

西宁地区常用基坑支护结构对比分析

黄雪峰^{1,2}, 杨校辉¹, 朱彦鹏¹, 张世径¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 解放军后勤工程学院军事建筑工程系, 重庆 401311)

摘要: 针对深基坑工程设计和施工现状, 通过近年西宁地区基坑支护工程实践, 对比分析了本地区常用的 4 种支护结构的作用机理、适用范围、设计现状及存在的不足, 并为今后进一步研究指出了方向。实践证明: 在西宁地区, 当基坑周边环境允许放坡、深度不大于 12 m、地下水位较低且经济性要求较高时, 应首选土钉墙支护; 当基坑周边环境允许、深度大于 12 m、对位移控制要求较严、地下水位较高时, 应优先选用复合土钉墙或框架预应力锚杆支护, 尤其作为永久性支护结构且考虑美观、造价时, 框架预应力锚杆优于复合土钉墙; 当大型复杂深基坑周边环境狭小、位移要求严格、锚杆长度或桩径选择受限、地质情况复杂时, 选择上部土钉下部桩锚联合支护较合理。最后, 结合目前西宁地区大型复杂深基坑工程实例, 对其应用情况进行了说明。

关键词: 非饱和黄土; 深基坑工程; 支护结构形式; 方案比选

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0432-08

作者简介: 黄雪峰(1960-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 1982年毕业于成都理工大学工程地质专业, 主要从事特殊土与非饱和土、桩基工程等方面的教学与研究工作。E-mail: hxfen60@163.com。

Comparative analysis of common retaining structures in Xining area

HUANG Xue-feng^{1,2}, YANG Xiao-hui¹, ZHU Yan-peng¹, ZHANG Shi-jing¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401311, China)

Abstract: Based on the design and construction status of deep excavations and engineering practices of supporting and retaining structures in Xining area in recent years, the mechanism, application scope, design status and shortcomings of 4 kinds of supporting and retaining structures are compared and analyzed for the future research direction. The practices show that when the surrounding environment of excavations allows step-slope, the depth is not more than 12 m, the groundwater level is low and the economic requirements are high, soil-nailing wall should be used as the first choice. When the surrounding environment of excavations allows step-slope, the depth is more than 12 m, the requirements of displacement are strict and the groundwater level is high, composite soil-nailing wall or grillage with prestressed anchors should be used as the first choice. Considering beauty and cost, the grillage with prestressed anchors is better than the composite soil-nailing wall, especially as a permanent support. When the surrounding environment of large complex deep excavations is narrow, the requirements of displacement are strict, the anchorage length or pile diameter selection is limited and the geological conditions are complex, it is more reasonable to choose the combined support of soil-nailing wall at the upper part and anchor pile at the lower part. Finally, combined with the current large complex examples of deep excavations in Xining, the relevant applications are illustrated.

Key words: unsaturated loess; deep excavation; retaining mode; scheme optimization

0 引言

西宁市地处青海省东部, 黄河支流湟水河上游, 湿陷性黄土层厚度较大, 土的黏粒含量少, 天然含水率低, 湿陷量大, 湿陷敏感^[1]。随着西部大开发战略的实施和青藏铁路的建成运营, 西宁的城市化步伐逐渐加快, 在用地日益紧张在西宁, 地下空间充分开发

也已成为一种趋势。高层建筑的多层地下室、地下商场、地下车库、地下隧道及地下人防等都面临着深基坑工程, 其规模和深度也在不断加大。

目前, 该地区深基坑工程处于边实践边摸索阶段, 支护结构设计理论远远落后于工程实践, 尚缺乏成熟技术规范的指导, 主要是用半理论半经验的方法解决

表 1 西宁地区典型支护结构实例

Table 1 Typical examples of retaining structures in Xining area

项目名称	位置	建构筑物底面积/m ²	基坑开挖深度/m	主要支护结构形式
隆豪国际#1~#4商住楼基坑工程	西宁市七一路和五一路交叉口	#120×75, #225×46,	22.2	上部框架预应力锚杆下部桩锚
		#316×54.4, #425.6×48.2	8	放坡土钉墙或桩锚
文景丽都#2楼基坑工程	西宁市夏都大街南侧	29.5×49.2	17	放坡土钉墙和上部土钉墙下部桩锚
青藏铁路花园四期住宅楼(#1~#13)基坑工程	西宁市国家经济技术开发区	共352660.34	15	框架预应力锚杆
西宁火车站站前休闲广场基坑工程	西宁火车站前的建国桥上下游各600 m的湟水河河段的南侧	共153924.63	20	复合土钉墙
水井巷中央商务区一期基坑工程	西宁市水井巷与人民街交汇处东北角上, 东至北斗宫街, 北至西关大街	27996.34	21	复合土钉墙和上部土钉墙下部桩锚
新宁广场地下停车场基坑工程	原西宁市新宁广场	46132.88	21~23	复合土钉墙、框架预应力锚杆和上部土钉墙下部桩锚
		地下空间工程72000	11~16	放坡土钉墙
西宁火车站综合改造工程总体项目基坑工程	原西宁市火车站	隧道交通工程9522.7	9~11(局部18.5)	放坡土钉墙
		轨道交通工程22172.7	26(局部27)	上部土钉墙下部桩锚

