

# 矩形顶管在城市地下空间开发中的应用与实践

## ——新旧商业体间的地库连通道建设

林亨富

中国地质工程上海有限公司

**摘要:**文章着重介绍矩形顶管在软土地基中的实践应用,说明了技术实施和过程控制一系列方法措施,推广矩形顶管在城市地下空间开发中的成果分享。

**关键词:**地下空间;矩形顶管;“弃壳”法接收;减阻;轴线控制;变形控制;机壳内衬现浇

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.12.074

随着城市建设进程化加速,各大城市对地下空间开发利用进入空前规模。矩形顶管在城市地铁交通、过街通道、地下商业空间、地下停车场,以及地下综合管廊、地下物流通道、海绵城市建设等领域地下空间开发中的应用探索尤为突出。本文以某新旧商业体间的地库连通道为例,从项目特点、施工重难点与应对策略、技术实施与控制及项目成果等方面进行概述,浅析矩形顶管在城市地下空间开发中的实践应用。

### 一、工程概况

#### (一)项目特点

本项目为新旧商业体之间地下负二层车库的连通道,长度约26m,下穿道路(该道路交通干道,交通繁忙,人车流量大),采用土压平衡顶管法施工,由新建商业体向旧商业体推进施工。因受到场地条件限制,本顶管工程无法设置接收井。

#### (二)设计形式

本工程地库连通道结构采用外包尺寸8.4m(宽)×4.2m(高)预制混凝土管节(砼强度等级C50,抗渗等级P10),结构壁厚0.6m。根据连通道实际长度,除去机头壳体和原商业体连接现浇段,本工程需单节长度1.5m的管节共14节。

设计采用平行中心轴式多刀盘顶管机,前后排布式刀盘,适用于软土掘进。机头外包尺寸同通道结构,顶进时最大覆土深度约7.7m。

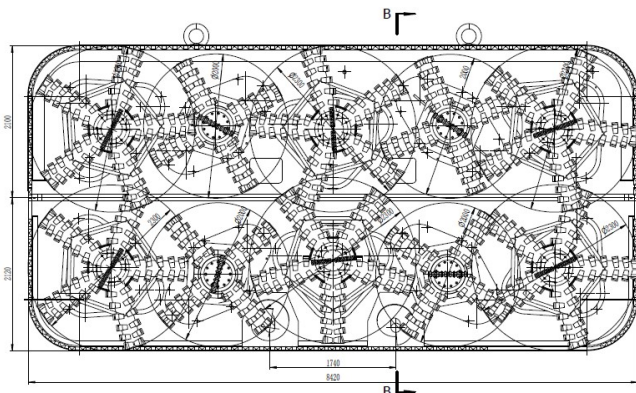


图1 名称:平行中心轴式刀盘示意图

始发井利用新建商业体地下室空间,与地下结构同步施工,尺寸为10.6m(顶进方向)×10.1m,考虑顶管

机作业条件,该区域的结构底板先落低,连通道完成后进行二次浇筑。

不设置接收井,采用“弃壳法”接收。顶管推进至旧商业体围护结构时进行弃壳,围护灌注桩、建筑结构外墙开洞后,弃留机壳与原商业地下结构进行现浇连接。

利用底板和反力架作为后靠,反力结构为钢筋砼柱+横梁+斜撑组合形式。本工程理论计算最大顶力约990t,取1.5倍安全系数的值为1485t。结合新建工程结构、接收端MJS加固体及以往施工经验,最大顶推力按照3000t设计。

### 二、工程重难点与应对策略

受场地条件、周边环境的影响,在施工吊装、环境变形控制及接收端处理等环节上均存在一定难度。为此,施工前制定了针对性策略,保障工程的安全高效推进。

#### (一)无接收井,接收难度大

因本工程不具备设置接收井条件,采用“弃壳”法接收施工难度大。为确保进洞接收安全,采取以下技术措施:

(1)顶管机头与旧商业体地下室连接范围采用Φ2400@1600大直径MJS工法桩加固,防止机壳与管节重量结构不同而发生失稳现象。

(2)结构外墙与围护桩间肥槽回填物为建筑垃圾和块状混凝土,常规高压旋喷桩工艺无法实施,改用潜孔钻引孔+钢套管跟管+双重管高压双液注浆成桩工艺对接收洞门两侧及洞门以下深度至底板底面下3m范围进行加固,封边封底。

(3)接收端通道口处地下二层外墙采取静力切割拆除,围护桩结构人工凿除。拆除前接收洞门两侧增加800\*600混凝土柱,洞门顶增加1200\*800门梁,形成有效传力结构。

