

DOI: 10.11779/CJGE2014S1036

# 西宁地区几个基坑工程问题分析与处理

杨校辉<sup>1, 2</sup>, 朱彦鹏<sup>1, 2</sup>, 郭楠<sup>1, 2</sup>, 黄雪峰<sup>1, 3</sup>

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 后勤工程学院建筑工程系, 重庆 401311)

**摘要:** 为了解决用地紧张和道路交通拥挤问题, 西北地区很多城市开始大规模修建高层建筑和地铁, 需要开挖大量深基坑。传统支护结构的应用受到限制, 而桩锚支护由于具有主动改善基坑土体的受力状态、限制基坑侧壁水平位移的优点, 在西北黄土地区深基坑支护中得到广泛应用。本文借助西宁地区几个采用土钉墙、复合土钉墙、预应力锚杆、支护桩等结构型式进行支护, 发生变形垮塌的典型基坑工程案例, 详细分析了其设计和施工中存在的问题, 给出了相应的解决方案。同时, 总结了当前类似基坑工程的设计、施工和管理等方面的不足, 指出了今后应重点研究: 建立基于位移控制的非饱和黄土地区支挡结构土压力计算模型, 完善土压力计算方法; 加强深大基坑支护结构的现场测试研究, 建立考虑预应力锚杆、支护桩和土体之间协同工作的动态稳定性分析模型。最后指出了常用支护结构施工中的关键质量控制点。

**关键词:** 深基坑; 变形; 分析与处理; 建议

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S1-0208-06

**作者简介:** 杨校辉(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土与特殊土地基处理、支挡结构等方面的研究工作。

E-mail: yxhui86@126.com。

## Analysis and treatment for several engineering problems of foundation pits in Xining area

YANG Xiao-hui<sup>1, 2</sup>, ZHU Yan-peng<sup>1, 2</sup>, GUO Nan<sup>1, 2</sup>, HUANG Xue-feng<sup>1, 3</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401311, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of land shortage and road traffic congestion, many cities in the northwest area of China begin to construct large-scale high-rise buildings and subways, which need excavate a lot of deep foundation pits. The application of the traditional supporting structures is restricted, while the pile-anchor supporting structures are widely used in deep and large scale foundation pits in northwest loess area owing to the advantages of initiativly improving the stress state of pit soils and limiting the horizontal displacement of pit sidewall. Based on deformation of typical foundation pits and collapse of several bracing projects in Xining area, such as the soil-nailing wall, composite soil-nailing wall, prestressed anchor, supporting pile, the existing problems in the design and construction are analyzed, and the corresponding solutions are proposed. At the same time, the lack of the current and similar excavation engineering in such aspects as design, construction and management is summarized, and the future researches should include: (1) establishment of soil pressure model based on displacement control of retaining structures in unsaturated areas, and improvement of soil pressure method; (2) strengthening of the field tests on retaining structures for deep and large foundation pits and establishment of dynamic stability model considering cooperative work of prestressed anchors, piles and soils. Finally, the common key quality control points are put forward in the construction of retaining structures.

**Key words:** deep foundation pit; deformation; analysis and treatment; suggestion

## 0 引 言

随着西北地区经济的迅速发展, 城市建设中基坑规模、深度和复杂性日益增大, 与新型柔性支挡结构

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAK12B07); 教育部创新团队支持计划项目(2013 IRT13068)