问题, 导致深基坑事故时有发生。轻者会使整个基坑四周土体内倾、变形; 严重时会导致整个基坑倒塌损坏、周边建筑物或地下设施开裂倾斜甚至倒塌, 不但影响工期、耗费大量抢修资金, 而且可能发生人员伤亡^[2]。另一方面, 本地区黄土通常处于非饱和状态, 吸力较大, 结构性强, 直立性好, 按传统土压力计算的主动土压力过于保守^[3], 导致许多支护结构的内力远低于设计值, 造成材料严重浪费, 深基坑工程支护费用居高不下^[4]; 有关深基坑方面的理论和支护结构内力实测研究也远远不能满足工程实际的需要, 这对现有设计理论、设计方法提出了严峻挑战。因此, 结合地区经验, 对西宁地区常用基坑支护结构进行对比分析很有必要。

1 西宁地区支护结构特点及存在问题

与东南沿海一带相比, 西宁地区支护结构稍微简单, 但也有自身特点。西宁多民族聚集, 全域三面环山围绕, 构成一个由西北向东南延展、以西宁盆地为代表性地段的湟水中上游河谷盆地。地势西北高、东南低, 东西狭长, 形似一叶扁舟, 房屋建筑大多依山而建、密度较大, 这给深基坑支护带来了不利影响。此外, 西宁地区支护结构的特点及难点有: ①施工场地狭小, 周边环境复杂, 需考虑对周边建(构)筑物、市政设施的影响; ②基坑开挖深度和规模逐渐增大, 见表 1, 多数工程要求充分利用地下空间; ③当地经济发展相对落后, 现有施工条件和技术水平较低; ④投资人对经济性、工期要求越来越严。

针对近年在西宁地区所做的大量深基坑支护设计

工作, 笔者认为目前西宁地区基坑支护主要存在以下几个问题: ①部分建设单位不重视基坑支护工作, 为了省钱、省事, 要么认为没必要进行基坑支护, 要么直接交予施工单位自行处理; ②施工单位良莠不齐, 部分单位挂靠资质、技术经验不足、管理混乱, 部分单位为了经济利益, 施工存在严重安全隐患, 事故一旦发生, 损失惨重^[5]; ③设计单位要么欠缺地区经验, 设计过于保守, 导致严重浪费, 要么设计水平有限, 过分依赖于商业软件, 计算模型选择和参数取值不当, 特别是非饱和和黄土土压力问题, 至今仍采用针对饱和土建立的经典土压力模型, 导致计算值与实测值差异较大^[6]; ④监测单位对土体、支护结构、周边环境相互作用的动态信息化施工把握不够到位, 不能很好地把理论分析、经验估计与土体变形、破坏过程等结合起来。近年来, 西宁地区逐渐积累了一套具有自身特色的支护结构经验, 但一直未见总结升华, 可查文献几乎空白, 无法与其它地区相互交流, 致使支护结构设计水平进步较慢, 极不利于地区经济发展。因此, 笔者结合近年多项大型复杂深基坑支护结构设计经验和施工跟踪, 典型实例见表 1, 对该地区 4 种常用基坑支护结构做出如下对比分析。

2 西宁地区常用支护结构

以往西宁地区的支护结构多采用以挡土墙等刚性支撑结构为主的重力式挡墙、悬臂式挡墙、扶壁式挡墙, 或者采用悬臂式支护桩、桩板支撑系统或地下连续墙等。这些结构使用范围较广, 对它们的工作原理研究比较深入, 但是它们的共同缺点是施工速度慢、

施工难度大、造价高,结构的稳定性较差,因此,这些支护体系已逐渐淘汰,或不被单独使用。考虑到前一节所述西宁地区支护结构特点及难点和常用土体参数,见表2。该地区支护结构越来越多的倾向于柔性支护,并取得了一定的经验,如土钉墙支护、土钉墙加预应力锚杆复合支护、框架预应力锚杆支护、上部土钉下部桩锚联合支护。

表2 西宁地区常用土体参数

Table 2 Common parameters of soils in Xining area

土层	一般层厚 /m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	界面黏结强度 τ/kPa
①杂填土或非饱和黄土	0~5	10~20	15~20	0~10	30~50
②卵石	3~10	15~25	35~45	0~10	70~100
③强风化泥岩	3~10	15~25	20~30	10~30	80~110
④中风化泥岩	5~15	20~30	25~35	25~35	100~130
⑤微风化泥岩	>10	20~30	25~35	30~40	120~160

