

北京京城大厦深基础工程施工

韩学广

【摘要】 北京京城大厦由日本清水建设设计，地上 50 层，地下 4 层，-23.76m。北京市机械施工公司采用 3 层锚杆，内外坡道，挖掘机直接进槽施工法，比原方案节约 400 万元，在护坡桩、锚杆、腰梁、土方施工中有许多独到之处，为我国深基础施工提供了宝贵经验。

【关键词】 深基础 3 层锚杆 护坡桩 土方施工

1、工程概况

(1) 工程概述

京城大厦主楼总建筑面积 110270m²，基底面积 4802m²，地上总高 183.50m，地下深 -23.76m，总高度为 207.26m。

本工程由中国信托总公司投资建设，由北京建筑总公司负责组织施工，北京第五建筑公司承包，北京市机械施工公司负责土方、打桩、锚杆施工及钢构件外墙板运输安装（上部为钢结构由柱与梁支撑组成，楼板是以波型钢板或预应力薄板为模板的整浇钢筋混凝土外墙板，钢结构间设有劲性钢筋混凝土剪力墙，围护结构为预制钢筋混凝土外墙板）。

本文介绍土方、打桩、锚杆机械施工和基槽护坡设计等内容。

本工程是由日本设计的超高层建筑。由地面上 4 层，地面上 50 层和 2 层坡顶组成，并采用日本 SM50B 钢板桩护坡，用 3 层锚杆加固稳定边坡。

基础为钢筋混凝土扩展式箱形基础，地下室各层为劲性钢混结构。

(2) 地质情况（详见剖面图 1）

2、打桩、土方、锚杆设计与施工情况

2.1 护坡桩锚杆腰梁设计

在研究了日、德、美、俄罗斯不同计算方法后，依朗金-库仑理论对悬臂桩、单层锚杆、2 层锚杆、3 层锚杆对桩锚杆腰梁等进行设计。

设计参数： $H_1=23.5\text{m}$ ，地面附加荷载 $q=1 \times 104\text{pa}$ ，桩间距 $S=1.1\text{m}$ 。 $\gamma_1=19\text{kN/m}^3$ ， $\psi_1=30^\circ$ ， $C_1=2 \times 104\text{MPa}$ ， $\gamma_2=20\text{kN/m}^3$ ， $\psi_2=42^\circ$ ， $C_2=0$ 。

计算结果如表 1 所示。

(1) H 型钢桩的验算

设计选用的日本 488 × 300H 型钢，采用 $[\sigma]=200\text{MPa}$ ， $W_x=2.91 \times 10^{-3}\text{m}^3$ ，则抵抗力矩： $KM=[\sigma]W_x=5.82 \times 10^5\text{N}\cdot\text{m} > 5.458 \times 10^5\text{N}\cdot\text{m}$

(2) 锚杆的设计

根据表 1 进行计算，结果见表 2。

(3) 腰梁设计

① 1 层腰梁的设计（根据锚杆的设计外力，1 层设计外力为 51.3t（ $\approx 513\text{kN}$ ），锚杆倾角由 13° 改为 25° 及 30° ）。

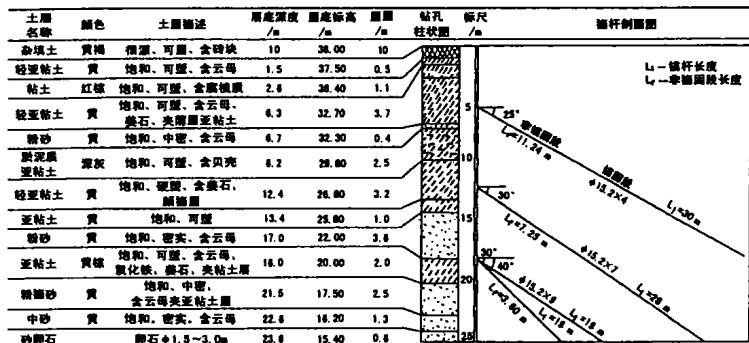


图 1 地质及锚杆剖面图

韩学广：柳州欧维姆机械有限责任公司高级技术顾问 教授级高工

外力： $P_{max}=575kN$ （产生两种弯矩）；
 弯矩： $M_{1max}=79.1kN\cdot m$ （每跨均有荷载）；
 弯矩： $M_{2max}=118.9kN\cdot m$ （隔跨有荷载）。
 2 层腰梁未上，2 层土已挖完，此时有

