

文章编号:1007-2993(2015)05-0223-07

第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告—— 基坑与边坡工程综述

刘荣毅¹ 王笃礼² 杜 策¹ 王小波²

(1. 中船勘察设计研究院有限公司, 上海 200063; 2. 中航勘察设计研究院有限公司, 北京 100098)

【摘要】 本次会议共收到基坑及边坡工程的论文 39 篇, 对大部分案例的特点进行简要的归纳和提炼。同时, 结合近年来国内基坑工程及边坡工程技术的发展, 对桩锚支护适用性、支撑形式的选择、边坡结构的形式、边坡稳定性评价方法、地下水控制、数值模拟模型选取等进行了探讨。

【关键词】 基坑工程; 边坡工程; 支护结构; 稳定性; 数值模拟

【中图分类号】 TU 473. 2; TU 413. 62 **【文献标识码】** A doi:10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2015. 05. 002

Excavation and Slope Engineering Review

Liu Rongyi¹ Wang Duli² Du Ce¹ Wang Xiaobo²

(1. China Shipbuilding Industry Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd, Shanghai 200063, China;

2. Avic Institute of Geotechnical Engineering Co., Ltd, Beijing 100098, China)

【Abstract】 The conference received 39 papers on the excavation engineering and slope engineering. This article briefly summarizes the characteristics of most of the cases. At the same time, combined with the development of excavation engineering and slope engineering in recent years, it discusses the applicability of the pile anchor support, strut form, slope structure, evaluation of slope stability, groundwater control, selecting the numerical simulation model and so on.

【Key words】 excavation engineering; slope engineering; supporting structure; stability; numerical simulation

1 概述

本次会议共收到有关基坑和边坡工程的论文 39 篇, 是上届论文数量的 2 倍多。其中基坑工程 33 篇, 边坡挡土墙 6 篇。基坑案例涉及的地区有北京、河北、浙江、广东、陕西、四川、吉林、甘肃、深圳、江苏、福建等省市, 覆盖面较广。与上届相比, 增录了西北及东北地区的基坑工程案例, 涵盖的范围更为广泛。所收录的案例中, 基坑深度最浅的约 4.95 m, 最深的 42 m, 有 4 个案例面积超过 5 万 m², 基坑面积最大接近 10 万 m², 远超以往案例。本次所收录的边坡案例中, 边坡高度最小的约 7 m, 最大的约 30 m, 有 1 个案例山体堆砌高度达 60 m, 占地面积约 20 万 m²。从本次会议收到的实录和近年来各地工程建设的情况看, 建筑边坡工程的系统性和复杂性与日剧增, 复杂、复合和超高建筑边坡工程数量大大增加^[1]。而多数基坑工程周边环境条件复杂, 部分基坑临近天然地基住宅、在建或者运营中的地铁, 开挖范围内土质条件多变, 体现了近年来基坑工程向着“深、大、难”的方向发展^[2]。

本次收录的基坑, 开挖深度普遍较深, 一级基坑所占比例较大。桩锚支护为主要的支护形式, 护壁

桩多为灌注桩, 成桩形式有人工挖孔、正循环、反循环、长螺旋等多种方式。此外还有采用钢板桩、三轴搅拌桩内插预应力工字型钢筋混凝土板桩(HCMW 工法)等形式。锚的方式有土钉、常规锚杆、扩大头锚杆等。多个案例中采用了几种工艺的组合, 具有一定的经济性。周边环境条件受限的基坑, 采用钢筋混凝土或者钢支撑作为水平向受力结构, 以解决锚杆或者锚索长度受限的问题。

同上届相比, 本届收录的案例增加了数值计算分析的文章, 将基坑同周边环境条件、地层联合建立模型, 分工况模拟基坑开挖对周边环境的影响, 比对基坑实测资料, 以此来指导基坑设计与施工。此方法体现了目前基坑工程的发展方向, 具有一定的代表性。

本次还收录了 4 篇基坑工程险情处理的案例, 造成险情的因素主要有地下水丰富、暴雨、地质条件复杂及设计施工等, 实录中记载了险情的发生、发展以及后续采取的处理措施, 并提供了大量监测数据, 具有一定的借鉴和警示意义。