2.1 土钉墙支护

土钉墙支护技术是在原位土体内放置一定长度和密度的钢筋或花钢管,形成复合土体,以弥补土体自身强度的不足,并在坡面上制作与土钉连在一起的钢筋网片并喷射混凝土面层,以阻止土体的滑移和坍塌。较适用于黏性土、弱胶结砂土和西北地区的黄土与湿陷性黄土地区;不宜用于含水丰富的分细砂层、砂砾卵石层和淤泥质土。目前本地区常用设计参数为:一般成孔100~130 mm,土钉钢筋采用 $\Phi 18\sim 25\text{HRB335}$ 级钢筋,倾角 $10^\circ\sim 20^\circ$,沿钢筋每隔1.5~2.0 m设置对中支架,梅花形布置,纵横向间距为1.0~2.0 m,长度为1.0~1.2倍基坑开挖深度,基坑上口和下口处土钉长度根据实际情况适当减短。土钉注浆压力0.4~0.6 MPa,水灰比控制在0.45~0.5范围内。常采用 $\Phi 6.5\text{HPB235}$ 级钢筋@200~250编制钢筋网,横纵各1 $\Phi 14\text{HRB335}$ 级钢筋加强,间距与土钉相同;面层采用C20混凝土喷80~100 mm厚。在卵石或砂岩层等成孔困难的土层中,土钉采用跟管钻进成孔,也可采用冲击锚杆机将DN48锚管打入。根据土钉墙整体稳定性验算结果再进一步修正土钉设计参数。

因其造价低廉,施工速度快等优点,当基坑深度不大于12 m、环境条件允许时,宜采用上大下小的放坡系数分级;当基坑深度进一步增加、对位移控制较严或地下水影响较大时,不宜采用。通过现场测试,目前对土钉的工作性能有了较全面的认识^[7],设计时主要存在的问题就是土钉墙支护以稳定分析来控制,尚未发展到以变形来控制的阶段,对土钉墙稳定性分

析不够深入,常导致工程事故的发生。

2.2 土钉墙加预应力锚杆复合支护

土钉墙加预应力锚杆支护简称复合土钉墙支护,是在土钉墙中交叉布置适当数量的锚杆,并对锚杆施加一定吨位的预应力。预应力锚杆的有效锚固段将拉应力荷载向远离滑移面以外的稳定土体中传递,以有效减少土体变形。锚杆或土钉正常工作时,在某一状态下,需要为保持土体稳定而提供的最小拉力称为真值^[8]。当锚杆锁定值小于真值时,锚杆对土钉的影响不大;当锚杆锁定值大于真值时锚杆承担了一部分本来应该由土钉承担的荷载,导致土钉受力减小,相当于上下排土钉受力不太合理的土钉墙。锚杆设计参数类似于土钉墙支护,一般成孔130或150 mm,钢筋采用 $\Phi 18\sim 36\text{HRB335}$ 级螺纹钢,倾角 $15^\circ\sim 35^\circ$,沿钢筋每隔2.0 m设置对中支架,上、下排垂直间距不宜小于2.5 m,水平间距取决于支护结构的高度和每根锚杆所能承受的拉力,通常为2.0~3.0 m,长度由自由段和锚固段组成,自由段应超过破裂面1.0 m以上,有效锚固长度由计算求得,但其最小长度不宜小于4.0 m,最大不宜大于10.0 m。腰梁常采用两根背靠背的槽钢。注浆压力为0.4~0.6 MPa,水灰比常为1:0.5。土钉的极限承载力一般为100~200 kN,锚杆设计承载力不宜超过2~3倍土钉极限承载力,一般为100~300 kN,锁定力一般为设计值的70%~85%,并且不小于100 kN。为了更好的控制基坑变形,锚杆设置在基坑中上部,不宜设置在第一排或基坑底部。

因其造价相对较低、施工工艺相对简单、可以较好地控制基坑变形等优点,在环境条件允许时,宜采用上大下小的放坡系数分级,故可以满足一般地层条件不同实际工程的需要;当基坑深度进一步增加、对位移控制较严或地下水位较高时,不宜单独使用。目前,关于锚杆的系统研究仍较为缺乏,直接研究较为少见,仍处于局部发现问题局部探讨解决的阶段^[9];对于锚杆的内力分析、预应力损失机理和临界锚固长度等方面尚没有统一的理论依据,可见锚杆设计理论还不成熟,有待于深入地研究^[10]。

2.3 框架预应力锚杆支护

框架预应力锚杆支护结构是近几年随着柔性支护结构的发展而提出的一种新型支护结构。它由框架、挡土板、预应力锚杆和墙后土体等组成。挡土板所受的土压力通过锚头传至钢拉杆,再通过拉杆周边砂浆的握裹力传递至水泥砂浆中,然后通过锚固段周边地层的摩擦力传递到锚固区的稳定地层中,有效地控制了土体位移。当基坑开挖深度较大而采用悬臂式挡墙、土钉墙、复合土钉墙等支护形式较难满足基坑

