

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.06.012

# 兰州地铁深基坑围护结构选型分析

郭楠<sup>1</sup>, 陈正汉<sup>1,2</sup>, 杨校辉<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 400041)

**摘要:** 为了积累兰州地铁车站深基坑设计和施工经验, 填补兰州地区地铁深基坑的桩撑支护设计空白, 结合兰州地铁深基坑工程对土钉墙(复合土钉墙)、地下连续墙、排桩预应力锚杆和排桩内支撑四种围护方案进行对比, 选定钻孔灌注桩加钢管内支撑支护方案。根据基坑开挖监测结果发现: 随着基坑开挖深度的增加, 各开挖阶段水平位移与深度变化和内支撑及预应力的施加有关, 基坑中部圈梁的侧移最大; 围护桩由于下端嵌固, 上端被支撑, 桩体变形曲线逐渐向“大肚”形变化, 最大水平位移产生的位置也相应下移。桩撑基坑开挖过程中, 应减小悬臂阶段持续时间, 尽早施工内支撑且适当施加预应力, 加快基础施工进度, 防止因土体流变而产生较大的位移。

**关键词:** 地铁车站; 深基坑; 桩撑围护结构; 方案比选; 施工监测

中图分类号: U231

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)06-0065-05

## Selection Analysis of Deep Foundation Pit Envelops in the Construction of Lanzhou Metro

GUO Nan<sup>1</sup>, CHEN Zhenghan<sup>1,2</sup>, YANG Xiaohui<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Department of Architectural Engineering, Logistic Engineering University of PLA, Chongqing 400041, China)

**Abstract:** In order to accumulate experience in the design and construction of deep excavation of metro station in Lanzhou, fill the blank of supporting structure design for deep foundation pits, four supporting structure design schemes, namely soil-nailing wall (composite soil-nailing wall), underground continuous wall, inner prestressed pile and anchor pile support were compared based on the situation of the deep excavation pit of Lanzhou metro. And then the scheme of inner supporting structure with bored piles and steel pipes was selected. According to the monitoring results of the excavation it is found that with the increase of excavation depth, the horizontal displacement and the depth of the excavation are affected by the supporting structure and the application of prestress; the largest lateral displacement occurs at the ring beam in the middle of the excavation pit; due to the fixation of the lower part of the supporting piles and the supporting structure for the upper part, the deformation curves of the piles present a sideways “U” shape, with the corresponding descent of the location of the largest horizontal displacement. Therefore during the construction of the supporting file foundation, the construction time using cantilevers should be reduced, the construction of the inner supporting structure should be conducted as soon as possible with appropriate prestress. Moreover, the construction progress should be speeded to avoid a larger displacement caused by water and soil loss.

**Keywords:** metro station; deep foundation pit; supporting structure with prestressed piles; scheme optimization; construction monitoring

同其他基坑一样, 地铁基坑从传统的土体强度、变形和稳定问题, 到土体与支护结构相互作用问题,

复杂性、动态性、高风险性及区域性特点更加突出, 设计与施工需要因地制宜、不能生搬硬套已成为共

识。然而时有发生基坑事故不断挑战着广大设计和科研人员,不仅严重影响工期、导致基坑支护费用大幅增加,甚至人员伤亡和不良社会影响事件也屡见不鲜。因此,地铁深基坑支护设计如何做到既经济合理又安全可靠,成为岩土工程界理论研究和工程实践的热点和难点问题<sup>[1-2]</sup>。

