复合喷锚结构在边坡支护中的应用

赖正发　王晓楠
（有色昆明勘察设计研究院，昆明，650051）

提　要　本文介绍了一种新支护工艺——复合喷锚结构，并对其受力及作用机理进行了分析。实践证明，在复杂地质条件、复杂周边环境的基坑边坡支护或滑坡治理中，复合喷锚结构不但安全可靠而且节省投资、缩短工期。

一　引　言

众所周知，在许多岩土工程中，如边坡工程、基坑支护工程，如何采用适宜的方法，挖掘岩土的潜能，充分利用岩土体的自稳能力，积极调用岩土体的抗剪强度，使一定范围内的岩土体成为工程结构物不可分割的组成部分，以显著减小结构体积，大大减轻结构自重，达到既满足工程稳定又节约工程造价的目的，一直是岩土工程师所关心的热点问题。显然，喷锚结构、土钉墙结构和预应力锚杆结构是该领域的实践成果。那么，对于经常遇到的复杂地质条件、复杂周边环境的基坑边坡工程，应当怎样支护呢？例如对于具有较深厚的杂填土、粉煤灰土层，周边变形控制较严的基坑边坡支护工程。下面介绍的昆明钜豪公寓基坑边坡支护就是典型的一例。

二　工程概况

拟建场地位于昆明市翠湖北路，离翠湖边约 15m，其主体为 5~8 层框架结构，基坑底部标高为-4.9~-5.6m，开挖周长 300m，其±0.000 相当于海拔 1893.15m，±0.000 以上为永久性支护，以下为临时性支护，基坑边缘线一般即为红线位置。因是旧城改造，场地周边建筑物分布密集，且地面高差较大，最大为 7.2m。基坑西侧离基坑边缘 5.0m 左右为三栋六层老式砖混结构的住宅楼，浅基础，埋深 1.5m 左右，其地面标高相当于 1900.0m；基坑北侧为西仓坡，坡高为 1893~1899.2m；基坑东侧为交通要道翠

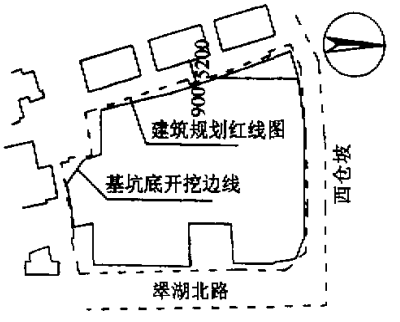


图1 基坑平面图

湖北路，标高为 1891.35m；基坑南侧为连续的二栋二层住宅，离基坑边缘 4.0m 左右，浅基础，埋深均为 1.5m。场地地下水高程为 1892.50m。拟建场地的位置及周边建筑物分布状况参见图 1。