稳定性时,宜采用框架预应力锚杆柔性支护结构。与复合土钉墙中锚杆不同的是,锚杆施工应自上而下分层开挖分层锚固。框架横梁、立柱配筋由计算求得,间距一般为 2.5 或 3.0 m,截面尺寸除了应满足强度、刚度和抗裂等要求外,其宽度不宜小于 300 mm,高度不宜小于 400 mm,作为永久支护时混凝土采用 C30 级,作为临时支护时混凝土不应小于 C20。现浇挡土板的厚度不宜小于 100 mm,混凝土温度伸缩缝不宜大于 20~25 m。立柱基础位于稳定的岩层内,可采用独立基础、条形基础,采用 C15 混凝土或 M7.5 水泥砂浆砌片石。各级平台顶面宜用 C15 混凝土封闭,其厚度为 150 mm,并设置 2% 横向排水坡度。

框架预应力锚杆克服了传统支护结构的支护高度受限制、造价高、工程量大、稳定性差等缺点,可以有效控制基坑侧移,在周边环境允许放坡、工期不受限制且地下水位较低时,宜代替传统支护结构使用。框架预应力锚杆柔性支护结构由于其诸多优点在西宁地区多项基坑开挖支护工程中得到了成功应用,但是它的作用机理和理论研究还不很成熟,特别是目前的设计多注重于强度设计,而对支护结构水平位移问题很少讨论^[11]。

2.4 上部土钉下部桩锚联合支护

基坑工程同一剖面中,上部采用土钉或复合土钉下部采用桩锚支护结构组合形成的支护体系叫上部土钉下部桩锚联合支护。桩锚支护体系通过施加预应力,使支护结构依靠自身的结构刚度和强度承受土压力,限制基坑外土体的变形,属于主动支护结构。土钉支护通过提高土体的强度,使支护材料与土体形成共同作用体,伴随基坑的侧移,土钉逐步发挥相应的抗力,属于被动支护结构。工程实践中,因锚杆设计长度或桩径选择受限时,可采用此支护体系,以解决外锚空间限制、桩身抗弯能力不足的问题。土钉、锚杆设计基本同前所述,桩身锚杆常为 1~4 排。排桩采用机械或人工成孔,直径一般为 800 或 1000 mm,主筋由计算求得,一般为 $\Phi 22$ 或 25HRB335 级钢筋,经过大量工程实践,考虑经济性常在受拉一侧弯矩最大处加密配筋,内箍为 $\Phi 14@2000$ mm(与主筋焊接),螺旋箍筋常采用 $\Phi 6.5$ HPB235 级钢筋@300;桩身混凝土标号为 C25~C30。桩顶冠梁宽同桩直径,高为 500 mm,一般只是作为增加支护结构的整体性的构造措施,提高安全储备。根据其整体稳定性、抗倾覆稳定性、抗隆起验算结果再进一步修正锚杆和排桩设计参数。

这种支护结构上部通过采用坡度尽可能缓的土钉墙放坡,卸除部分土体荷载,有效减小主动土压力;下部采用在桩身受拉一侧的最大弯矩处局部加密配

筋。实践表明:其占用空间小、不受地下水影响、施工速度快,受力性能较好、可有效控制基坑开挖过程中产生的变形,适合本地区大型深基坑开挖支护。目前,在桩锚支护方面已取得了一些有益成果^[12-14],但是关于非饱和黄土基坑悬臂排桩、单支点和多支点排桩支护结构土压力计算模型、排桩的最小嵌固深度和反弯点位置变化规律、相邻锚杆加预应力过程中锚杆内力传递特性和不同层锚杆的应力损失规律、预应力损失最小的加力办法等方面的研究匮乏。

以上 4 种基坑支护形式均属于柔性支护结构,其有效地提高了土体的整体刚度,弥补了土体抗拉抗剪强度低的弱点,显著地改善了基坑抗变形和抗破坏的能力,在基坑可能出现破坏时,土体不会发生突发性的崩塌,减少了基坑施工中的风险、事故。笔者经过本地区多年的工程实践发现,典型支护实例见表 1。合理选择上述 4 种支护结构或其组合形式,在满足安全的前提下可有效节约建设资金;反演分析结果,为进一步探索非饱和黄土土压力模型积累了有益资料。综上,对于西宁地区,当基坑周边环境允许放坡、深度不大于 12 m、地下水位较低且经济性要求较高时,应首选土钉墙支护;当基坑周边环境允许、深度大于 12 m、对位移控制要求较严、地下水位较高时,应优先选用复合土钉墙或框架预应力锚杆,尤其作为永久性支护且考虑美观、造价时,框架预应力锚杆优于复合土钉墙,但需考虑框架预应力锚杆工序较复杂;当大型复杂深基坑周边环境狭小、位移要求严格、锚杆设计长度或桩径选择受限、地质情况较复杂时,选择上部土钉下部桩锚联合支护较合理。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