本次收录的 6 项边坡工程中, 涵盖边坡的设计和施工以及勘察评价, 文章作者分别从边坡的勘察

评价、设计、施工等角度给大家提供了详细案例分析,都具有很好的借鉴作用。

2 工程实录内容简述

2.1 基坑工程

吕晶等报道的《壹方商业中心项目基坑支护工程》,该项目开挖深度 17 m,基坑面积接近 10 万 m^2 ,属于超大型基坑。其临近两条运营中的地铁线及换乘站,环境条件复杂。项目由深圳市勘察测绘院有限公司完成,比对最终监测结果,其支护设计和施工较为成功。

本项目浅部土质条件较差,淤泥质土厚度较大。周边环境条件复杂,对控制变形要求较高。设计单位根据业主的开发顺序,将基坑分为三个区:临近地铁区域采用咬合桩+内支撑的支护形式;远离地铁保护区的位置采用桩锚支护;两区中间预留 30~50 m 反压土体(中心岛)。在兼顾业主工期的同时,通过分区控制了周边环境的变形,同时降低了支撑体量,较为经济。临近地铁区域内撑采用了直径 67 m 和 42 m 双圆环支撑。

为研究深基坑分区施工对地铁的影响,采用 Midas/GTS 软件建立了三维模型进行分析,本构模型采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。模型综合考虑了基坑开挖对周边地铁隧道、换乘站的影响,通过分析计算,地铁隧道距基坑最近(13 m)处水平侧移 7 mm,车站沉降 3.4 mm,满足基坑开挖对地铁影响的控制要求。

此外,对监测变形同设计计算值进行了比较,说明了桩撑支护对位移的控制优于桩锚支护。

徐柯轶等报道的《炬日大厦地下室基坑支护工程实录分析》基坑面积 12167 m^2 ,开挖深度 12.8~14.2 m,核心筒落深 1.9~6.15 m。开挖范围内以透水性较强的粉砂、粉土为主,场地周边临近道路及管线,并有在建基坑工程,支护设计及施工难度均较大。此项目采用了三轴搅拌桩止水,钻孔灌注桩结合锚杆挡土的支护形式。其中对扩大头锚杆进行了抗拔试验,22 m 长,锚固段 5 m 的扩大头锚杆,试验极限抗拔力达到 800 kN,承载力较高。同时,钢绞线后期可以回收,减少了坑外留置永久地下障碍物。针对多层粉土含水层,采用坑内外降水结合悬挂式止水帷幕,确保锚杆在粉土层中的顺利施工,同时基坑开挖也能够顺利进行。

徐志明报道的《广乐安置小区基坑支护工程实录》,基坑面积 7 万 m^2 ,开挖深度 10.20~11.65 m,属于超大型基坑。开挖范围内分布有深厚的淤泥质粉质黏土层,土质软弱、低强度、高压缩性,工程性质

较差。场地周边分布有大直径供水管,需要重点保护。设计比选了逆作法、排桩+圆环支撑等形式后,采用在基坑东西向设置分隔墙,布置对撑的支护方式,分坑施工此基坑。由于采用了分隔墙,后期南北坑结构相接时,底板接缝处向下施工了混凝土换撑,凿除分隔墙后浇筑后浇带;中楼板采用预埋 H 型钢或者工字钢的方式做了后浇带换撑。最终监测结果显示,土体位移最大不超过 36 mm,地表最大沉降 23 mm,位移控制较好,证明分坑施工的效果比较好。

吕晶等报道的《深圳华润中心项目基坑支护工程》,基坑面积 55990 m^2 ,地下 4 层,开挖深度 24.44~30.34 m,属于超大超深基坑。临近基坑有待建及在建地铁车站,要求基坑设计使用年限 3 年。场地通过填海造地形成,浅部分布有深厚软土,填土中有石块分布,以上工况对设计及施工提出了较高的要求。本基坑主要采用了 3 种形式的锚索,充分利用了不同种类锚索的特点。首先,在建地铁线路区域,以地铁隧道为中心,有一定范围的保护区,锚索不能进入。此位置采用了扩大头锚索,长度相对较短,承载力较高;其次,基坑外为规划地铁车站区域,采用了日本 JCE 可回收锚索,确保后期地铁站施工时锚索不成为地下障碍物;最后,一般区域采用了普通预应力锚索,同样承载力情况下,长度相对较长。根据监测资料,扩大头锚索区域变形最小;普通预应力锚索在上部软土层区域变形较大,下部土体强度较高时,变形较小;日本的 JCE 可回收锚索在锚固力不高时合格率较高,锚固力增加至 600~650 kN 时,合格率较低。