收稿日期: 2014-07-28

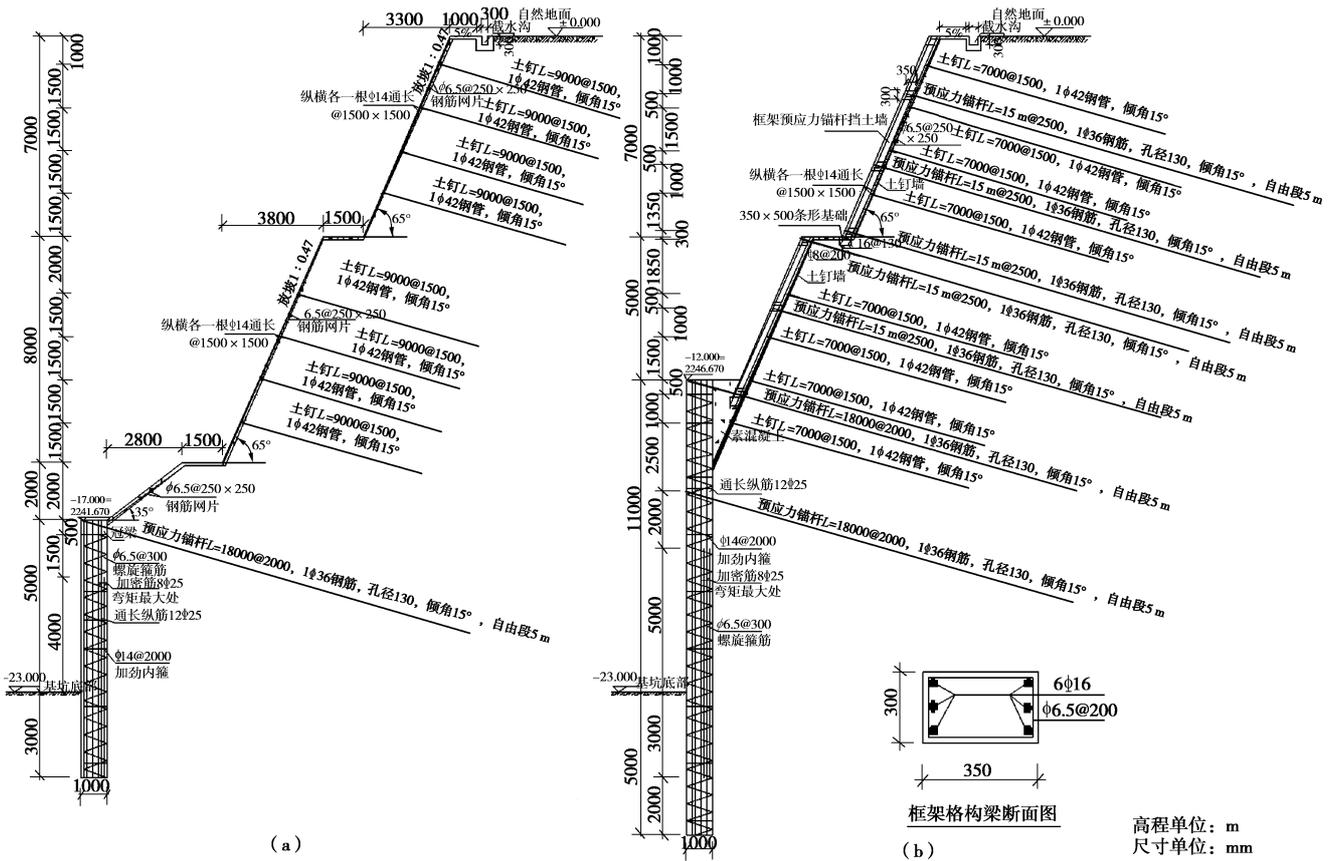


图 1 基坑加固剖面图

Fig. 1 Profile of reinforcement of foundation pit

相比, 传统刚性支挡结构施工速度慢、施工难度大、造价高, 不利于位移控制和结构稳定性差等特点, 因此逐渐被新型柔性支挡结构所取代<sup>[1-2]</sup>。根据近年大量深基坑工程的理论研究和设计实践发现<sup>[3-6]</sup>, 本地区乃至全国的深基坑工程均处于边摸索边实践阶段, 缺乏合理规范的指导, 实际设计和施工采用半理论半经验的方法解决工程问题, 导致深基坑事故时有发生, 轻者使基坑四周土体内倾、变形, 重者导致整个基坑倒塌损坏, 不仅耗费大量抢救资金、严重影响工期, 甚至发生人员伤亡, 产生不良的社会影响<sup>[7-8]</sup>。如 2009 年西安地铁一号线洒金桥站基坑发生坍塌事故, 造成 2 人死亡; 2009 年西宁市商业巷南市场的佳豪广场 4 号楼基坑发生局部坍塌事故, 造成 8 人死亡<sup>[9]</sup>; 2011 年兰州市酒钢大厦北侧局部基坑坍塌, 导致紧邻的甘肃省地勘局招待所发生严重变形; 2013 年西安地铁三号线发生塌方事故, 造成 5 人死亡, 等等。