西宁新宁广场地下停车场基坑位于西宁市新宁广场,设计 3 层地下结构,筏板基础。基坑东西方向长 367.3 m,南北方向宽 125.6 m,基坑面积约为 46132.88 m², $\pm 0.000=2258.8$ m,基坑开挖深度为 21~23 m。基坑西邻 G277 新宁路主干道,基坑开挖下口线距离新宁路为 10.5 m;北邻五四大街主干道,基坑开挖下口线距离五四大街为 6.1 m;东邻交通巷,基坑开挖下口线距交通巷 3.9 m;南邻广场路,地下 2 m 左右有市政排污管网,基坑开挖放坡时已占用广场路北侧 1.6 m,广场路南为青海省博物馆,其采用井桩基础。平面图如图 1 所示。基坑工程安全等级为一级。

3.2 水文地质与工程地质条件

地下水位稳定水位埋深 10.4~15.3 m,丰水期地

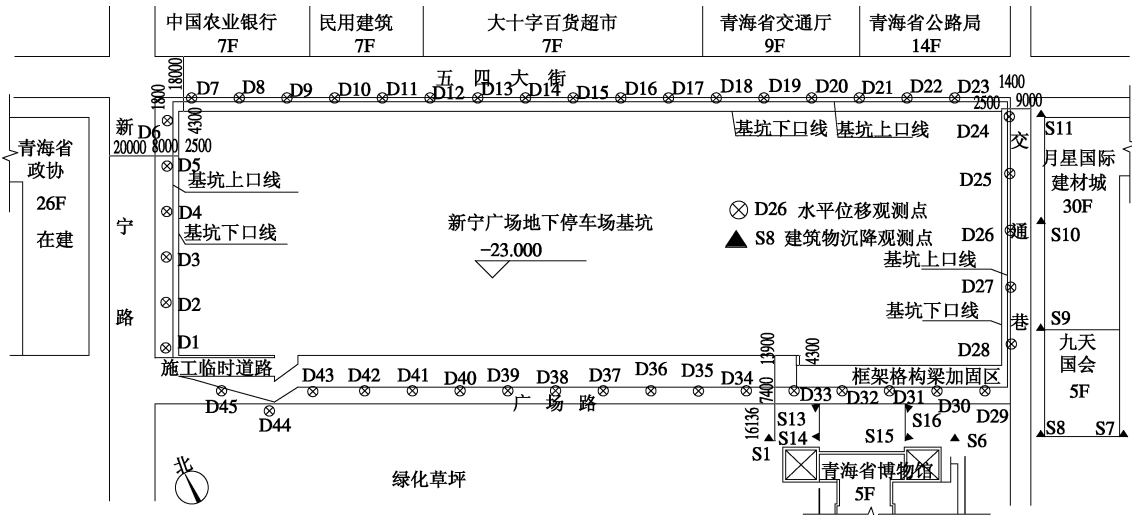


图1 新宁广场地下停车场基坑平面图

Fig. 1 Plan of underground parking of excavation of Xinning Square

下水位会上涨约为 0.5~1.0 m。场地地层自上而下为：①杂填土 Q_4^{ml} ，以粉土为主，含有少量砾石、煤渣、砖块等建筑垃圾；②黄土状土 Q_4^{al+pl} ，黏性土为主，局部含有少量粉土，干强度中等，坚硬，黄土为 III 级自重湿陷，累计自重湿陷量为 0~745.5 mm；③卵石 Q_4^{al} ，骨架由石英岩、花岗岩等硬质岩组成，稍密—中密；④第三纪强风化泥岩 N，原岩结构已遭破坏，基本风化成黏土状，一般呈坚硬—可塑状，岩石破碎，岩芯多呈碎石状及短柱状，遇水极易软化，长时间暴露在空气中易崩解。各层土的力学指标见表 3。

表3 土层物理力学性质指标

Table 3 Physical and mechanical indexes of soils

土层	层厚 /m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	压缩模量 /MPa	m $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-4})$
①	3	15	19	10	5.6	6320
②	6.5	16.5	26	15	8.98	13520
③	4	20	40	5	34	29600
④	20	19	25	28	6.43	9780

3.3 支护方案

从开挖深度、周边环境、地质条件等因素来看，该基坑工程均属于大型复杂深基坑工程，根据以往的经验，经过多次方案论证比较，最终确定：东侧、西侧基坑上部（桩顶标高 2252.8 m 以上）采用坡度尽可能缓的土钉墙支护，设置 2 排土钉（基坑南高北低，南侧局部设置 3 排土钉），基坑下部（2252.8 m 以下）采用排桩+4 排预应力锚杆支护结构，桩长 23.5 m，嵌固深度 6.5 m；类似基坑东、西侧支护结构，北侧基坑上部（桩顶标高 2249.8 m 以上）采用土钉墙支护，土钉墙坡度 1:0.47，考虑场地高差，基坑北侧西部局部设置 4 排土钉，基坑下部（2249.8 m 以下）采用桩