武文全等报道的《深圳大冲旧改项目一期一标段基坑支护工程》,基坑面积 76990 m^2 ,开挖深度 9.77~17.52 m,属于超大基坑。基坑东侧分布有古庙;南侧临近运营中的地铁线路;西侧临近已建居民小区,环境条件苛刻。项目采用勘察、设计、施工一体化的方式运作。设计根据周边环境条件的不同,分别采用了复合土钉墙、桩锚、排桩+内支撑、双排桩等多种支护形式,确保安全的前提下兼具很强的经济性。施工过程中遇到土方超挖导致的基坑变形突变、老旧建筑桩基遗留、浅部填土块石影响成桩等问题。由于勘察设计施工一体,其施工过程同设计紧密联系,遇到的问题很快都得到了解决。根据监测结果,除了复合土钉墙段受台风影响变形较大;古庙位置受锚索自由端渗漏影响产生了均匀沉降,其余侧变形较小。

章善锐报道的《超深基坑支护工程施工技术》,该基坑位于珠江口,同大海仅隔一条马路。项目开挖深度 17.9 m,采用地下连续墙结合三道混凝土支撑支护。由于地层的特殊性,地墙成槽采用了铣槽机,工字型钢板接头。支撑布置采用平面双圆环,地下三层未采用栈桥,施工方解决了土方开挖及坡道拆换撑等工程问题,对于类似大型基坑,有一定借鉴意义。

吴铭炳报道的《中旅城二期深基坑工程实录》,项目最初设计时为地下 3 层结构,待支护桩施工完成约 90 % 后,业主方更改了地下结构层数,由 3 层变为 4 层,这对支护设计提出了不小的挑战。原支护设计采用排桩结合 2 道钢筋混凝土支撑的支护形式,原钻孔灌注桩桩长不足,不满足基坑深度增加后坑底抗隆起、抗倾覆等各项稳定性。结构变更之后,支护设计对原支护进行了补强,利用原有支护桩,在其外侧布置疏排长桩,长短桩结合,在确保安全的情况下,最大限度地节省了造价。外侧布置长桩后,由于桩长增加,满足受力、抗倾覆、抗隆等安全性要求。支撑道数由 2 道增加至 4 道,并且采用直径 135 m 圆环,在当地属于较大直径圆环支撑。根据实测监测数据,支护桩水平位移 31.7~116.2 mm,周边道路最大沉降 197.42 mm,民居最大累计沉降 101.63 mm。本基坑浅部属于软土地层,支护桩桩径偏小,其自身变形较大。事后分析,应适当增大桩径,以增强刚度,减小对周边环境的影响。通过对支撑内钢筋应力的监测,环撑全断面受压,这点同设计意图相一致,钢筋应力发挥 10 %~66 %。

张利梅等报道的《复合土钉墙在卵石地层深基坑中的应用》,地下 3 层基坑,面积 11300 m²,开挖深度 14.90~17.50 m。基坑周边分布有老旧房屋及各种管线,环境条件复杂。本项目最主要的特点是,场地浅部除表面分布有一层填土外,以下皆为卵石。面对巨厚无软弱夹层的砂卵石地层,支护选型至关重要。设计单位在部分区域采用了 9 道土钉+3 道预应力锚杆的支护形式。土钉施工采用了洛阳铲,局部位置遇到较大直径卵石,土钉长度不足时,采用在临近位置补打土钉的方式,确保了土钉区域强度。锚杆成孔时采用锚杆钻机套管跟进冲击成孔,保证了成锚质量。本基坑开挖深度较深,地层比较特殊,采用土钉支护实属少见。实施过程中对土钉和锚杆做了承载力检测,在设计拉力 1.4 倍的试验荷载下,锚杆、土钉的位移均相对稳定,未见破坏。并且轴力在长期观测情况下波动幅度较小。本基坑

