱和桩基施工技术,顶板、中楼板逆筑立模扎筋混凝土浇捣技术,暗挖作业和支撑技术及地基加固技术,分叙如下。

2.2.1 地下连续墙施工技术

采用 MHL - 80 / 200 型液压挖槽机成槽,超声波监测仪测试垂直度。实际成槽精度达到 $1 / 500$ 。用自制刷壁器刷洗连续壁的刚性接头。浇捣混凝土后形成的连续壁不仅达到设计抗剪强度,而且具有止水性能。这样连续壁既可发挥挡土作用,又可承受主体结构的竖向荷载。

2.2.2 支承柱和桩基施工技术

60m 长钢管桩分四节锤打,选用由日本进口的 7.5t 内燃机锤打桩机施工,桩的垂直度达到 $2\% \sim 3\%$ 。H 型钢柱吊装于钢管桩内,在桩深 18.5m 处与桩相接,由柱底球面中心对准桩内球面支座中心,保证桩与桩的轴心对接,安装施工偏差 $< \pm 3\text{mm}$,柱的垂直度小于 $1 / 400$,确保了柱的临时与永久承载能力。

2.2.3 顶板、中楼板逆筑立模扎筋、混凝土浇捣技术

顶板、中楼板的劲性钢构件及底模平台构件全部电焊连接,底模平台保持同 - 平面,平台上敷设波纹钢板,在波纹钢板之上绑扎钢筋,主筋与钢构件顶或底面保持 - 定净距,同时与波纹钢板的净距达到主筋保护层厚度。混凝土浇捣先中间后两边,仔细振捣钢构件顶、底面上下的混凝土,确保该部位的混凝土密实。

2.2.4 暗挖作业和支撑技术

充分发挥顶板及中楼板结构的承载能力,在逆筑顶板或中楼板结构时,依据施工组织的运输走向,布置预埋吊筋,当结构混凝土达到强度后,安装多条单轨电动吊车梁,分别承担支撑安装、预应力施加及运土运料。暗挖作业呈主体型,土方开挖分层、分段,中楼板及底板的土方暗挖纵向错开同步施工,减少基坑暴露时间。纵向支撑安装利用支护中体与局部的空间关系,将二道支撑翻移到了三道,四道翻移到五道,上、下交错渐进。支撑安装到位后再施加 - 定预应轴力有利于抑制连续墙向坑内侧向变形。

2.2.5 基坑加固技术及连续墙底部地基加固技术

地基加固技术常常与其它地下施工技术组合或配合施工。基坑地基加固是为基坑暗挖作业创造稳定条件,在这次黄陂路车站基坑暗挖建筑施选中选用了抽条压密注浆与井点降水注浆加固的做法,既达到了稳定基坑的目的,又减少丁不均匀沉降,本公司率先开发了墙底地基注浆加固技术,并在以往的顺筑深基坑工程中获得成功,这次将它应用于逆筑施工,成为主体结构的中柱与连续墙协调变形的关键技术,实测连续墙与中柱的差异变形仅 $2\sim 3\text{mm}$,说明加固是有效的。

2.2.6 环境监护及施工监测

由于地下工程的土层非均匀性、周围环境的复杂性及施工的差异性,在深基坑逆筑开挖施工中,不可避免地会遇到 - 些突发或偶然的问题发生,因此施工监测及环境保护监测是必不可少,同时还必须储备 - 定的应急施工措施,一遇问题即及时解决。将问题抑制于萌芽状态。在黄陂路车站的逆筑施工过程中,实施 - 系列施工正监测及逆筑试验研究,使逆筑施工成为“长了眼睛”的施工。施工监测最终表明:坑内外土体和结构的沉降变形及侧向变形均小于工程指标与环保指标。车站主体结构的外荷、内力试验研究结果。反映了主体结构在逆筑全过程中的力学规律,取得了量化认识。

3、结语

3.1 设计与施工关系

施工以设计为蓝本,是设计的体现,而设计要以施工技术为基础,以工程实现为目的。地铁黄陂路车站结构的逆筑施工的顺利竣工是设计与施工有机结合的成功工作。它表明逆筑施工的主体结构设计,围护结构设计,不仅能满足工程的施工要求和使用要求,而且对环境的保护也是有利的;无疑逆筑施工实践所积累的经验将有助于今后类似地下工程的设计与施工。

3.2 效益分析

地铁黄陂路车站由于采用逆筑法施工,所以施工占地面积缩小了 - 半。减少动拆迁近 $1 / 3$ 。逆筑支护结构稳定可靠,施工对附近建筑物及地下管线的影响极小,节省了维修费用,保证了附近居民的正常生活及商业经营。与顺筑法相比提前 - 年半恢复地面交通和车站两侧的商店营业,直接经济效益显著。