(4)顶管机机壳前端靠近弃壳设计位置时,加强测量频率和精度,控制通道及机头的轴线偏差。

(5)接收端地面开挖及结构外墙和地板凿开后,防水层被破坏。为防止地表水和地下水侵入引起沉降变形,设置两口备用降水井,观察地下水位变化,及时抽水,保持水位平衡。

(6)机壳内电机、螺旋机等零部件全部拆卸完后,采用I40b工字钢对顶管机机壳内部作临时支撑,防止由壳体变形而引起的地面沉降和建(构)筑物变形。

#### (二)地下综合管线多,变形控制要求高

根据物探资料显示,临近旧商业体的接收端区域,管线密集,存在燃气、电力、给水等重点保护管线,下穿道路中管线分布复杂,变形控制要求特别高。技术措施如下:

(1)对重点管线进行开挖暴露,并采用型钢支撑架,管线底部辅以柔性衬垫进行保护。

(2) 专业监测单位按监测规范要求对顶管施工影响范围内管线进行信息化监测, 精准指导施工。

(3) 顶进过程中, 合理控制顶进速度, 保证施工连续均衡, 避免出现长时间搁置情况; 根据反馈数据不断调整土压力, 使之达到最佳状态; 严格控制出土量, 防止欠挖或超挖。

(4) 管节下井前, 管节外壁四周涂蜡、烤烘处理, 增加润滑利于管节顶进。

(5) 为减少土体与管道间摩阻力, 在管道外壁压注触变泥浆, 在管道四周形成一圈泥浆套以达到减摩效果。

(6) 根据监测变形情况, 可采取壁后跟踪补压双液浆, 压浆量的控制视变形变量而定。

(7) 本工程顶管断面较大, 土体自律性较差, 设置双道止退, 有效阻止管节后退和避免由此带来的前方土体沉降。

### (三) 设备站位平台要求高, 安全风险性大

本工程顶管机头最重部分约100t, 单节管节重约51t, 结合现场条件和实际施工需要, 经验算吊装工作需要采用300t履带吊。利用新建项目场地作为履带吊临时站位平台。建筑设计方案该区域顶板为多级降板区, 存在高差, 且主体结构强度和施工面标高无法满足顶管施工荷载等需求。针对大型吊装作业荷载要求, 对原结构顶板进行加固补强:

(1) 顶管井洞周边结构顶板等效荷载不超过50kpa, 结构顶板与外部道路标高落差-0.500~-1.000m, 需找平, 考虑土体和硬地坪自重, 综合考虑荷载70kpa, 对设备、材料停放区域结构梁板调整, 并增加临时柱。

(2) 对吊车站位的落低结构顶板进行覆土回填并浇筑承重地坪。回填土厚度约40cm, 分层碾压密实, 面层浇筑30cm厚C30钢筋混凝土(配 $\Phi 18@150$ 双层钢筋网片)。

(3) 结构顶板降板区与吊车站位平台硬化地坪标高差1.5m, 悬空面增加钢筋混凝土挡墙, 辅助斜向和横向型钢形成有效支撑体系, 防止侧向集中应力破坏。

(4) 顶板结构和硬地坪结构强度需满足标养试块28天抗压强度达到设计要求的100%。

(5) 履带吊站位平台范围内, 采用20cm厚路基板垂直于履带方向满铺, 均匀分布吊装荷载。

## 三、施工技术实施与控制要点

### (一) 始发端加固

本工程穿越地层为粉质黏土、砂质粉土、粉质黏土层, 为防止顶管机进入原状土体时发生涌水涌泥导致地面塌陷, 或者顶进方向失去控制, 采用三轴搅拌桩加固洞口土体。

### (二) 安装定位

(1) 洞门止水圈安装: 主要由预埋钢环、压板、橡胶圈组成, 预埋钢环的内径与预留洞口尺寸一致。安装帘布橡胶板密封洞圈, 对称定位, 并采用20mm厚钢板作压板, 保证帘布密封性能。防止在顶管出洞及正常顶进过程中因洞圈与管节间存在建筑空隙造成外部土体涌入始发井内导致质量安全事故。

(2) 基座安装: 为避免基座过高失稳, 在始发井底部浇筑与底板混凝土同强度等级的素砼, 保证导轨平行、等高。基座定位后必须稳固, 在顶进过程中能承受各种负载而不发生位移、变形和沉降。

(3) 后靠及油缸架安装: 钢后靠自身及与轴线的垂直度对顶管顶进至关重要。采用C30素砼填充密实钢后靠与反力柱梁的空隙, 保证顶管顶进中产生的反顶力能均匀分布在反力结构上。