开挖过程中,周边监测点显示的环境变形较小,项目较为成功。

武威等报道的《华能大厦基坑工程及其对北京地铁一号线影响分析》是本次收录的全篇幅环境影响分析案例。华能大厦基坑开挖深度约 20.45 m,地铁隧道埋深 19.1~19.6 m,两者开挖深度相接近。华能大厦采用桩锚支护,锚杆末端距离地铁隧道约 30 m,作者采用 FLAC3D 程序,对支护和地铁隧道进行模拟计算,破坏准则采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。通过模拟,隧道衬砌最大变形 2.73 mm,可见基坑开挖对地铁隧道影响甚微。同时,作者还采用 PLaxis 软件,建立平面模型,分析得到开挖对隧道的最大影响约 2.23 mm,同第一次模拟结论相接近。基坑实际施工过程中,对地铁隧道进行了实测,其沉降甚微,同模拟结论一致。

陈德军报道的《联合支护在大直径竖井中的应用》,其案例是本次实录集最深的基坑,开挖深度达到了 42 m。基坑面积不大,设计没有采用沉井、地下连续墙等常规支护方式,而是采用了锚杆+钢格栅+喷射混凝土的联合支护方式,在确保安全的基础上,十分经济。基坑共采用了 20 道土钉,3 道锚杆和一级放坡卸载,充分利用基坑近似圆形的特性,用钢格栅承受围压。设计采用 FLAC3D 对侧壁稳定性进行了模拟计算,稳定性计算满足规范要求。最终,项目实施顺利,监测数据稳定。

胡 熠等报道的《基坑边坡演变滑坡的机制及治理工程实例》,记录了西南地区膨胀土范围内基坑边坡逐渐演变为滑坡的案例。本基坑东西两侧高低差达到 17 m,东侧边坡上部为一小学的教学楼和运动场,此边开挖深度达到 20.2 m。支护设计采用疏桩结合坡面喷锚的支护方式。基坑开挖过程中变形持续增加,虽然采取了补桩等处理措施,依然未能避免基坑边坡垮塌。分析原因,主要是边坡位于不利地层结构面,产生了顺层滑动;其次坡面受到浸水后,不利结构面在水的作用下,力学性质降低,加剧了边坡失稳;最后,膨胀土受到湿胀干缩的作用,产生了大幅度横向波浪状变形。经过分析,滑坡治理采用在现有护坡桩间施工抗滑桩,同时对坡顶裂缝采用硬化隔水处理。处理的整体思路为“坡面削方+挡土墙+抗滑桩”。采用上述方式后,变形得到了有效控制。

此外,傅志斌报道的北京海关地下车库基坑设计,其北侧及东侧紧邻 16 层天然地基的海关大楼,坑底以下 5~6 m 为卵石层,含水量丰富。设计采

用桩锚等支护措施,施工过程中采用反压混凝土倒插钢筋笼、套管钻机成锚、改进定喷旋喷在卵石层中做止水桩等措施,确保了基坑的顺利实施。袁勇报道的甘肃省西南地区供气管道工作井基坑支护,项目位于刘家峡库区河漫滩上,挖深13 m,总体工期要求非常苛刻。采用工字钢结合多道钢支撑支护,施工迅速,造价节省。赵东杰报道的石景山银河商务区E地块商业金融基坑施工,支护桩入岩较早,采用旋挖钻和冲击钻接力成孔的方式,确保了支护桩的施工。锚杆施工中遇到了基岩,采用了气动潜孔垂工艺。朱海涛报道的北京航空航天大学附属中学新建教学楼基坑,采用了桩锚支护,施工中遇到支护桩偏位大、止水帷幕标高低于顶圈梁、砂土中支护桩扩径严重、局部支护桩钢筋笼未放到位等工程问题,都一一采取了相对应的措施。陈磊报道了拉森钢板桩结合水平及竖向钢支撑在萧山中学扩建工程基坑中的应用。张东辉报道了北京某地下车库基坑,地下3层,桩锚支护,开挖过程中帷幕漏水严重,施工单位采用封闭支护桩间隙、面板插导管的方式处理。坑外建筑沉降过大,采用压密注浆进行了补救。徐汉东报道了三轴搅拌桩内插预应力钢筋混凝土板桩的新工艺。还有一些不同地区,采用多种工艺支护的案例,各具特色。