(六)上海地铁陝西路车站逆作法施工

1、工程概况

工程结构主要设计方案及施工措施如下：

- (1)主体段及端头井外围采用十字钢板连接的800mm厚地—厂连续墙(无钢筋混凝土墙作内衬)。
- (2)顶板及中楼板采用劲性配筋设计，混凝土板的下部采用压型钢板作模板。
- (3)中间框架柱为H型钢劲性混凝土柱，下部为 900钢管柱，柱、桩中间用钢板连接。
- (4)工程设计要求挖土施工阶段，垂直方向设置5道临时支撑。
- (5)基坑内降水至基底以下5m，以减小围护墙下部的位移量。
- (6)监测四周建筑物、管线沉降和位移，作好环境保护工作。

2、逆作法施工方案

在闹市区的软土地基上实施“逆作法”施工：正，不单要考虑工程安全施工，而且要有效地控制基坑外围的土体位移和周围地面及建筑物的沉降。并且要在规定的封路期限内完成车站的顶板结构、施工难度很大。因此，提出以下重点攻关课题；

- (1)逆作法封闭状态下的基坑支护及土方开挖方案。
- (2)车站中柱q-900钢管桩与H型钢的连接节点及施工方法。
- (3)高水位软土地基深基坑施工的真空深井降水设备研制及在封闭顶板以下应用的研究。
- (4)逆作法施工的楼板结构方案及模板支撑方法。
- (5)为减少位移和沉降影响而进行的土体加固及周围环境保护措施和监测方案。

组织技术人员进行施工方案竞赛技术攻关，并邀请局内外专家进行咨询论证。并在此基础上，拟定了“一明两暗”的逆作法总体施工方案。“一明”指明挖土至-6m左右，设置第一、二道临时支撑，浇筑车站顶板结构，随后拆除第一道支撑，复土做路面，恢复淮海中路交通。在此之前，则首先完成车站侧边的地下连续墙、打设框架柱下钢管柱，吊装H型钢立柱。“两暗”是指在车站顶板封盖的情况下，由车站两侧的竖井进入顶板厂暗挖土，分别设置第三、四道支撑和用泵送混凝土浇筑中板、底板(见图33。)

3、“逆作法”施工的效果

(1)在暗挖土条件下，无法使用目前通用的大型二上方机械。陝西北路地铁车站顶板以下的土方开挖，对支撑以下土体遵照先撑后挖的原则，按为控制土体位移、沉降而确定的开挖顺序、开挖间距、开挖深度及支撑施工的顺序，采取人工分段分层挖土，小推车平面运输到竖井出口，由抓斗提升出坑，装车外运。在地铁总公司原审定的施工方案中，垂直方向有五道支撑，如按该方案施工顶板以下的第三、四、五道支撑，必须由入口垂直吊运入坑，在缺乏大型吊运设备的情况下，在坑内作水平运输、拼装起吊就位，既困难，又耗工费时。我公司经反复论证，详细计算，利用楼(顶)板在浇捣后继续开挖基坑时，混凝土强度逐渐达到设计强度，楼(顶)板已成为一道可靠的支撑。因此，原先靠近该层板下的支撑可以拆除，垂直下移到下一道支撑的位置，而且基坑挖土标高处的地下墙，内侧水平位移可达到控制的指标值以内，这样可解决在坑内搬移沉重支撑的困难。实际上只用2套支撑材料，就完成了原计划要5套支撑材料的基坑支护，取得了节约投入费用约50万元和减少工序工期100d左右的实效。

(2)原设计的楼(顶)板为劲性配筋和用压型钢板作模板，节点构造复杂，车站平面呈鱼腹形，压型钢板排列困难，由两根工字钢焊成的箱形空腔内，混凝土无法浇捣密实，因而形成的劲性结构抗裂性差，存在渗漏隐患。我们在征得设计和地铁总公司同意后，利用已运到工地现场的劲性结构材料，做主要支承体，配以由51钢管制作的轻型桁架，50mmX 70mm方钢管作搁栅。普通定型组合钢模作平台模板，将原劲性结构改为柔性配筋混凝土，简化了施工工艺，加快了工程进度。由于取出了原先埋入混凝土板中的工字钢和H型钢纵梁加以回收利用，又取消了进口压型钢板，较原定支模体系节省了146万元，同时增强了软土地基中“逆作法”施工混凝土楼板的抗裂抗渗性能。

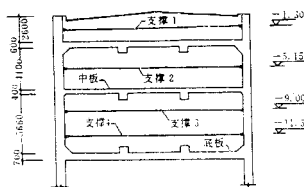


图33

(3)在地铁车站逆作法施工过程中，深基坑围护在基坑下端的位移控制，四周建筑物的沉降，及管线的位移和沉降控制，是施工方案中极为重要的组成部分。本工程施工中设置了连续墙的竖向和横向位移测点，坑外地表和邻近建筑物的沉降测点，连续墙外侧的土体位移测点，并对支撑轴力，连续墙钢筋应力，连续墙两侧及底板以下的水土压力、基坑土体回弹进行了量测，使监测与施工的工况相适合；同时，将收集的数据、监测的信息及时反馈，用于指导施工，进行动态技术管理、信息管理，使整个地铁车站施工期间，四周建筑物和市政管线沉降，均控制在预定的目标值内。

(4)通过陝西路地铁车站逆作法施工的实践，为上海地区深基坑“逆作法”施工积累了—些宝贵的经验。