(4) 主顶的定位: 主顶的定位将关系到顶进轴线控制的难易程度, 故在定位时要力求与管节中心轴线成对称分布, 以保证管节的受力均匀。

(5) 顶管机就位: 为保证顶管出洞段的轴线控制, 顶管机吊下井后, 需对顶管机进行精确定位, 顶管机轴线与设计通道轴线吻合, 方可正常顶进。

### (三) 出洞前探孔

出洞前, 对进出洞加固体进行探孔, 探孔长度 $\geq 2.5\text{m}$ 。观察孔洞是否有水流出。如有大量水及泥沙涌出, 对洞口采取压密注浆加固。

### (四) 出洞段顶进

(1) 加固段掘进: 加固区正面为全断面的水泥土, 强度高, 应注意刀盘在穿越时的切削性能。穿穿出洞段加固土体时, 为保护刀盘和保证螺旋机出土顺畅, 可适当加水或膨润土液软化土体, 掘进速率2-3mm/min, 控制转速在1r/min左右, 使切削土体充分搅拌, 增加流塑性。

(2) 止退装置: 当始发洞口深度较深时, 初始顶进阶段正面水土压力可能大于管节周围的摩擦阻力。管节推到位时, 主推千斤顶退回前采用插销插进止退支撑架固定孔和管节吊装孔上, 防止管节后退, 直至管节外壁摩阻力大于掘进机正面水土压力为止。

### (五) 正常的顶进

#### (1) 正面土压力平衡

根据本工程地质参数和覆土深度, 理论计算得出初始土压力设定值为 $P_{上}=0.08\text{Mpa}$ ,  $P_{下}=0.13\text{Mpa}$ , 设定值介于开挖面土体的主动土压力与被动土压力间的差值与地下水压力之和。随着顶进施工, 土压力值应根据实际顶进参数、地面沉降监测数据作相应调整。

#### (2) 主顶力控制

主顶力随顶进距离的增加而增大。顶管机头进洞后在进入原状土且正面土压力没有建立之前, 控制主顶力不能过大。

#### (3) 出土量控制

单节管节的理论出土量 $53\text{m}^3$ , 顶进过程中应尽量精确地统计出每节的出土量, 力争使之与理论出土量保持一致(加固区控制在105%, 非加固区控制在95%), 确保正面土体的稳定, 减少地面沉降。

#### (4) 顶进轴线控制

每节管节顶进结束后, 必须测量机头的姿态, 机头一旦出现微小转角, 应立即采取刀盘反转、加压铁、灵活运用纠偏油缸等措施进行纠偏, 且纠偏量不宜过大, 以免土体出现较大扰动及管节间出现张角。

### (六) 进洞段顶进

#### (1) 顶管机位置、姿态的测量复核

机头靠近接收段时, 加强测量频率, 复核方位、确认顶管状态、评估顶管出洞时的姿态和拟定顶管出洞的施工轴线, 减少轴线偏差, 确保顶管机能准确出洞。

#### (2) 顶管接收

机头推进进洞加固体且在刀盘贴近旧商业体地下室围护灌注桩后停止推进, 通过预留注浆孔, 注入化学浆液止水, 开观测孔观察止水效果满足开凿条件后进行洞门开凿。

本工程接收端的地下室底板顶标高高于顶管机底标高，导致前端刀盘无法进入，因此利用接收端现状（围护灌注桩与结构外墙间800mm肥槽）的空间，进行设备拆除，在凿除灌注桩时，扩大横纵向凿除断面，以满足刀盘拆除的空间需要。

#### （七）顶管接收后施工

（1）浆液固化：顶管机拆除的同时，将两头洞门与管节间的间隙封堵。然后在首末各三节管壁内先注入双液浆，中间管节后注入水泥浆，置换出触变泥浆。

（2）井接头制作：浆液置换结束后尽快将末端管节和始发井钢洞门用钢板焊接成一体，现浇面与工作井内壁相平。

（3）管节间嵌缝：采用双组分聚硫密封胶填充管节间缝隙。嵌缝前清理缝隙内杂质、油污，做到干净、平整、干燥。密封胶未充分固化前注意保护，防止雨水侵入。

#### （八）机壳内衬后浇施工

洞口预留钢筋接驳器与机壳前端后浇的钢筋连接，并在预留洞口内壁与后浇砼接触面增加两圈3cm宽的遇水膨胀止水胶条。

顶板钢筋采用先绑扎后封膜的方法，在机壳内衬结构上按照主筋间距先焊接吊钩，后浇范围内的面筋和底筋绑扎时直接挂在吊钩上，再绑扎箍筋和拉结筋。

机壳内衬结构作为现浇施工初期支护。内衬结构分三次浇筑，分别为底板、侧墙板、顶板，第一道施工缝位置在底板翻高至侧墙300mm处，第二道施工缝位置为顶板以下侧墙700mm处。