相对沿海地区而言,兰州地区基坑支护型式较为简单,土钉墙支护、复合土钉墙支护、框架预应力锚杆(索)支护、桩锚支护等已经取得了一定经验<sup>[3-4]</sup>。但目前本地区深基坑工程设计和施工水平总体不高,大多处于边探索边实践的动态控制阶段,轻则导致支护结构设计保守,重则导致基坑工程事故<sup>[5-7]</sup>。同时兰州属于典型的黄土与湿陷性黄土地区,地铁基坑沿线工程地质及水文地质情况复杂,基坑开挖范围内地层大致为杂填土、黄土或黄土状粉土、卵砾石层与泥岩层,典型的非饱和黄土层遇水易发生湿陷,主要富水的卵石层常有夹砂,给基坑水处理带来较大困难,同时开挖暴露的泥岩层强度流失迅速,这些均与其他已建或在建地铁基坑不同。因此,兰州地铁深基坑支护选型及地下水处理不能照搬其他地区的成功经验<sup>[8-10]</sup>,如何确保基坑支护方案安全、经济、合理,开展相关研究就显得尤为必要和紧迫。本文对兰州地铁 1 号线深基坑围护结构型式进行了比选,初定钢筋混凝土排桩加钢管内支撑围护方案,根据基坑开挖监测分析,证明方案合理可行,值得推广。

## 1 工程概况

兰州市轨道交通网络体系由 6 条线路组成,总长约 207 km,线网中 1、2、3 号线为中心城区线,总长约 90 km,共设车站 68 座;如图 1 所示,其中 1、2 号线东西贯穿主城区,构成了线网的骨架结构,3 号线为辅助线。作为城市线网,总长约 117 km 的 4、5、6 号线分别为中川线、榆中线和青什线,加强了中心城区同外围组团之间的联系。兰州地铁深基坑工程,标准站深度为 14 m~18 m;换乘节点处基坑深 20 m~24 m;其它附属设施基坑深 6 m~10 m 不等<sup>[11]</sup>。

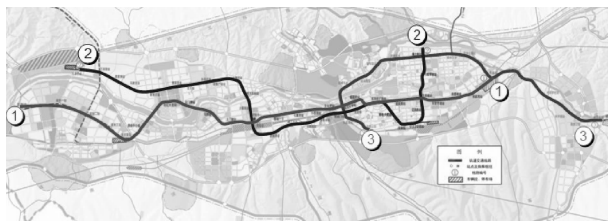


图 1 兰州市中心城区地铁线网规划图

2012 年—2016 年进行 1 号线一期工程陈官营至东岗段建设,全长约 26.53 km,共设置 20 个车站,均为地下站,以明挖法为主,涉及多个深基坑工程,需要进行深基坑支护。而兰州地区属于典型的黄土与湿陷性黄土地区,地形狭长,黄河穿城而过,沿黄河两侧都是山坡,市区可建设面积小、建筑密度大,拟修建的地铁 1 号线沿线环境条件紧张复杂,高楼林立、管线密集,沉降变形要求严格。支护设计需要考虑支护结构选型、支护结构内力和变形分析、基坑开挖对周边既有建筑物和地下管线的影响、地下水处理措施的选择等诸多方面。

## 2 基坑围护结构方案比选

兰州地铁基坑开挖层内的黄土在自重压力或土自重压力与附加压力下遇水浸湿后,结构迅速破坏,产生显著的附加下沉;另外前已述及,卵石层中的细砂在基坑降水时易产生管涌,导致卵石层及上部土层变形,引起上部建筑发生沉降,基坑底部的强风化泥岩自身富含裂隙水,加之风吹日照,迅速呈软塑或流塑状,土体抗力骤减,严重时将会导致桩撑支护结构失效,所以充分进行深基坑支护选型分析显得尤为重要。

本地区基坑支护通常在环境条件允许的场地,采用坡率法加土钉墙或复合土钉墙进行支护,环境条件较为紧张的场地采用上部土钉墙放坡加下部桩锚联合支护,环境条件特别紧张场地采用桩锚垂直支护<sup>[4]</sup>。然而由于放坡开挖施工空间大、需要场地较大,不适合周边环境紧张的兰州城区地铁基坑施工。结合本地区深大复杂基坑工程理论研究与设计实践<sup>[3-5]</sup>,典型基坑工程见表 1,兰州地铁深基坑必须选择不放坡开挖且在围护结构的保护下施工。