2.2 边坡工程

随着我国经济和社会的发展,可持续发展的观念受到了广泛的重视。建立新型建筑边坡工程支护体系、保护生态环境是可持续发展的前提^[3]。本次会议收录的论文中,卢玉南报道的《南宁嘉和城F-6地块丹河生态挡土墙工程实录》为我们提供了一个很好的范例。该文介绍了一种新型的加筋土挡土墙,对挡土墙结构形式的合理性、安全可靠,以及施工和经济生态功能等方面作了详细论述。新型加筋土挡土墙的面板由结构独特的砌块相互卡锁而成,挡土墙自带高密度生态孔,可对全墙面进行绿化,这种加筋土挡土墙能将边坡支护与生态环境较自然、完美地结合,是值得提倡的一种边坡支护方式。此外,论文提出的友好和谐的生态支护理念可为建筑边坡的支护和生态改造提供很好的借鉴和参考。

吴铭炳报道的《建发北湖苑项目一区边坡工程实录》,场地拟建建筑物由3座38层住宅楼及2层联体地下室组成。建筑物高度116.3 m,地下室深度9.3 m,场地内的边坡为高边坡。由于场地条件复杂,边坡支护设计及施工难度较大,综合考虑现场

地质条件、地形地貌、周边环境、施工工艺等因素,采用了多种不同的边坡支护方案。坡顶采用桩+锚索+框架挡板加固原有挡土墙,坡体中部采用台阶式框架+锚索(杆)支护以及排桩+预应力锚索支护,下部基坑采用临时边坡支护,通过多种支护方案组合取得了较好的支护效果。

马永琪等报道的《某直立锚索格构挡墙工程实录》,以某直立锚索格构挡墙为背景,从边坡挡墙的造型、设计、施工、监测等多个方面,对施工过程中遇到的重点、难点问题进行了讨论,分析并提出解决方案。设计边坡坡高20 m,为挖方和填方结合边坡,在坡顶和坡脚均设计有住宅楼。综合考虑现场地质条件、地形地貌、周边环境等因素,设计采用坡体下部锚索格构挡墙和顶部土工格栅挡墙相结合的挡墙形式。直立锚索格构挡墙较传统的挡墙形式具有支挡高度大,挡墙截面小,受力模式合理等优点,对于其他类似边坡支护工程,具有一定借鉴意义。

吴兰等报道的《某山地项目挡墙支护工程实录》,对某山地工程进行边坡支护设计,坡高约25 m,采用了不同形式挡墙方案进行边坡支护。设计根据楼座与山体高差、边坡的可能破坏形式及边坡的岩土力学性质选择不同的挡墙支护形式,有锚杆式挡墙、重力式挡墙,以及用于临时支护的土钉墙。文中对挡墙施工过程中遇到的问题进行了总结,并提出相应的解决方案。

贾文华等报道的《河北省园博园山体边坡土工格栅加筋土挡墙设计实录》,采用加筋土挡墙的支护方案对山体堆砌高度约60 m的陡坡进行支护。实录对加筋土挡墙进行了详细的设计,对加筋材料的选取,填料要求,筋材铺设,排水措施进行了综合考虑。通过在土体中埋入高强度加筋材料以改善挡土墙的强度和稳定性,较传统挡墙有承受大变形、填料范围广、易于修建、绿色环保、造价低廉等优点。文中指出填料的摊铺、筋材的铺设是施工中关键的工序,其施工方法可为今后类似的加筋挡墙施工提供借鉴。

丁月双等报道的《基岩地区高边坡稳定性评价实录》,针对土石二元结构组成的人工填方高边坡,利用极限平衡理论,对边坡在暴雨及地震工况下的稳定性进行了评价。文中根据高边坡工程地质、水文地质、岩体结构特征以及坡顶填土区变形破坏迹象,判断边坡的可能破坏模式,并提出采用挡墙、锚杆、植被网以及截水沟等相应治理措施的建议,其成果可供其他类似工程借鉴。

3 几点讨论

3.1 关于桩锚

桩锚支护能够提供开阔的施工空间,给土方开挖和主体结构施工提供了较大便利。本次收录的支护案例中,全部及部分使用桩锚支护的基坑占到了80%以上,足见其在支护方面所具有的优势。同时,实录中采用桩锚支护的基坑也暴露了一些问题:

1)锚杆长度过长,超越了场地的用地红线,成为后续地块开挖的地下障碍物。现阶段全国各大城市地铁项目正如火如荼地大力开展,已建、在建及待建地铁的城市超过50个^[5],隧道施工中如果遇到锚杆及锚索将对其施工安全性产生较大影响。实录中记载了锚杆避让运营中地铁线路的案例,对规划地铁站采取了避让措施。应大力发展可回收锚杆或者其他工艺,以达到可持续发展的目的。现阶段常见的可回收锚杆主要有机械式可回收锚杆、化学式可回收锚杆、力学式可回收锚杆等。实录中有提及日本的JCE可回收锚杆,但原理受专利保护,未见详述。

2)传统方式的锚杆单根承载力较低,通过扩张锚根的方法提高锚杆承载力的方法十分有效,扩大段分为仅在根底形成扩大头的形式和能形成多段扩体的形式。通过增加单根锚杆承载力,降低锚杆数量。现在发展出的旋喷搅拌加劲桩技术,利用旋喷桩对周围土体进行切割、搅拌、渗透和挤压,使边坡土体强度较大提高。同时,结合预应力锚筋,提高了边坡土体的承载力和稳定性。此工法能够应用在淤泥质土及含水量较大的粉土中,较传统锚杆有一定优势。

3)实录中多个案例介绍了土钉和锚杆结合布置的支护形式,其计算分析模式有待讨论。有学者认为土钉需要在发生一定变形之后方能发挥承载力,属于被动型承载。而锚杆因为可以施加预应力,属于主动型承载,两者作用机理有所区别。土钉间隔锚杆布置,已经有很多成功案例,但计算过程经验成分较多,有待完善相关规范及计算分析内容。

3.2 关于内支撑

锚杆使用受限的区域,可以采用内支撑的支护形式。关于内支撑的布置,有井字形(多见于钢支撑)、对撑+角撑+边桁架、圆环支撑、斜抛撑等。作为较完善的工程实录集,本次收录的采用内支撑的案例比例偏低。随着基坑工程的发展,关注重点已经从强度控制转为变形控制。目前我国软土地区的大量深基坑大多地处繁华的城市中心,周边往往分布有较重要的建筑、道路、管线、地铁隧道等。基坑施工造成土体应力场改变,影响周边环境条件变化,

造成周边构筑物沉降甚至破坏。内支撑在环境复杂、开挖深度较大、土质条件差的基坑工程中使用较为多见,其在环境影响控制方面有一定优势。

本次收录的案例中,采用内支撑支护的基坑面积最大为7万m²,作为如此大面积的基坑,虽然设计单位采用了分坑处理的方式,但所用的支撑体量较大,经济性有待商榷。逆作法在大面积基坑工程中现已经广泛使用,其分为全逆作法、半逆作法及部分逆作法。当基坑面积超过一定体量,内支撑造价过高时,可以考虑采用支护结构与主体结构相结合的设计方法,以结构的梁板为基坑开挖过程中的临时支撑,对控制基坑变形、节省造价都有一定的优势。

3.3 关于边坡支护结构

合理的支护设计方案是边坡设计成功的关键。建筑边坡支护结构形式应综合考虑场地地质和环境条件、边坡高度、边坡侧压力的大小和特点,根据边坡变形控制的难易程度、边坡工程安全等级、施工可行性及经济性等因素进行选择。目前工程上常用的边坡支护结构形式主要有:重力式挡墙、悬臂式挡墙、扶壁式挡墙、桩板式挡墙、板肋式或格构式锚杆挡墙、排桩式锚杆挡墙等。这些支护结构形式按变形控制可分为主动支护和被动支护两个类型。重力式、悬臂式、扶壁式、桩板式等挡墙对边坡的变形控制是不有利的,属于被动支护类型;锚拉式桩板式挡墙、板肋式或格构式锚杆挡墙、排桩式锚杆挡墙对边坡的变形控制是有利的,属于主动支护类型。哪一种边坡支护结构较好,既需要理论方面的分析,更需要从实际工程中总结经验,进行深入探讨和研究。

边坡支护是一项复杂的工程,常常不是某一种支护形式能够解决得了的,有时即使单一支护形式能够满足安全要求,但是往往不经济。因此,边坡支护工程中经常使用多种支护形式相结合来保证边坡的稳定性、安全性和经济性。本次实录中,有多个边坡案例采用了多种支护方式的组合,通过合理优化达到相应的稳定性、安全性、经济性等要求。近年来各地边坡支护工程实践也表明,将两种或多种支护类型有机地结合起来,互相取长补短,能达到事半功倍的效果。