锚支护体系，桩长 20.5 m，嵌固深度 6.5 m，设置 2 排预应力锚杆；在桩身受拉一侧最大弯矩处采用局部加密配筋，桩间喷射 100 mm 厚混凝土面层，剖面图如图 2 (a) 所示。南侧基坑支护主要应保护好青海省博物馆和广场路南侧地下 2 m 左右的市政排污管网，尽量减小打桩对青海省博物馆地基土的扰动；经论证确定南侧基坑采用 3 级放坡土钉墙支护结构，坡度尽可能缓，以卸除土体荷载。自然地面 $\pm 0.00\sim-7$ m， $-7\sim-15$ m， $-15\sim-23$ m 设 3 级土钉墙，坡度 1:0.47， -7 ， -15 m 处设置 1.5 m 宽平台。当基坑开挖至 -15 m 时，南侧卵石层渗水较大，且根据基坑开挖情况发现强风化泥岩分层产状与斜坡倾向大体一致，故将第 3 级土钉墙支护方案变更为预应力排桩加锚杆支护形式。随着基坑开挖，基坑南侧东段桩顶位移较大，为不影响青海省博物馆主体结构，采取堆土反压措施后，又将博物馆宽度范围采用框架预应力锚杆加固第 1 和第 2 级土钉墙，剖面图如图 2 (b) 所示。

3.4 支护效果

基坑周边共设置位移观测点 45 个，基坑东侧和南侧邻近建筑关键部位设置沉降观测点 10 个，2011 年 8 月 18 日又在青海省博物馆北侧楼梯处增设 4 个沉降观测点，具体位置如图 1 所示，观测从 2011 年 7 月 12 日开始。

各观测点最大累积水平位移为 40.4 mm，最小累积水平位移为 6.9 mm，位移观测结果见图 3。东侧一般水平位移为 5~10 mm，说明此支护形式达到了预期目的；北侧一般水平位移为 10~20 mm，中部 D15 在 2011 年 11 月 30 日累积位移为 30.4 mm；西侧和南侧一般水平位移为 20~33 mm，其中南面基坑的西侧部分位移偏大，D37、D40、D43 在 2011 年 11 月 8 日