### 2.1 土钉墙围护结构

土钉是一种发展相对成熟的原位加筋技术,与混凝土面板有效连接后,二者共同防护已开挖土体,适用基坑深度一般为 6 m~12 m、土层一般为标准贯入击数  $N$  值大于 5 的砂质土或  $N$  值大于 3 的黏性土。天然状态下的黄土具有较强的结构性,自身直立性较好,采用土钉墙支护在西北地区已被广泛应用;但对于地铁车站主体基坑来说,位移控制较严或地下水影响较大,无法采用。另外,虽然预应力锚杆施工机械简单,能充分发挥土体本身的抗剪强度,可经济有效地保持结构的稳定,防止结构转动、倾倒、位移等。但是基坑周边环境限制较严格、预应力损失风险过大,即附属设施的浅基坑可酌情采用此

支护结构型式或复合土钉墙支护。因为目前土钉墙支护设计仍以承载力计算来判定基坑是否稳定,基坑变形尚停留在经验界定阶段,未能将变形和稳定

性有效联系,对土钉墙或复合土钉墙支护结构稳定性分析不够深入,常导致土钉墙基坑失稳的事故出现<sup>[4-5,12]</sup>。

表 1 兰州地区典型支护结构实例

项目名称	位置	基坑概况	主要支护结构形式
甘肃省商会大厦基坑	兰州市城关区雁滩家园小区东侧	基坑深 20 m,开挖面积 201.8 m × 67.8 m	排桩 + 三道预应力锚索
兰州中医骨伤科医院综合住院楼基坑	兰州市城关区雁滩路	基坑深 6 m、10.8 m、15 m	浅坑采用土钉墙,深坑上部采用混凝土板墙下部采用桩锚支护
兰州红楼时代广场基坑	兰州市城关区南关十字东南角	基坑深 19.3 m,开挖面积 120 m × 70 m	排桩 + 三排预应力锚杆
兰州伊真置业广场基坑	兰州市城关区甘肃省供销社西侧	基坑深 15.8 m	上部土钉墙下部桩锚
兰州庙滩子 7 号地块旋转车道基坑	兰州市靖远路派出所北侧	基坑深 15.6 m	排桩 + 三排预应力锚杆

## 2.2 地下连续墙围护结构

地下连续墙是用机械施工方法成槽浇灌钢筋混凝土形成的墙体,国内外越来越多的工程中将支护结构和主体结构相结合设计,在正常使用阶段承受永久水平和竖向荷载,称为“两墙合一”。其良好的止水效果,可以避免卵石层降水引起的地面或周围建筑沉降问题,另外,其地层适用性强,墙体刚度大,抗变形效果好,一般用于对抗渗透要求比较严格和对周边建筑沉降要求较高的基坑工程。但地下连续墙几乎是围护结构中最昂贵的一种,目前在西北地区应用不多;从变形角度考虑,可以以钢筋混凝土排桩代替,从防渗角度考虑,可以选择支护排桩之间施工高压旋喷桩解决。

## 2.3 排桩加预应力锚杆围护结构

本地区大型复杂深基坑支护主要以桩锚支护结构为主<sup>[4]</sup>,其有效地克服了传统刚性支挡结构施工进度慢、质量不易控制、结构稳定性差等缺点,地层适应性强,可主动控制土体位移。但是目前深基坑桩锚支护结构理论体系中经验因素较多,特别是岩土工程界对深基坑的关注焦点已逐渐从传统的承载力与稳定性分析转移到位移控制的设计问题,传统的极限状态设计方法不能考虑基坑位移的变化或预应力施加对土体应力场的改变,没有体现预应力的积极作用,这显然是不合理的<sup>[13]</sup>。同时,对于嵌固深度计算,单支点桩锚支护结构采用传统的等值梁法确定、多支点桩锚支护结构采用圆弧滑动简单条分法按整体稳定条件确定,另外,基坑开挖过程中桩身实际反弯点位置及变化规律等急需通过现场实测进行验证。故从位移控制和周边环境角度考虑,兰