$R_A=366kN$ ， $\cos 30^\circ = 0.87$ ，则
 $P=2R_A/\cos 30^\circ = 366 \times 2 \div 0.87=841.4kN$ ；
 $M_{3max}=115.7kN\cdot m$ （每跨均有荷载）；
 $M_{4max}=174kN\cdot m$ （隔跨均有荷载）。

根据以上 4 种弯矩选 2I28a，则有 4 种应力：

$\sigma_1 = 77.83MPa$ ； $\sigma_2 = 116.9MPa$ ； $\sigma_3 = 113.8MPa$ ； $\sigma_4 = 117.1MPa$ 。

② 2 层腰梁的设计（见图 2）。选 I_{32a}（应选 2I_{36a}，但没有材料），有 $P=1080kN$ ，由此可算得：
 $Q=540kN$ ， $R=1080kN$ 。

图 2 (a) 中支座弯矩： $M=148.5kN\cdot m$
 跨中弯矩： $M=148.5kN\cdot m$

图 2 (b) 中支座弯矩： $M=74.9kN\cdot m$
 跨中弯矩： $M=223.34kN\cdot m$

由此计算出 $\sigma_{max}=162.1MPa$ 。

构件抗压 $N_v=1133kN >$ 实际荷载 $1080kN$ 。

当挖完第 3 层土时，3 层腰梁未上，2 根腰梁

荷载最大最危险，此时 $R=1157kN$ ， $\cos 30^\circ = 0.87$ ，
 则 $P=1330kN$ 。故产生的最大弯矩： $M_{max}=275kN\cdot m$ ；
 产生的最大应力： $\sigma_{max}=198.6MPa > [\sigma] = 170MPa$ 。

③ 3 层腰梁设计。选 2I_{45a}（应选 2I_{45a}），有
 $P=1316.4kN$ 。其余计算步骤同上，计算结果为
 $M_{max}=408.4kN\cdot m$ ， $\sigma_{max}=142.8MPa$ 。

2.2 护坡桩、土方、锚杆施工

(1) 打桩施工拟定了 8 个方案，经研究确定两个方案即植桩法和拉桩法。对接桩法进行试验，
 试验时间 1986 年 7 月 22 日，选 KB-45 打接桩，桩长 $18+9=27m$ ，试验情况见表 3。

对 18m 桩与 9m（6m）桩的接头进行了计算：

已知材料 SM50B（488）工字钢 $F=163.5cm^2$ ，
 $[\sigma]=210MPa$ ， $\sigma_{max}=620MPa$

则 $N=F[\sigma]=163.5 \times 210=3430kN$

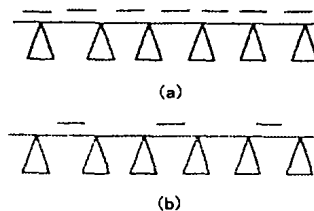


图 2 2 层腰梁设计图

表 1 设计计算结果

各阶段挖土	嵌固深度 /m	R_A / 10^4N	M_A / $10^4N\cdot m$	M_{AB} / $10^4N\cdot m$	R_B / $10^4N\cdot m$	M_B / $10^4N\cdot m$	M_{BC} / $10^4N\cdot m$	R_C / $10^4N\cdot m$	M_C / $10^4N\cdot m$	M_{CD} / $10^4N\cdot m$
第 1 次挖土 -5.5m	6.5			悬臂 -49.15						
第 2 次挖土 -12.5m	2.1	36.66	-18.33	53.5						
第 3 次挖土 -18.5m	2.4	19.62	-15.83	1.6	57.85	-41.68	54.48			
第 4 次挖土 -23.5m	2.5	23.4	-16.44	11.3	44.0	-23.2	11.6	71.2	-31.65	49.95

表 2 锚杆设计计算结果

锚杆位置 /m	锚杆倾角 /($^\circ$)	非锚固段 L_f /m	锚杆总长 L_1 /m	锚杆水平拉力 /kN	锚杆轴向拉力 /kN	$\phi 15.2$ 钢绞线根数	锚杆间距 /m
第 1 道 -5	13 $^\circ$ (后改为 25 $^\circ$ 30')	11.24	30	500	551.7	4	2.20
第 2 道 -12	30 $^\circ$	7.25	28	940	1085.0	7	2.20
第 3 道 -18	40 $^\circ$ (后改为 30 $^\circ$)	3.60	18	1140	1316.4	9	1.65

表 3 试验记录

第 1 节 18m 桩	深度 /m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	备注	
	击数 /次	1	1	2	2	2	4	3	5	4	6	19	25	29	26	30	23	37	41		总用时 12' 51"
第 2 节 9m 桩	深度 /m	19	20	21	22	23	24	25	26	27											
	击数 /次				400		800	1000	1409												
贯入度	深度 /m				22	23	24	25	26	27											
	击数 /次				1		0.2	0.3		0.1											