场地地层主要由人工杂填土，沼泽相淤泥和淤泥质粉质粘土，坡洪积粘土层和湖相粉质粘土层所组成。各段的边坡土层构成、厚度均有较大差异。典型地层情况和支护剖面见图 2。

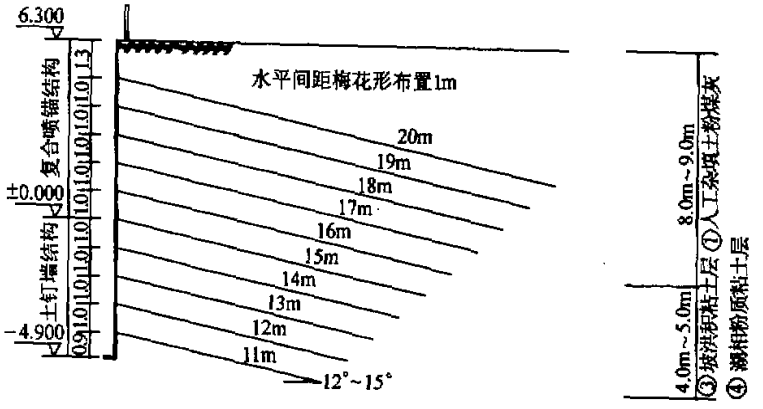


图 2 基坑支护剖面

各土层的主要物理力学性质指标如下：(1)人工杂填土，厚度 5~9m，含有大量毛石，旧基础，废水井和粉煤灰。

(2)淤泥质粉质粘土，厚度 0~2.3m，软~流塑，γ=16.6kN/m^3，c=20.4kPa，ϕ=5°。

(3)坡洪积粘土，厚度 0~5.2m，可塑~硬塑，γ=18.9kN/m^3，c=50kPa，ϕ=13.9°。

(4)湖相粉质粘土，厚度 0~5.5m，可塑，γ=20.0kN/m^3，c=50kPa，ϕ=14.1°。

三 支护方案投标情况

该工程由昆明钜豪屋业有限公司兴建。因场地地质条件及周边环境十分复杂，且邻近高边坡的建筑物均为居民住宅楼，边坡支护要求较高，为确保工程安全可靠，业主邀请了五家较强技术实力的单位进行支护方案投标，并邀请专家组对方案进行公开答辩。最后因为我院设计的支护方案设计新颖、计算有据、施工快捷、安全可靠而一举中标。

四 设计方案介绍（东、南二侧为常规支护，不在此赘述）

1. 设计思路

建筑场地的地质条件极差：北侧的人工杂填土含有大量的毛石、旧基础、碎砖瓦，厚度为 8.0m；西侧的人工杂填土为松散的粉煤灰，厚度为 9.0m。二侧上半部份为永久性边坡，且基坑边线已与红线基本重合，这对支护结构提出了较高的要求，也是支护方案能否

成功的关键所在。该边坡具有以下几个特点：(1)杂填土、粉煤灰土坡在开挖时不能自稳；(2)杂填土、粉煤灰土体强度指标较低，离散性大，稳定系数取值不易把握；(3)杂填土、粉煤灰土坡变形大，对周边建筑物的影响很难预测；(4)杂填土、粉煤灰内难以成孔；(5)上半部份为永久性边坡，下半部份为临时性边坡。根据具体情况，我院认真研究，对各种可能支护形式的可行性(土钉墙结构、喷锚结构、预应力锚杆结构、桩墙式结构)进行了仔细分析发现：土钉墙结构不能满足(1)、(3)、(5)；喷锚结构不能满足(1)、(4)、(5)；预应力锚杆结构不能满足(1)、(4)；桩墙式结构无法形成。为了解决上述存在的问题，我院开发出集合土钉墙结构、喷锚结构、预应力锚杆结构特点的新工艺——复合喷锚结构支护方案，结构构造如图 3 所示。其工艺特点是将钢管直接打入代替钻孔(遇到毛石等障碍物，钢管无法直接打入时，可以采用钻机引孔后再打入钢管)，大大减少钻孔工作量，解决成孔困难；同时由于其单体拉力较小而总体密度较大，对原状土还具有加固改善功能。所以，该支护结构既具有土钉墙、喷锚结构施工快捷、占地少、投资省、机动灵活、改善土体等特点，又具有预应力锚杆结构主动受力、控制变形能力强、永久性好、安全可靠等特点。

2. 设计计算

(1)土层参数

用于支护设计的土层参数主要有：容重 γ、粘聚力 c、内摩擦角 ϕ、摩阻力 τ等。

(2)计算方法

由于基坑西北侧的上半部份为永久性支护，下半部分为临时性支护，所以设计时必须满足这个基本要求。根据笔者经验，考虑复合喷锚结构的施工方法、结构构造、力学性质，永久性边坡采用复合喷锚结构支护，临时性边坡采用土钉墙结构支护。