州地铁基坑支护不宜采用桩锚支护结构。

## 2.4 排桩加内支撑围护结构

由于钢筋混凝土排桩加内支撑的支护体系适用于平面形状规则且狭长的基坑,且钢支撑可循环使用、降低造价,钢支撑的构架受力状态简明,便于掌握其应力状态,所以桩撑支护体系在地铁车站深基坑的支护设计中得到了广泛的应用<sup>[14-15]</sup>;同时,钢筋混凝土排桩地层适用性较强(适用于填土、一般黏性土、黄土、砂类土等地层)、施工工艺相对成熟,桩身刚度较大,在支点的作用下,抗变形能力强,特别是有时支护排桩可以用作主体结构的一部分,安全经济。另外,理论计算相对可靠,一部分是稳定性验算,采用极限平衡理论,另一部分是排桩和内支撑内力及变形计算。

兰州地铁基坑开挖深度较深、周边环境条件要求较严,土钉墙支护难以满足变形要求,不予考虑;锚杆支护虽然可以给基坑开挖或基础施工提供宽敞的作业面,但是与内支撑相比,其隐蔽施工的质量相对较差,预应力一旦损失过度,基坑变形将无法控制,另外,基坑四周的地下室及管线等也限制了其应用范围,特别是兰州地区的卵石层中,锚杆成孔相对困难、不利于缩短工期,故不宜采用预应力锚杆支护结构。从安全稳定角度来看,地下连续墙比钢筋混凝土排桩加预应力锚拉围护结构和钢筋混凝土排桩加内支撑围护结构更具优势,但是在同样满足安全开挖的前提下,后者工艺简单、经济可行;钢管内支撑刚度大,控制基坑变形效果较好,可以循环利用,因此,兰州地铁车站主体围护结构采用钻孔灌注桩加钢管内支撑作为围护结构。

### 3 基坑施工监测

车站主体为地下两层双柱三跨(部分区段为三柱四跨)的结构形式,净长为 305.15 m,标准段净宽为 21.60 m,底板埋深约为 17.19 m~18.70 m,结构顶板覆土深度约为 2.75 m~3.49 m,采用明挖顺做法施工。结合工程经验和计算<sup>[4,11]</sup>,主体围护结构采用  $\Phi 800 @ 1400$  钻孔灌注桩 + 三道  $\phi 609$  内支撑

(标准段),桩长 22.34 m,嵌固深度 5.0 m。第一、二、三道支撑设计轴力分别为 750 kN、1 380 kN、1 216 kN,预加轴力分别为 300 kN、552 kN、487 kN。基坑支护设计参数如表 2。为了检验设计方案是否合理,根据信息化施工要求,在兰州地铁世纪大道站进行了试验段支撑体系及周边环境监测,基坑监测点剖面布置图如图 2 所示。

表 2 基坑支护设计参数表

土层名称	厚度 /m	重度 $\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	渗透系数 /( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ )
1-1 杂填土	0.8~4.1	17.0	0	12	5~8
1-2 黄土状土	0.8~5.0	17.7	17	27	3~5
2-10-3 卵石	1.4~3.9	23.0	0	40	50~60
2-10-4 卵石	3.1~7.3	23.5	0	40	50~60
3-11 卵石	未揭穿	25.0	20	43	45~55