综上, 笔者对近年西宁地区发生的几个典型基坑支护变形或滑塌案例进行分析, 指出了设计和施工中的失误或不足; 同时总结了目前深大复杂基坑研究和实践的关键点, 可为类似基坑工程提供警示。

### 1 变形或滑塌案例

#### 1.1 案例一

西宁某大型地下停车场设计三层地下结构, 基坑开挖深度为-23 m, 基坑工程安全等级为一级。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; 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。地下稳定水位埋深 10.4~15.3 m, 丰水期地下水位会上涨约为 0.5~1.0 m。

发生问题一侧基坑原设计采用 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 ±0.00~-7 m、-7~-15 m、-15~-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, 此侧卵石层渗水严重, 坑顶土钉墙位移有增大趋势, 限于篇幅, 监测数据未列出。故将第三级土钉墙支护方案变更为预应力排桩加锚杆支护形式, 如图 1 (a) 所示。但为了追赶工期, 预应力锚杆未施加预应力便开始下挖, 随着基坑开挖, 桩顶位移持续增大, 坑顶局部发生滑塌, 见图 2, 采取

堆土反压措施后，又采用框架预应力锚杆加固 1、2 级土钉墙，沿第二级土钉墙坡脚重新打桩，剖面图如图 1 (b) 所示。



图 2 坑壁土钉墙滑塌

Fig. 2 Collapse of soil-nailing wall in foundation pit

分析认为导致此基坑问题的主观原因是：第一，第三级土钉墙变更施工时正直西宁冬休，业主和施工单位为赶工期，旋挖机昼夜成孔，特别是成孔后未及时浇筑混凝土，后期浇筑时塌孔严重，造成断桩（挖除反压土时发现），见图 3；第二，基坑开挖前预应力锚杆未来的及施加预应力，预应力基本没有起到应有的作用，导致桩顶位移较大；第三，如此深大复杂基坑采用三级简单土钉墙放坡的方案值得商榷。客观原因是：开挖发现强风化泥岩分层产状与斜坡倾向大体一致，见图 4，或为老滑坡的潜在滑动面，由于基坑开挖时坡脚卸载，致使滑坡；基坑上口处临建设施排水不畅和长期绿化浇水引起上层黄土严重湿陷，共同导致坡顶土钉墙滑塌。



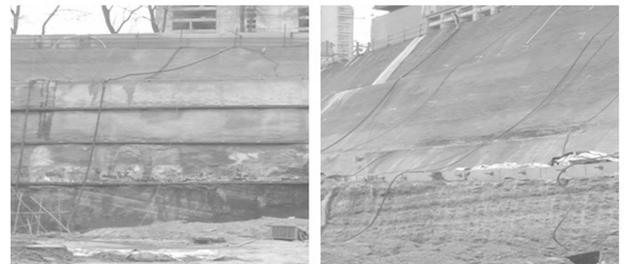
图 3 塌孔导致断桩

Fig. 3 Broken pile induced by hole collapse

### 1.2 案例二

西宁某高层住宅基坑工程南侧为新建商铺，现场为空旷场地，基坑深-13.2 m，基坑安全等级为二级。场地地层自上而下由第四纪 (Q<sub>4</sub>) 冲洪积地层和第三

纪 (N) 泥岩组成，其岩石特性为：①杂填土 (Q<sub>4</sub><sup>ml</sup>)，稍湿—湿，以粉土为主，含建筑垃圾，土质不均，结构松散，平均厚度为 0.93 m。②黄土状 (Q<sub>4</sub><sup>lal+pl</sup>) 稍湿—湿，稍密—密实，以粉土为主，夹有红色粉质黏土薄层，夹有薄层粉质黏土，含水率高，部分已达到饱和，湿陷性消除。②-3 层细砂 (Q<sub>4</sub><sup>lal+pl</sup>) 稍湿—湿，稍密，以细砂为主，含少量砾石，黏性土含量较少，主要矿物成分为石英、长石、云母，厚度为 0.6 m。③层卵石 (Q<sub>4</sub><sup>lal+pl</sup>)：稍湿—湿，稍密—密实，以中密为主，成分以变质岩为主。④层第三纪泥岩 (N)：强风化，稍湿—湿，可塑—坚硬，组织结构部分破坏，岩体破碎，风化裂隙发育，浸水易软化。⑤层第三纪泥岩中风化 (N)：稍湿，干，质地坚硬，较完整。