本次收录的边坡,边坡的支护形式既有传统的土工格栅加筋挡土墙、锚杆式、桩锚式、锚索格构式以及混合式挡土墙,还有新型的生态挡土墙。这些支护结构中,格构梁锚固能将整个护坡与柔性支撑有机结合在一起,是一种新型支挡加固措施。直立锚索格构挡墙较传统的挡墙形式具有支挡高度大,

挡墙截面小,受力模式合理等优点;加筋挡土墙较传统挡墙有承受大变形、填料范围广、易于修建、绿色环保、造价低廉等优点;生态挡土墙能将边坡支护与生态环境较自然、完美地结合,是值得提倡的一种边坡支护方式。这些新型边坡支护结构、设计方法和设计理念,对于指导其他类似的边坡工程,都具有一定的借鉴意义。

3.4 关于边坡稳定性评价

对边坡进行稳定性评价,首先要明确其破坏机理和评价因素。合理确定这些评价因素的主次是边坡稳定性评价的关键。影响边坡稳定性的因素可分为内因和外因两个方面。内在因素包括组成岩土体的性质、地质构造、岩土体结构、岩体初始应力等;外在因素包括水的作用、地震、岩体风化、工程荷载条件及人工开挖等。内在因素对边坡的稳定性起控制作用,外部因素则使边坡的下滑力增大,岩土体强度降低而削弱岩土体的抗滑力,促进边坡变形破坏的发生与发展,降低边坡的稳定性。作用因素的多样性以及破坏机理的复杂性,使边坡稳定性分析评价成为岩土工程问题研究的难点之一。

目前,边坡稳定性分析评价方法发展迅速,已形成了多种方法并存的局面^[4]。这些方法包括:定性分析评价方法(如图解法、工程类比法和自然历史分析法)、定量分析评价方法(如极限平衡法和有限元法、边界元法、快速拉格朗日法、离散元法、块体理论、无单元法等各种数值分析方法)以及非确定性评价分析方法(如可靠度分析法、人工神经网络、模糊数学评判法、灰色系统方法、模式识别方法、非线性模型预测法、人工智能法等)。

本次收录了1篇边坡稳定性评价实录,采用传统的极限平衡理论,对土石二元结构组成的人工填方高边坡进行了稳定性评价。论文通过综合分析边坡岩土体结构特征及稳定性影响因素,得出边坡的可能破坏模式为上部人工土层中发生的圆弧滑裂破坏及沿基岩面发生的直线形滑裂破坏。同时根据边坡的可能破坏模式采用不同的计算分析方法,对土质边坡和较大规模的碎裂结构岩质边坡采用圆弧滑动法;对可能产生平面滑动的土石二元边坡采用平面滑动法。此实例及其他边坡工程实践表明,在进行滑坡稳定性分析时,选择稳定性分析方法的基础应该是地质条件,应根据可能的边坡滑动破坏形式选择相应的计算分析模型,而不是强调模型的先进性、复杂性,这是边坡稳定分析乃至一切岩土工程问题的精髓。

3.5 关于地下水控制

基坑工程中由于场地工程地质和水文地质条件的复杂性,随着基坑规模的扩大,开挖深度的加深,所面临的降水、排水的要求越来越高。由此引发的工程问题也越来越突出。案例中报道的因为坑边分布有水坑,加之连日暴雨而引起的工程事故应引以为戒。同时,基坑设计与施工过程中,应当遵循“按需抽水”的原则,过量抽取地下水,会引起周边环境的沉降,长期来讲,会引起地区水位变化。同样,由于地表水下渗为边坡中的水,增加了边坡的自重并同时减小了边坡岩土层的抗剪强度,使得边坡的稳定性降低甚至出现险情的工程案例也不少见。

面对越来越敏感的周边环境问题,基坑工程的地下水控制问题显得尤为重要。大量降水会引起变形,主要包括以下几类:①降水引起的支护结构变形;②降水引起的地面沉降;③降水引起的地面下土体沉降;④降水引起隧道变形^[5]。方案设计前,应对周边环境条件进行调研,明确沉降敏感建构筑物的分布情况,以及其对沉降的承受能力,查明地下水的分布及补给情况,结合基坑本身,制定有针对性的降水方案。必要时,适当调整止水帷幕的深度,通过前期抽水试验,了解场地含水层特性及降水引起周边环境沉降的大小,通过预先分析,必要时辅以回灌措施,以确保环境安全。