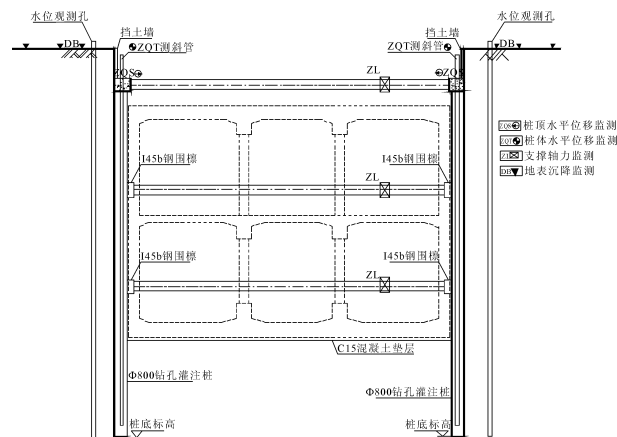


图 2 基坑测点剖面示意图

典型测点 ZQT-12 的桩体测斜结果见图 3,其中正值表示向坑内位移,负值表示向坑外位移。基坑开挖初期,坑外土体产生侧压力较小,故桩体侧移较小,上部位移约在  $-1 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm}$  之间变化,部分负值或为施工干扰所致。随着基坑的开挖,围护桩体向基坑方向产生侧向位移,随着支撑的安装,水平位移得到了很好的控制,位移明显地变小。此过程中,桩身变形曲线逐渐向“大肚”形变化,最大水平位移发生的部位随之下移,桩顶水平位移随时间变化不是很大,这与采用钢支撑快挖快撑方案、适时地沿钢支撑轴向施加预应力有关。

通过对桩顶水平位移、地表沉降、桩体深层水平位移和内支撑轴力监测数据综合分析,发现在支护桩悬臂阶段,随着基坑开挖深度的增大,桩顶水平位移不断增大且增大值由上至下减小,随着内支撑的

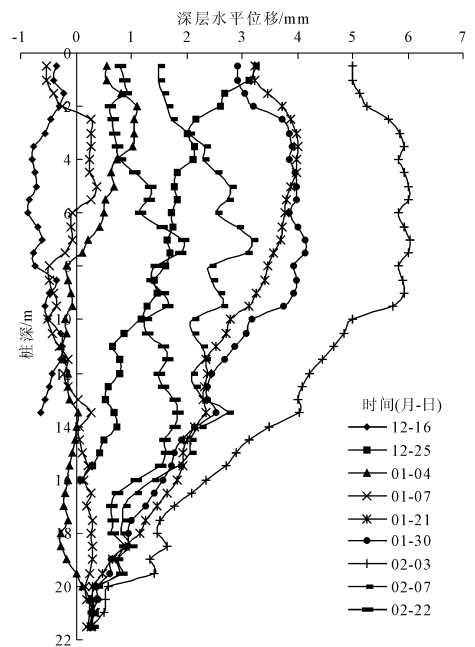


图 3 桩体深层水平位移变化曲线

施工,桩体不同深度位移变化与悬臂阶段不同,逐渐呈“)”形变化。各开挖阶段水平位移与深度变化和内支撑及预应力的施加有关,土体位移沿基坑周边的分布并不均匀,基坑中部圈梁位移最大,阴角位移小,呈现出明显的时空效应,但最大值低于规范计算值,说明钢支撑对桩顶位移约束作用显著。基坑开挖初期,基坑较浅,基坑外侧土体沉降量较小,地表沉降曲线基本不变;随着基坑开挖深度的增加,最大地表沉降位置开始向远离基坑边缘方向移动,基坑周边土体出现沉降—隆起—沉降—隆起—沉降状

态。随着基坑的开挖,围护桩体向基坑方向产生侧向位移,此过程中,桩身最大水平位移位置相应下移,变形曲线逐渐向“)”形过渡;支撑轴力监测数据显示,内支撑体系很好地限制了基坑侧向位移;但是由于场地地质条件的不确定性、基坑周边不可预见的外载影响,使得围护结构受力变得复杂。但通过试验段施工,总体而言,钻孔灌注桩加钢管内支撑围护结构满足位移和变形的要求,说明原设计方案合理。

## 4 结 论

(1) 通过对复合土钉墙、地下连续墙、桩锚和桩撑四种围护方案的对比,根据试验段围护结构的计算和施工监测结果可知,兰州地区地铁车站基坑围护采用钻孔灌注桩加钢管内支撑方案很好地控制了基坑变形,成功地解决了湿陷性黄土地区地铁深基坑支护难题。