(a) 基坑西侧软弱夹层产状 (b) 基坑南侧软弱夹层产状

图 4 强风化泥岩产状

Fig. 4 Attitude of strong weathered mudstone

发生问题一侧基坑原设计采用复合土钉墙支护，见剖面图 5。但是施工单位为增大工作量，以坑顶建筑物距坑边较近为借口，多方“努力”后，将方案变更为桩锚垂直支护，桩径 1 m，桩间距 2 m；预应力锚杆长 15 m、约位于桩顶下 3 m 处。当基坑挖至-7~8 m 左右时，腰梁随桩间土一同滑落，局部支护桩严重变形、内倾，部分桩体折断、预应力锚杆被整体拔出，见图 6。

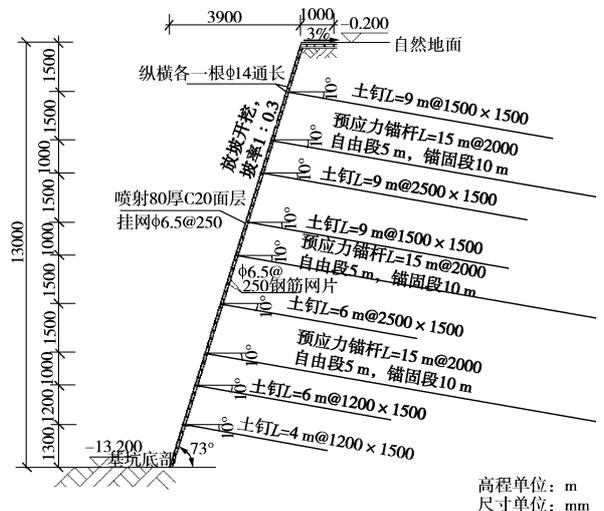


图 5 原支护剖面图

Fig. 5 Profile of original support



图 6 桩锚基坑滑塌

Fig. 6 Collapse of foundation pit with pile-anchor

发生事故后, 专家组会商认为原因主要有: 第一, 预应力锚杆施工不合格。杆体加工时未设自由段, 锚杆在注浆时, 对锚杆全长进行了注浆, 人为使得预应力锚杆变成了土钉, 随着基坑的开挖, 预应力基本在滑移面以内被主动土压力抵消; 同时, 对部分预应力锚杆被整体拔出这一现象调查发现, 锚固段注浆不足, 施工时没有对锚杆进行二次压力注浆, 导致锚固体与土体界面间的侧摩阻力远小于设计值。第二, 预应力施加不规范。由于锚杆注浆不合格, 无法拉拔到设计要求的预应力值, 因此施工单位只是形式上挂了槽钢腰梁、锁定了锚头, 根本没有达到预应力的设计意图; 且两槽钢腰梁缝隙偏大, 横向连接件间距较大, 因此随着基坑的开挖, 桩后主动土压力增大, 桩体内倾, 锚头和钢垫板从槽钢腰梁间拔出或脱落, 未能起到主动控制基坑变形的作用。第三, 支护桩施工时偷工减料严重, 桩体所用混凝土强度低于设计要求, 桩身配筋进行了不同程度抽减, 同时设计要求的国标钢筋也被替换为了非标钢筋。第四, 为了追赶工期, 施工单位在锚杆注浆后的三四天里, 就开始对基坑进行了过度的开挖, 此步基坑直接开挖约 3~4 m, 桩间土钉均未施工。由于锚固段注浆体的强度没有达到设计要求, 加之锚杆注浆不合理、预应力施工不到位等问题, 导致坡体发生了严重的侧向变形事故。根据现场条件, 专家组建议在桩锚支护结构后侧 5 m 处再次施工支护桩, 第一道预应力锚杆位于桩顶下 2 m, 第二道预应力锚杆位于桩顶下 5 m。加固施工时监理全程跟踪旁站控制施工质量, 严格按此方案施工, 后续开挖正常。