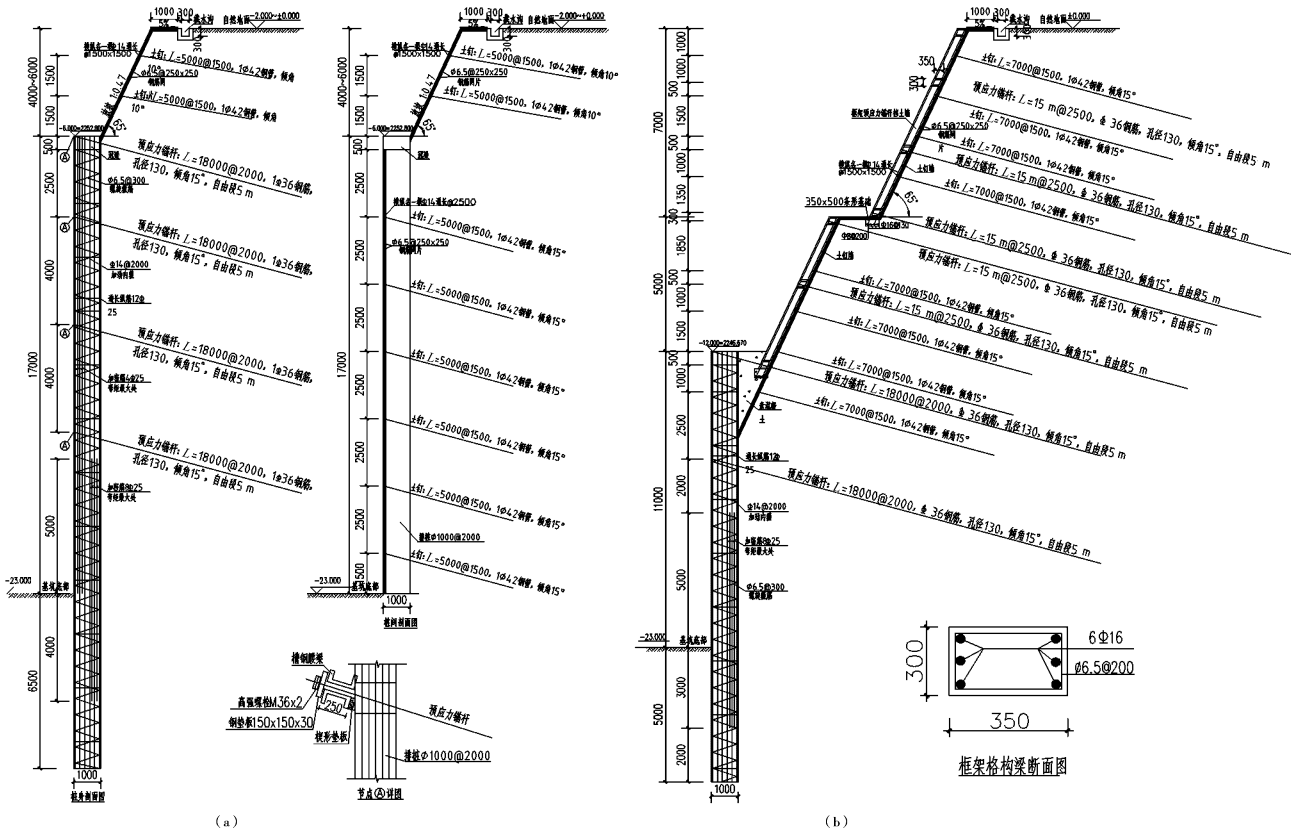
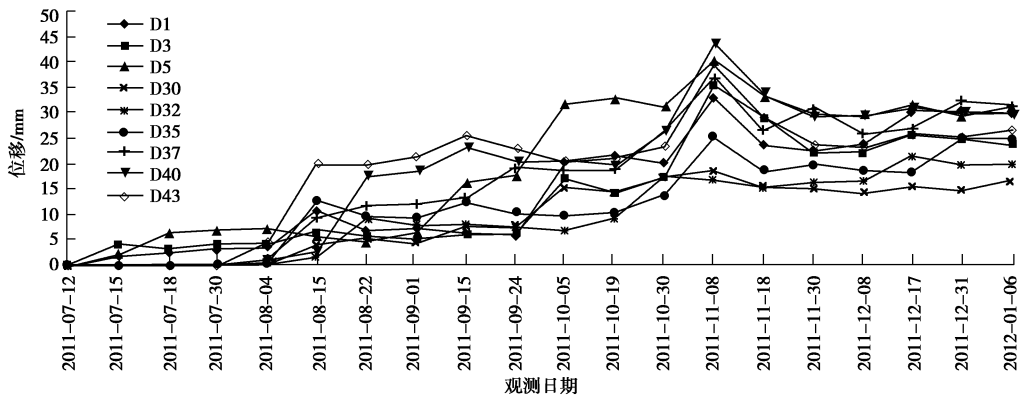
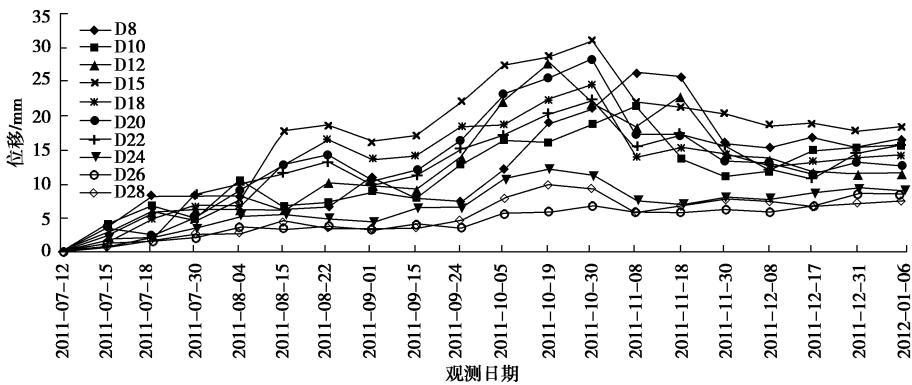


图 2 基坑支护剖面图

Fig. 2 Section of retaining structure of excavation



(a) 基坑西侧南侧位移观测累积值



(b) 基坑北侧东侧位移观测累积值

图 3 基坑累积位移观测结果

Fig. 3 Observed results of accumulated displacement of excavation

累积位移超过了警戒值 35 mm, 查明原因后及时采取了加固措施。最小累积沉降量为 2 mm (S10 点), 最大累积沉降量为 29 mm (S13 号观测点), 只有 S13、S14、S15 及 S16 号观测点累积沉降稍大。原因是基坑南侧青海省博物馆的附属楼梯与主体建筑是分开的, 且该处工人临建厕所排水不畅和长期广场绿化浇水引起上层黄土湿陷, 但对青海省博物馆主体建筑没有影响, 说明本支护方案基本满足了安全要求。本基坑根据西宁地质条件, 合理选择多种支护结构形式, 节约了大量资金, 同时为本地区大型深基坑设计、优化积累了宝贵经验。

4 结 论

(1) 经过多年实践发现, 本文上述土钉墙支护、土钉墙加预应力锚杆复合支护、框架预应力锚杆支护、上部土钉下部桩锚联合支护结构较适合于西宁地区地质, 合理选择可较好地满足安全经济性要求。