(2) 通过信息化施工,发现围护桩体位移和内支撑轴力实测数据均小于设计值,说明原设计方案可以进一步优化。

(3) 采用钢支撑快挖快撑方案可很好地限制基坑侧向位移;基坑施工过程中,应减小悬臂阶段持续时间,尽早施工内支撑且适当施加预应力,加快基础施工进度,防止因土体流变而产生较大的位移。

### 参考文献:

[1] 刘建航,侯学渊.基坑工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2009.  
[2] 孔令伟,陈正汉.特殊土与边坡研究进展综述报告[C]//第十一届全国土力学及岩土工程学术论文章摘要

集,兰州,2011.

- [3] 周勇,朱彦鹏.兰州地区深基坑支护技术探讨[J].兰州理工大学学报,2007,33(5):109-113.  
[4] 杨校辉,朱彦鹏,郭楠,等.西北地区某大型深基坑群优化设计与施工分析[J].岩土工程学报,2014,36(S2):165-173.  
[5] 朱彦鹏,叶帅华,莫庸.青海省西宁市某深基坑事故分析[J].岩土工程学报,2010,32(S):404-409.  
[6] 薛丽影,杨文生,李荣年.深基坑工程事故原因的分析与探讨[J].岩土工程学报,2013,35(S1):468-473.  
[7] 吴楠.地铁深基坑建设期动态风险监控体系研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(3):697-704.  
[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基坑支护技术规程:JGJ 120-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
[9] 胡浩,李兴高.管井井点结合排水沟在复杂城市环境地铁车站基坑工程降水中的应用[J].土木工程学报,2015,48(S1):217-221.  
[10] 瞿成松.上海地铁四号线董家渡修复段基坑降水实录[J].岩土工程学报,2010,32(S2):339-342.  
[11] 郭楠.兰州地铁车站某深基坑桩撑支护结构施工监测与数值模拟分析[D].兰州:兰州理工大学,2014.  
[12] 张玉成,杨光华,吴舒界,等.土钉支护结构变形与稳定性关系探讨[J].岩土力学,2014,35(1):238-247.  
[13] 王邓曙,朱彦鹏.附加应力法在预应力锚杆支护结构稳定性分析中的应用[J].工程力学,2014,31(4):196-202.  
[14] 陈秋南,周国华,张帆,等.湿陷性黄土地区地铁深基坑支护设计[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2009,24(1):49-52.  
[15] 任建喜,冯晓光,刘慧,等.地铁车站深基坑围护结构变形规律监测研究[J].铁道工程学报,2009(3):89-92.

(上接第64页)

[9] 郭伟亮,滕军,容柏生,等.高层斜交网格筒-核心筒结构抗震性能分析[J].振动与冲击,2011,30(4):150-155.  
[10] 庞瑞,梁书亭,冷斌,等.单向斜交网格复杂超限高层结构动力弹塑性时程分析[J].振动与冲击,2013,32(9):202-209.  
[11] 黄志斌,程健,黄俊,等.斜交网格结构体系在罕遇地震作用下的动力弹塑性性能研究[J].土木工程信息技术,2014,6(5):1-5.  
[12] 中华人民共和国建设部.高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
[13] 中国建筑标准设计研究院.高层建筑钢-混凝土混合

结构设计规程:CECS230:2008[S].北京:中国计划出版社,2008.

- [14] 中华人民共和国建设部.建筑抗震设计规范:GB50010-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
[15] 中华人民共和国建设部.混凝土结构设计规范:GB50010-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
[16] 陆新征,叶列平,缪志伟.建筑抗震弹塑性分析[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.  
[17] 高德志,侯晓武,赵继.MIDAS Building中的动力弹塑性分析功能[J].建筑结构,2012,42(S2):217-220.  
[18] 陈虎,杜军,钟玉柏,等.某带局部转换层高层建筑的抗震分析[J].建筑结构,2012,42(S2):251-256.