1.3 案例三

西宁海湖新区某高层商住楼工程, 地下为 2 层的混凝土框架结构, 基础形式为桩筏基础, 原设计基坑

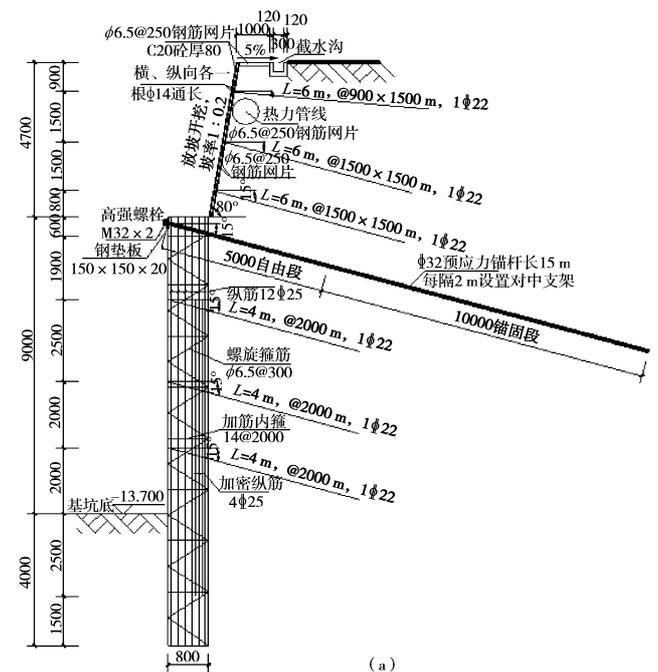
开挖深度-13.7 m。基坑开挖范围内不受地下水的影响, 场地土土层基本物理参数见表 1。

表 1 土层基本物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	土层平均厚度/m	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	界面黏结强度 $\tau/\text{kPa}$
①杂填土	2.5	17	8	27	40.0
②湿陷性黄土	11.0	15	2	30	50.0
③非湿陷性黄土	6.0	16	18	25	60.0
④卵石	5.5	21	5	35	170.0

发生滑塌一侧基坑原设计采用本地区正在大力推广的上部放坡开挖+下部排桩预应力锚杆联合支护形式<sup>[8]</sup>, 且在桩身弯矩最大处加密配筋, 见剖面图 7(a)。基坑开挖将至底标高时, 业主要求原 2 层地下室改为 3 层, 基坑需再下挖 2 m。考虑原支护桩嵌固深度大大减小、桩长无法再增加, 且桩顶预应力拉拔试验合格, 为防止基坑发生变形, 同时应使施工具备可操作性, 设计单位决定在桩身中下部增设 2 道预应力锚杆, 即将最初的桩锚支护形式改变为类框架预应力锚杆型式, 这也是本地区处理此类问题的常用方法, 见剖面图 7(b)。但业主和施工方为节省支护费用, 将加固方案的第二排锚杆取消, 只施工了基坑底部的第三排锚杆。当基坑开挖至 15.7 m 时, 基本稳定, 但在施工桩筏基础过程中, 为了施工桩顶承台, 基坑底部平均再次降低约 1 m, 此时原钻孔灌注桩嵌固段深度仅剩 1 m。在旋挖钻进行基础桩钻孔时, 局部桩间土体发生滑塌, 如图 8 所示, 为保证本侧基坑安全, 业主迅速堆土反压, 控制了基坑进一步变形。



(a)