腹板焊缝 1.1cm, 翼缘焊缝 1.8cm, 焊条采用 506 条。

根据以上所得数据和试验工艺的结果, 土质计算 27m 桩的摩阻力为 1620kN, 应用 8t 锤, 但分析试验的锤击结果采用 KB-45 打 18m 桩, 采用 KB-60 打接桩。利用打桩机的微动和桩帽设备、桩头设备, 在垂直方向用经纬仪校正进行接桩和控制质量, 顺利完成了打桩任务。

(2) 土方施工

在 -12m 处的收尾平台需满足以下条件: 能承受 100t 动荷载在上面工作; 平台的面积需满足 1 台拉铲挖土机及 2 台 15t 汽车工作的面积。

根据土工参数 r, c, ψ , 桩间距 $S=1.1m$, 悬臂高 $H=12m$, 坡道设计如图 3。

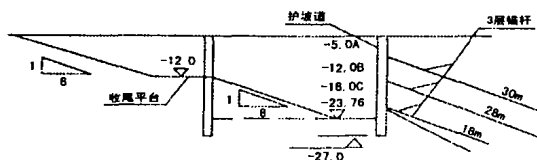


图 3 土方施工的内外坡道加收尾平台示意图

计算出嵌固深度为 4.2m, 支点反力 $R=151.9kN$, $M_{max}=508.3kN \cdot m$ (钢板桩)。

由外力 $P=15.2 \times 3=45.6t \approx 456kN$, 可算得:

$M_{max}=501.6kN \cdot m$

选用 SM50B 钢板桩, $[M]=581.6kN \cdot m, \sigma =$

$172.3MPa < [\sigma]=210MPa$ 。

支撑计算结果:

对 x 轴: $\sigma = 137.7MPa < [\sigma]=170MPa$;

对 y 轴 (拟让 $\lambda_y = \lambda_x$ 等稳定强度):

$\sigma = 129MPa < [\sigma]=170MPa$;

选用 2I_{22a} (因缺料未能选用 22I_{25a}), 缀板

$Q=20A$, 计算结果为 200 × 10 的缀板, 其 $L_1=110cm$,

缀板的焊缝 $\tau_{max}=86.9MPa < [\tau]=120MPa$ 。

对土方的分层, 根据 3 层锚杆决定了土方必须分为 4 层, 根据锚杆的每层距离, 最大的锚杆距离为 7m, 挖土机只能挖 5m 深, 采用了挖土机接力的

的方法, 将 7m 深分 2 层, 1 层挖 3.5m, 另 1 台挖土机在下边的 1 个 3.5m 处停机, 将剩余的 3.5m 土甩给上边的 1 个挖土机挖运走。

(3) 锚杆施工

土锚杆是将锚杆与滑裂面以外的土体连成一个整体, 再通过托架、腰梁、锚头与钢板桩 (可用钢筋混凝土桩) 组成一个受力体, 承受主动土压力。

土锚杆是在土中钻孔、灌入水泥浆, 以钢绞线为预应力主筋, 经养护待水泥浆达到一定强度, 预应力主筋与浆体的握固力满足设计要求后, 进行预应力张拉, 再通过锚具予以固定, 形成有效预应力后张体系。本工程就是采用 3 层土锚与钢板桩、腰梁, 托架、锚头组成受力体系, 试验结果见表 4、5。

第 1 锚杆层作了 9 根试验: 倾角为 13° 的作 3 根, 抗拔力为 400~550kN (因锚固段座落在淤泥里); 倾角为 25° 的作 6 根 (水、干作业各 3 根),

表 4 第 2 层锚杆试验结果

序号	锚杆号	抗拔力 /kN	累计变形 /mm	回零后残余变形 /mm	作业方法
1	11	1000	85.47	13.65	干
2	113	1050	88.81	9.61	水
3	41	1200	135.13	40.04	干
4	123	1250	82.23	14.28	水
5	105	1250	27.24	14.59	水

表 5 第 3 层锚杆试验结果

序号	锚杆号	抗拔力 /kN	累计变形 /mm	回零后残余变形 /mm	作业方法
1	15	1550	81.80	15.86	干
2	17	1600	88.12	19.40	水
3	79	1750	93.67	26.85	干
4	81	1750	99.92	28.79	水
5	30	1850	96.27	21.97	水
6	140	1850	85.80	14.14	干