而相对于基坑的地下水控制问题,边坡工程的重点应放在地表水的防治,首先防止地表水下渗进入边坡,其次要保证边坡体中的地下水能畅通地排渗出来。

3.6 关于数值模拟

随着基坑工程遇到的各种环境条件越来越复杂,需要综合考虑各种工况,方能确保基坑设计及施工的安全可靠,同时又尽量减少对周边环境的影响。传统的计算分析方式,难以满足日益多变的工程问题,数值计算分析在基坑工程计算分析过程中占比越来越重。较为常用的数值计算模型为荷载结构模型和连续介质模型。前者利用杆系有限元和三维m法,使用过程中有诸多假设,现已经广泛应用。如上海地区使用较多的同济启明星FRWS深基坑软件、武汉“天汉”系列基坑软件、北京理正深基坑支护软件等;连续介质模型不仅可以计算支护结构的位移和内力,更为主要的是,其能够考虑支护结构同周围土体的共同作用,进而计算其位移和受力。在分析较为复杂的工程时,可以整体建立模型,具有经验公式无可比拟的优势。

数值分析中关键问题之一是要采用合适的本构模型和计算参数。现在主流的本构模型有:线弹性模型、Duncan-Chang 模型、Mohr-Coulomb 模型、Cam-Clay 模型、Hardening-Soil 模型等。不同模型有不同适用性,线弹性模型由于不能模拟土体的塑性状态,结果与工程实际不符;弹性-理想塑性模型的计算结果好于线弹性模型,但由于弹性-理想塑性模型不能反映土体的刚度依赖于应力和应变水平,其预测的墙后地面沉降范围偏大,分布模式不够合理^[6]。本次收录的案例,全部采用了 MC 模型,其不能区分加荷和卸荷,不能反映软黏土的硬化特征,且其刚度不依赖应力历史和应力路径,不适合敏感环境下数值分析。如要进行更为贴近工程实际的数值分析计算,建议采用 MCC 模型(修正剑桥模型)和 HS 模型进行分析^[7]。

4 结 语

本次实录虽不足以全面反映我国当前基坑及边坡工程技术的总体水平,但至少它们可以从几个侧面说明,近年来随着我国土木工程建设的不断发展,原有的基坑及边坡工程建设理念已不能完全适应当前社会发展的需求,需要在传统设计、施工和监测技术的基础上,创立一些新型支护结构、设计方法和设计理念,以促进基坑及边坡工程技术的快速发展。可以预见,在今后相当长一段时间里,基坑及边坡工程技术仍是基础工程和岩土工程的一个重要内容,有很多问题还有待深入研究和完善。这些问题主要有:

1)加强基坑和边坡工程中多种支护方法的综合应用和优化组合,进一步扩大多种支护措施或优化

组合的应用前景。

2)加强新材料、新工艺和新工法的不断开发与应用,使之在基坑和边坡工程设计、施工及检测中继续发挥更大的作用。

3)进一步发展基坑和边坡工程理论研究,创立新型基坑和边坡工程支护体系、将工程的安全稳定与保护生态环境、节约资源有机地结合起来,努力实现工程与自然的和谐统一。

列入本专题但本文未提及的一些实录,都各有特色,只是限于篇幅,不在此一一述及,特致歉意。

参 考 文 献

- [1] 刘兴远,唐秋元,夏 阳. 建筑边坡工程技术发展展望[J]. 岩土工程研究,2012,11(107): 15-18.
- [2] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [3] 周德培,张俊云. 生态护坡工程技术[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [4] 邓钟敏,徐世光,郭婷婷. 边坡稳定性分析评价方法综述[J],矿业工程,2010,8(1): 14-16.
- [5] 郑 刚,朱合华,杨光华,等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[C]//中国土木工程学会第十二届土力学及岩土工程学术大会论文集,2015: 96-128.
- [6] 王卫东,王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [7] 徐中华,王卫东. 敏感环境下数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学,2010,31(1): 258-264.

收稿日期:2015-09-09