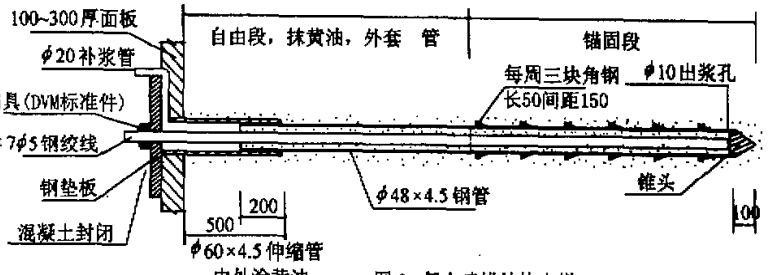


图 3 复合喷锚结构大样

(3)施工阶段（临时性支护[1][2]，计算简图见图 4）

a.每个土钉所受拉力可按下式计算：

$$T_i=[(q+\gamma H_i)K_{ai}-2c_iK_{ai}^{0.5}]S_xS_y \qquad (1)$$

式中 q——坡上超载(kPa)；γ——土的重度(kN/m^3)；H_i——第 i 个高度的土钉(m)；S_x、S_y——土钉水平及垂直间距（m）；c_i、ϕ_i——i 层土钉处的土的粘聚力、内摩擦角(kPa、°)。K_{ai}——$tg^2(45-\phi_i/2)$第 i 层土钉处的土压力系数；

b.土钉抗拔力

$$T_{ui}=\pi DL_{bi}\tau_i\cos\alpha_i \qquad (2)$$

式中 T_{ui}——第 i 根土钉抗拔力(kN)；D——钢管直径(m)；L_{bi}——第 i 层土钉伸入破裂

面稳定区长度(m)；τ_i——第 i 根土钉土层处的摩阻力(kPa)；α_i——第 i 根土钉的倾角(°)。

有了各土钉的抗拔力 T_{ui} 和实际受到的拉力 T_i 后，即可计算土钉的抗拔安全系数 K，$K=T_{ui}/T_i$，当 $K\geqslant 1.5$，满足要求，否则调整土钉有关参数直至达到要求为止。

c.土钉墙的整体稳定性

土钉墙的稳定性按圆弧滑动条分法进行简化计算：

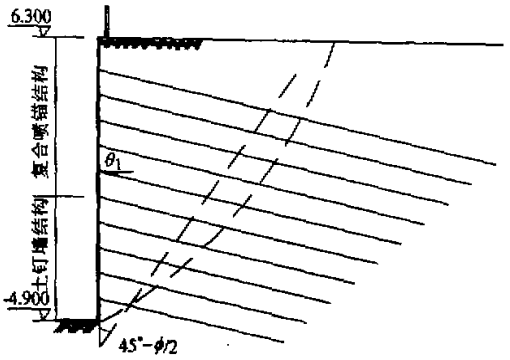


图4 临时性支护计算简图

$$Ks=[\Sigma c_iL_iS_x+\Sigma W_i\cos\alpha_i tg\,\phi_iS_x+\Sigma T_{ui}\cos(\theta_i+\alpha_i)+\Sigma T_{ui}\sin(\theta_i+\alpha_i)tg\,\phi_i]/(\Sigma W_i\sin\alpha_iS_x) \tag{3}$$

式中：Ks——稳定安全系数，取 Ks=1.5；W_i——i 分条的自重(kN/m³)；c_i、ϕ_i——i 分条滑面处土的粘聚力(kPa)和内摩擦角(°)；α_i——i 分条滑面中点切线与水平面夹角(°)；θ_i——i 土钉的倾角(°)；L_i——i 分条滑面处的弧长(m)；T_{ui}——i 土钉滑面外的抗拔力(kN)。