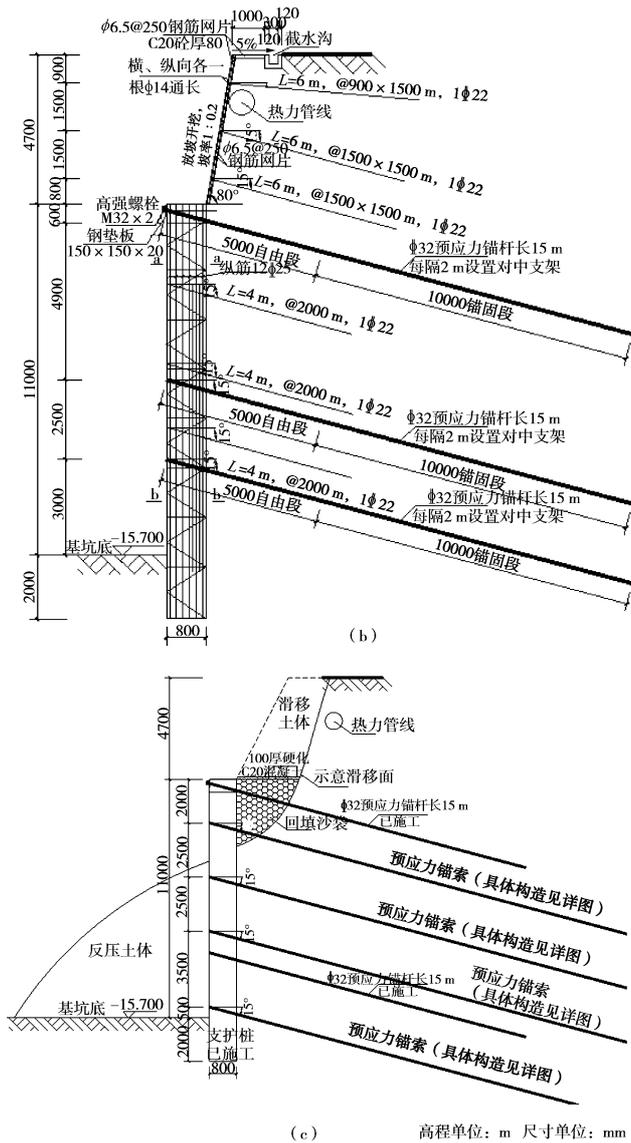


图7 桩锚支护剖面图

Fig. 7 Profile of pile-anchor supporting structures

专家组分析认为，原基坑支护设计方案及补强方案基本可行，造成基坑局部桩间土体滑塌的主要原因是：①建设单位一味控制成本，对基坑工程在施工过程中的关键环节不够重视，存在侥幸心理，擅自取消第二道预应力锚杆施工，致使桩锚支护失效；一味地赶工期，催进度，施工质量无法保证。②施工单位对基坑工程的复杂性缺乏了解，补强施工时未施工中间排预应力锚杆，对基坑继续超挖将会引起的危害认识不足。③已施工的预应力锚杆和土钉质量未必达到要求，调查发现施工单位为了节约检测费用，未能按规范<sup>[10]</sup>和设计要求的对预应力锚杆进行足量检测。根据现场滑塌情况，判定已施工的两排预应力锚杆均已失效，但支护桩身未见明显裂痕，仍可继续使用，于是在桩身外侧增设4道预应力锚索，形成“框架预应力锚索支护结构”，见图7(c)。按此方案将基坑加固后，直至基坑回填，基坑监测基本正常。



图8 局部土体滑塌

Fig. 8 Sliding of local soil

## 2 讨论

根据近年在西北地区大量深基坑支护设计和施工跟踪经验，笔者认为目前本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；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，过分依赖于计算软件，计算模型选择和参数取值不当，特别是非饱和黄土土压力问题，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<sup>[11]</sup>；④监测和监理单位对土体、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。

因此，今后理论研究方面急需加强常用支挡结构关键问题研究：①建立西北地区实用的基于位移控制的非饱和黄土主动土压力模型。传统的土压力模型是通过饱和土的抗剪强度模型来建立的，非饱和原状黄土的抗剪强度包括有效黏聚力 $c'$ 、有效内摩擦角 $\phi'$ 、基质吸力 $(u_a - u_w)$ 及黄土的结构强度等，其抗剪强度与传统的抗剪强度理论有较大区别，传统的土压力计算理论不能满足非饱和原状黄土基坑的计算要求。因为其理论的完全弹性、平面滑裂面假定等假设，使得实际土压力与计算土压力有较大偏差。②加强深大基坑支护结构的现场测试研究，尤其是本地区最常用的桩锚支护结构，应尽快探明预应力锚杆、支护桩与不同岩土体的作用机理，应力分布与传递规律，为设计确定锚杆临界长度和支护桩最大弯矩及最小嵌固段提供理论依据。另外，对于锚杆支护结构的稳定性计算，在考虑预应力对稳定性的影响时，尚没有有效的方法，尤其是采用圆弧滑移面计算支护结构的稳定性时，都是将锚杆当作土钉，采用规范中计算土钉墙的方法计算安全系数，这显然是不合理的。