#### （九）应急措施

##### （1）防“栽头”措施

本工程使用矩形顶管机断面尺寸大，且总重量达200t，加固区进入土质较差的原状土层时，极易出现机头栽头现象。采取技术措施：①进洞时，将机头和后面的管节用型钢焊接连接，使之成为整体，从而使机头沿着导轨方向前进；②调整后座主推千斤顶的合力中心，始发时观察顶管机的状态，一旦发现下磕趋势，立即用后座千斤顶进行纠偏；③改良前方土体，改善土体的稳定性；④加大顶力尽可能控制出土量小于掘进量使掌子面前方土体对机头有挤密作用利于防止机头有栽头趋势；⑤利用管节底部的压泥孔注浆将顶管机托住。

##### （2）防“磕头”措施

为防止机头“磕头”，适当提高顶进速度，使正面土压力稍大于理论计算值，减少对正面土体的扰动。尽量减少水土流失，不断根据环境变形数据的反馈进行正面土压力、出土量、顶进速度、注浆，及时调整施工参数。

##### （3）管道抗扭转措施

由于土质变化、纠偏影响及管内设备的不均匀性会造成推进时管道发生不同程度的扭转，直接影响到施工质量。主要应对措施：

根据重量平衡原理，在管内设备及管节安装时，在另一侧加以相同重量的配重，使管节顶进时保持重量平衡，消除管道扭转的因素。

顶进时，发现微小的扭转，可通过反转刀盘进行处理。

##### （4）通过不稳定流砂层的处理

从刀盘主轴孔注浆和增稠剂，增加土体和易性，平衡土体压力，保持流砂层开挖面稳定。

减慢顶进速度，使流砂与泥浆充分搅拌均匀。

随时注意开挖面前端的土压力情况，保证使开挖面前端土体不发生流沙流泥和坍塌。

##### （5）减阻措施

在大断面顶管中，随着距离的增长，经过不同的土质时，摩擦阻力过大会导致管节所受顶力不均匀，当顶力超过管节所承受极限时，混凝土管节就有可能破坏，因此管节壁外的减阻是工程顺利完成的必要措施。

在管节周围压注触变泥浆，形成约25mm左右的泥浆套，将混凝土管节与土之间的干摩擦变为湿摩擦，使其在泥浆套中向前滑行，达到减阻目的。在最前3节管节设一道注浆管道，在其后的管节中每隔3节管节设一道补浆管道，采用触变泥浆减阻后，摩阻力可以从原有 $1.5\sim 2\text{ t/m}^2$ 减少到 $0.5\sim 0.8\text{ t/m}^2$ 。

##### （6）管节整体不均匀沉降的预防措施

施工前查明顶管段地质条件，针对软弱地质应提前采取加固措施。

施工中控制机头姿态以及土压力，防止过大扰动周围土体从而导致过大的地层沉降。

顶进完成后，利用触变泥浆注浆注入水泥浆填充料，置换触变泥浆，增加管外壁土体的密实度，固结通道连成整体。

## 四、项目成果

通过设计技术在实践中转化，本工程达到以下成果：

（1）环境影响小：本工程实施不影响商业体和住宅主干道路交通及地面的各类建筑使用。

（2）工艺适用性：验证了矩形顶管在穿越粉质黏土、砂质粉土等软土地层，以及不宜大开挖的错综复杂的各类地下管线、道路工况下进行矩形通道的施工场景。

（3）顶力计算与验证：顶管机头出洞、正常顶进、进洞阶段，实际顶力基本与工程理论计算值吻合，设计反力架结构提供最大反力支撑满足要求。

（4）土体扰动小：利用土压平衡矩形顶管机可进行全断面切削，保持土压平衡，对周围土体扰动小。

（5）信息化指导施工：通过可编逻辑程序控制器及各类传感器监测施工，使整个过程顶进轴线、机头姿态、环境变形均处于受控状态。

## 结语

本工程实践成果的经验与借鉴，旨在对未来城市建设提出可供参考的经验与借鉴。在城市地下空间开发应用中，地下工程项目基本呈现有微变形、小间距、大断面、大埋深、高精度、长距离等特点，面临着“水、软、变形难以预测”等技术难题，如何更好地做好施工过程事前、事中、事后的控制，是项目成败的关键。

矩形顶管如何进一步实现更长距离顶进是一项需攻克的新课题。随着国内地下空间领域全面开发，在此基础之上发展起来的组合式顶管及异形顶管也是未来研究方向之一。

## 参考文献

- [1] 贾连辉. 矩形顶管在城市地下空间开发中的应用及前景[J]. 隧道建设, 2016, 36, 10.
- [2] 雷宏权、隆威. 浅议矩形顶管在城市地下工程中的应用[J]. 江西建材, 2017, 3(204).
- [3] 王国红. 超大大断面矩形顶管减阻施工技术[J]. 基层建设, 2019, 4.