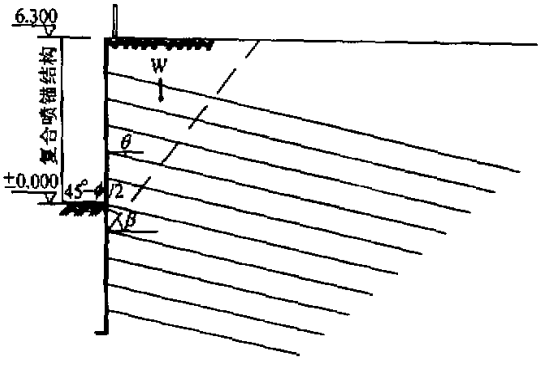


图5 永久性支护计算简图

(2)使用阶段(永久性支护[3]，计算简图见图 5)

a.根据图 5 所示进行稳定性计算可求得预应力锚杆拉力。

$$m=[cLS_x+W\cos\beta tg\,\phi S_x+\Sigma T_i\sin(\theta+\beta)tg\,\phi]/[W\sin\beta S_x-\Sigma T_i\cos(\theta+\beta)]$$

$$\Sigma T_i=(mW\sin\beta S_x-cLS_x-W\cos\beta tg\,\phi S_x)/[m\cos(\theta+\beta)+\sin(\theta+\beta)tg\,\phi] \tag{4}$$

$$T_i\geqslant(\Sigma T_i)/n$$

式中：m——安全稳定系数，≥2.0；ΣT_i——预应力锚杆的拉力(kN)；W——下滑土体+坡上超载重(kN)；L——滑面长度(m)；c、ϕ——土体的粘聚力(kPa、°)；n——预应力锚杆根数。

b.预应力锚杆的锚固长度

$$L_{bi}=KnT_i/(\pi D\tau) \tag{5}$$

式中：Kn——安全系数，选自 *CECS* 22:90 规范：≥2.0；D——钢管直径(m)；τ——预应力锚杆土层处的摩阻力(kPa)；

结合施工阶段的计算结果，取大值即可确定预应力锚杆的自由段长度和锚固段长度。

五 施工与监

该支护工程 1998 年 9 月 1 日开工，12 月 15 日结束，扣除其它因素影响，实际施工工期约 70 天。施工时，考虑到北侧人工杂填土厚达 8m，在此段实施不送风打孔和多次灌浆工艺，解决了漏气、跑浆问题；考虑到西侧粉煤灰厚达 9m，在此段调整灌浆压力，解决了由于高压使邻近民宅及边坡剧烈变形问题；针对开挖时不能自稳易垮塌问题，设置超前锚管喷浆措施，有效地控制了坑壁垮塌不能自稳。总之，施工过程中，根据边坡土质实际情况和变形监测结果及时调整参数和工艺，发现问题及时解决，实行信息化施工。变形监测结果是：最大变形在西侧边坡处，水平位移 28mm,土体沉降为 28mm。其余部位的水平位移、土体沉降均不足 10mm。变形监测结果及运行至今的情况表明，复合喷锚结构的设计思路合理，稳定计算可靠，终使基坑支护获得成功，受到业主的高度评价。

六 结 语

复合喷锚结构集合了土钉墙、喷锚支护、预应力锚索结构的优点，既可以象土钉墙一样用于临时性支护，又可以象预应力锚索结构一样用于永久性支护，需要时还可以使二种性质的支护结构共同工作，用途十分广泛。其主动受力、控制变形能力强、节省投资，施工方便、安全可靠的特点，特别适用于场地地质条件及周边环境十分复杂的边坡支护工程、滑坡治理工程。例如在举世瞩目的世博会期间，世博园的三处滑坡均采用复合喷锚结构进行抢险治理获得巨大成功，为世博会的顺利进行贡献了一份力量。

参考文献

[1] 余志成等编著：《深基坑支护设计与施工》，中国建筑工业出版社，1997。

[2] 中华人民共和国国家标准：《岩土工程勘察规范》(GB 50021—94)，中国建筑工业出版社，1995。

[3] 程良奎等编著：《岩土加固实用技术》，地震出版社，1994。