同时, 施工过程严格控制也是保证支护效果的重要环节。如: ①土钉墙施工: 土钉成孔要严防塌孔, 当遇到杂填土层或砂卵石层塌孔时, 可采用套管跟进解决; 土钉钢筋应与钢筋网片和加强筋的有效焊接; 混凝土面板内应用砖块尽量填平, 不可填黑心棉、水泥袋等蓄水物质, 以免引起冻胀。②预应力锚杆施工: 成孔要求同土钉; 杆体焊接或套筒连接须牢靠, 对中支架禁止省去; 自由段要按设计要求使其充分自由, 抹黄油加套管; 预应力锚索加工要规范, “枣核”须形成, 导向帽、钢束线环和支撑架保证绑扎牢靠; 底部注浆和二次注浆压力应达到, 以确保锚固效果; 预应力张拉锁定须严格按规范执行, 做好  $Q-S$  记录。③支护桩施工: 桩位尽量保持直线, 便于后续冠梁施工; 成孔垂直度不得大于 3‰, 防止桩身倾斜导致基坑位移; 本地区常见的杂填土层或砂卵石层塌孔可通过旋挖钻加钢护筒或冲击钻加泥浆护壁等方法解决; 正负弯矩加密配筋布置要合理, 防腐除锈需重视; 成孔后混凝土浇筑要及时, 避免桩体蜂窝或断桩, 致使基坑位移, 严重时将引发基坑工程事故; 基坑开挖时, 桩身外皮不得预留土体, 以便预应力有效传递到桩身上; 破桩头后编冠梁前, 桩头须清理干净, 保证支护桩与冠梁形成统一体。

### 3 结 论

随着西北地区经济的发展, 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、经济性要求, 不可一味催赶工期; 施工要加强自身管理、杜绝偷工减料; 监理单位需增强责任意识, 积累当地经验, 尽力协调现场施工; 设计和研究单位需结合地区经验, 努力探索非饱和黄土土压力模型, 在基于变形控制的土钉墙稳定性分析、预应力锚杆的承载特性、排桩受力与变形等方面需加强实测研究, 考虑预应力作用的锚-土和桩-土共同作用研究需深入, 完善基坑设计理论。

#### 参考文献:

- [1] 朱彦鹏, 罗晓辉, 周 勇. 支挡结构设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (ZHU Yan-peng, LUO Xiao-hui, ZHOU Yong. Retaining structure design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 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 handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 朱彦鹏, 李 忠. 边坡土钉墙支护稳定性分析方法的改进及软件开发[J]. 岩土工程学报, 2005, 26(8): 939 - 943. (ZHU Yan-peng, LI Zhong. Improvement on stability analysis of soil nail in foundation excavations and its software development design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 26(8): 939 - 943. (in Chinese))
- [5] 朱彦鹏, 王秀丽, 周 勇. 支挡结构设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (ZHU Yan-peng, WANG Xiu-li, ZHOU Yong. Retaining structure design and calculating instructions[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [6] 杨校辉. 桩锚支护结构内力演化及受力特性对比研究(硕士学位论文)[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013. (YANG Xiao-hui. Comparative study on evolution of internal force and mechanical characteristics of pile-anchor retaining structure[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 黄雪峰, 杨校辉, 朱彦鹏, 等. 西宁地区常用基坑支护结构对比分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 432 - 439. (HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui, ZHU Yan-peng, et al. Comparative analysis of common retaining structures in Xining area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 432 - 439. (in Chinese))
- [9] 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(增刊 1): 404 - 409. (ZHU Yan-peng, YE Shuai-hua, MO Yong. Analysis and treatment of a deep foundation pit accident in Xining, Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 404 - 409. (in Chinese))
- [10] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [11] 黄雪峰, 李 佳, 崔 红, 等. 非饱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))

(本文责编 明经平)