表 6 第 2 层应力测试结果

测试日期	东侧南		东侧北		北侧	
	47#	15#	16#	126#	127#	129#
1月27日	525	623	679	693	594	720
2月3日	497	644	693	729	630	801
2月9日	490	658	693	666	582	763
钢绞线根数	6	7	7	7	7	7

抗拔力为 750~800KN (已进砂层)。

另外, 采用应力—应变仪进行了应力测试 (第 2 层), 测试结果如表 6。

对第 3 层锚杆进行了应力测试: 用 CJP-2 型混凝土应变计测试锚杆在张拉和挖土过程中锚体内的应力分布和变化; 用特制的锚头传感器测试锚杆端头合力。

锚杆随张拉荷载的增加而受力伸长。实测结果表明, 应力沿锚杆长度是不均匀的, 锚杆前段应力增长最快, 以距锚杆端头 4~9m 这一段应力为最大, 随着荷载的增加, 峰值逐渐向深部移动, 但在高锚杆端头 13~14m 以后应力很小, 甚至接近于 0。

按锚头传感器显示结果, 锚杆应力在 900KN 以下。观测测孔的实际变形 (在距离 H 型钢桩 0.5m 处留 4 个测孔, 东面 2 个, 西面 2 个)。可以认为, 钢板的变形同测孔的变形相近似。实测的最大侧向变形在 -6.5~8m 之间, 最大变形量为 59.5~105.1mm; 第 1 层锚杆处 52.2~90.0mm, 第 2 层锚杆处 11.4~55.5mm, 第 3 层锚杆处 5.1~22.1mm。

实测表明, 挡土墙的变形, 以第 2 层锚杆以上变形为大, 在这以下变形就很小了。

3、两种方案的经济技术比较

一种方案是国外投标方案即 5 层锚杆加栈桥工字钢桩。另一种方案是以北京建筑总公司、北京第五建筑公司、北京市机械施工分公司的投标方案即 3 层锚杆、内外坡道加收尾平台工字钢桩。

详见表 7 (简称国内方案、国外方案)。

4、结语

(1) 土锚杆是将锚杆与滑裂面以外的土体连成一个整体, 再通过托架、腰梁、锚头与钢板桩 (或钢盘混凝土桩) 组成一个受力体, 承受主动土压力。在这个受力体系中, 腰梁可以补强, 锚杆少了可以增加, 托架是传力件, 它可将锚杆因改变角度产生的垂直分力传给钢板桩, 因此, 托架虽然不大但它是关键部件。

(2) 根据学习国内外资料及施工实践, 锚杆层距最好不大于 5m, 锚杆间距不小于 2m, 否则要按群桩设计。锚杆的角度在土质允许的条件下最好控制在自锁角内, 便于施工。

锚杆的锚固端一定要进入砂层及卵石层, 而且每个工程都要做拉拔试验。因此, 不同的工程、不同的土质、不同的施工季节, 有不同的情况, 要结合施工现场条件计算出数据来。最好科研单位与施工单位合作多做一些研测, 找出本工程规律性的理性知识, 反过来应用于工程。

参考文献

- 1、韩学广 桩锚护壁体系在高水位软土质中的应用 [M], 北京: 建筑工业出版社, 1994
- 2、韩学广 深基坑桩锚护壁体系 [R], 北京: 中国岩土锚固工程协会, 1995
- 3、韩学广 综述中国岩土锚固工程 [R], 北京: 中国岩土锚固工程协会, 1996

表 7 方案比较

项目	国内方案	国外方案	经济比较
护坡桩	H 型护坡桩 488(11) × 300(8), 间距 1.1m。 桩长 27m 的 176 根, 24m 的 92 根, 18m 的 126 根, 总用钢量 1181t	H 钢桩 350 (12) × 350 (19), 交底时改 400 × 400, 间距 1.1m, 桩长 28m, 308 根, 总用钢量 1417t。	国内方案节约 9.9 万元
锚杆	采用 3 层锚杆, 选用 2 台西德锚杆机与 1 台自制锚杆机, 节约外汇, 加快施工进度, 节约用水, 锚杆总长 11426m	采用 5 层锚杆, 选用 4 台日本锚杆机, 锚杆全长 11717m	国内方案节约 2 道腰梁节约钢材 124.55t, 金额 5.4 万元, 节约外汇 30 万美元。自制锚杆机钻孔 40%, 节约金额 22.62 万元, 提高效率 20%, 锚杆总长度减少 291m, 节约金额 4.8 万元, 料具省 6.62 万元
挖土	采用内外坡道收尾平台, 挖土分层接力法	栈桥上挖土, 栈桥下配合小推土机、挖土机	国内方案节约 366.01 万元 国内方案总计节约 415.35 万元