(2) 在西宁地区, 当基坑周边环境允许放坡、深度不大于 12 m、地下水位较低且经济性要求较高时, 应首选土钉墙支护; 当基坑周边环境允许、深度大于 12 m、对位移控制要求较严、地下水位较高时, 应优先选用复合土钉墙或框架预应力锚杆, 尤其作为永久性支护且考虑美观、造价时, 框架预应力锚杆优于复合土钉墙, 但需考虑框架预应力锚杆工序较复杂; 当大型复杂深基坑周边环境狭小、位移要求严格、锚杆设计长度或桩径选择受限、地质情况复杂时, 选择上部土钉下部桩锚联合支护较合理。

(3) 随着西宁地区经济的发展, 基坑周边环境越来越复杂, 开挖深度和规模逐渐增大。为此, 建设单位应合理协调支护结构安全、经济要求; 施工、监理单位要加强自身管理、杜绝偷工减料; 设计单位需结合地区经验, 努力探索非饱和和黄土土压力模型, 在基于变形控制的土钉墙稳定性分析, 预应力锚杆的内力传递特性、临界长度及预应力损失规律, 排桩最小嵌固深度和反弯点位置等方面加强实测研究, 以完善基坑设计理论。

参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1996. (LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996. (in Chinese))
- [2] 王曙光. 基坑支护事故处理经验录[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. (WANG Shu-guang. Foundation pit accident treatment experience record[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [3] 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摘要集. 兰州, 2011. (KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. General report of research progress on special soil and slope[C]// The set of academic paper of the national soil mechanics and geotechnical engineering in 11 th. Lanzhou, 2011. (in Chinese))
- [4] 朱彦鹏, 王秀丽, 于劲, 等. 悬臂式支护桩内力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 236 - 239. (ZHU Yan-peng, WANG Xiu-li, YU Jin. Experimental study on internal force of cantilever retaining piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 236 - 239. (in Chinese))
- [5] 朱彦鹏, 叶帅华, 莫庸. 西宁某基坑事故分析与处理[M]// 基坑工程实例 3. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010, 263 - 270. (ZHU Yan-peng, YE Shuai-hua, MO Yong. A foundation pit accident analysis and processing of Xining[M]// Engineering Examples of Deep Foundation Pit (Part 3). Beijing: China Architecture & Building Press, 2010, 263 - 270. (in Chinese))
- [6] 黄雪峰, 李佳, 崔红, 等. 非饱和和原状黄土垂直高边坡潜在土压力原位测试试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 500 - 506. (HUANG Xue-feng, LI Jia, CUI Hong, et al. Distribution characteristics of earth pressure for unsaturated intact loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 500 - 506. (in Chinese))
- [7] 张明聚, 郭忠贤. 土钉支护工作性能的现场测试研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 319 - 323. (ZHANG Ming-ju, GUO Zhong-xian. Research on behaviors of soil nailing by field test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 319 - 323. (in Chinese))
- [8] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [9] 曾宪明, 林大路, 李世民, 等. 锚固类结构杆体临界锚固长度问题综合研究—国内相关研究进展[J]. 预应力技术, 2009, 1: 5 - 11. (ZENG Xian-ming, LIN Da-lu, LI Shi-min, et al. Comprehensive research on critical anchor length problem of anchor rod body class structure—Domestic related research progress[J]. Prestressed Technique, 2009, 1: 5 - 11. (in Chinese))
- [10] 程良奎. 岩土锚固研究与新进展[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2005, **24**(21): 3803 - 3810. (CHENG Liang-kui. Research and new progress in ground anchorage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(21): 3803 - 3810. (in Chinese))
- [11] 周 勇, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆柔性支护结构坡面水平位移影响因素[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 470 - 476. (ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. Influencing factors of horizontal displacement of wall facing of grillage flexible supporting structure with prestressed anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 470 - 476. (in Chinese))
- [12] 王立明, 高广运, 郭院成. 单支点桩锚支护结构的侧移计算[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(4): 510 - 513. (WANG Li-ming, GAO Guang-yun, GUO Yuan-cheng. Lateral calculation on single pile anchor supporting structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **1**(4): 510 - 513. (in Chinese))
- [13] 杨 敏, 冯又全, 王瑞祥. 深基坑支护结构的力学分析及与实测结果的比较[J]. 建筑结构学报, 1999, **20**(2): 68 - 77. (YANG Min, FENG You-quan, WANG Rui-xiang. Comparison with the mechanical analysis and the test result of deep foundation pit bracing structure[J]. Chinese Journal of Building Structures, 1999, **20**(2): 68 - 77. (in Chinese))
- [14] 何建明, 白世伟. 深基坑排桩—圈梁支护结构协同作用研究[J]. 岩土力学, 1997, **18**(3): 41 - 46. (HE Jian-ming, BAI Shi-wei. Synergy research on deep foundation pit row pile-ring beam supporting structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, **18**(3): 41 - 46. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)