

连云港软土区基坑支护方案分析与比较

吴连祥, 周宏博

(启东市建筑设计院有限公司, 江苏 启东 226200)

摘要: 基于连云港软土区的工程地质特点, 综合考虑安全、变形、施工难易度、造价等因素, 分别对开挖一、二层地下室基坑的多种支护方案进行分析与比较, 总结归纳出技术效益、经济效益较好的支护方案, 可为软土地区类似基坑工程支护方案的选型、设计提供借鉴和参考。

关键词: 软土区; 基坑支护; 方案分析

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 2096 - 7195(2019)03 - 0047 - 06

作者简介: 吴连祥(1960 -), 男, 启东市建筑设计院有限公司, 教授级高级工程师, 一级注册结构工程师, 注册岩土工程师。主要从事岩土工程设计。E-mail: qdsjywlx@126.com。

Analysis and comparison of foundation pit support schemes of soft soil area in Lianyungang

WU Lian-xiang, ZHOU Hong-bo

(Qidong Architectural Design Institute Co., Ltd., Qidong 226200, China)

Abstract: Based on the engineering geological characteristics of Lianyungang soft soil area and also taking into account safety issues, deformation, construction problems, cost and other factors, this paper analyzes and compares various support schemes for the foundation pit excavation of basement-1 and basement-2. The support schemes with good technical and economic benefits have been collected to provide reference for the selection and design of similar foundation pit support schemes in soft soil areas.

Key words: soft soil area; foundation pit support; scheme analysis

1 连云港软土区工程地质概述

连云港市地处洪泽湖、骆马湖下游, 东临黄海, 地势低洼, 历有洼水走廊之称。工程地质既有古老的变质岩, 又有近代沉积的海相淤泥, 地形地貌分为构造剥蚀山地、山前堆积台地、海积平原三类工程地质区。

其中海积平原为连云港的软土区, 土层的分布规律及物理力学指标参见表 1。

综合该区域多份工程地质资料, 在基坑影响深度范围内, 自地表向下地质情况可归纳为三大层:

第(1)层: 硬壳层-表层粘土层, 灰黄色, 土质尚好, 层厚较薄, 一般在 2 m 左右。

第(2)层: 极软层-淤泥层, 青灰色, 为海相沉积的高压缩性土, 抗剪强度低, 沉降变形大, 厚度 8~10 m。

第(3)层: 较硬层-陆相沉积粘土层, 中、低压缩性土, 厚度 10~13 m, 物理力学性质较好。

在连云港软土区这样的工程地质条件下, 基坑支护具有一定的地域性和特殊性。一层地下室基坑坑底上下均处在第(2)层-淤泥层内, c 、 ϕ 值极低, 支护桩必然要插入第(3)层-陆相沉积粘土层内, 为控制变形, 支护桩插深较大。二层地下室基坑深度全部位于第(2)层-淤泥层内, 坑底距第(3)层-陆相沉积粘土层较近, 只有充分利用第(3)层土作为支护结构的持力层, 才能解决支护结构的强度、变形和稳定问题。结合基坑支护工程实践, 就该地区基坑支护方案进行分析与比较。

基坑挖深范围内以淤泥为主, 渗透系数小, 降水措施侧重于排水止淤, 下面主要分析支护方案, 而不对降排水方案作详细描述。

为便于分析比较, 设定一层地下室基坑挖土深度 5 m, 二层地下室挖土深度 10 m, 基坑支护安全等级二级、坡顶荷载取 20 kPa, 采用同济启明星软件计算, 土工参数按表 1 取用。

2 基坑支护方案分析与比较

表 1 各土层的物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

层号	土层名称	土层厚度 /m	重度 /(kN/m^3)	地基承载力特征值 f_{sk}/kPa	地基压缩模量 E_s/MPa	直剪快剪		钻孔灌注桩	
						$\varphi_c /^\circ$	C_c /kPa	极限侧阻力标准 q_{sk}/kPa	抗拔系数 λ_i
①	素填土	1.00	18.0			8.00	12.00		
②	粉土	1.30	18.2	60	2.90	7.30	21.3	38	0.70
③	淤泥	8.70	16.4	40	1.92	1.80	7.90	12	0.70
④	粘土	4.30	18.1	170	7.83	14.70	55.70	70	0.75
⑤	含砂姜粉质粘土	0.7	20.0	200	6.53	15.10	51.90	82	0.77
⑥	粘土	2.20	19.2	160	7.61	14.40	62.60	70	0.75
⑦	粘土	2.70	19.5	240	10.83	15.10	70.20	81	0.75
⑧	含砂姜粉质粘土	1.20	20.0	280	7.02	15.00	45.90	86	0.77
⑨	粉质粘土	1.70	20.2	260	9.88	16.00	46.80	84	0.75

2.1 一层地下室基坑

(1) 放坡开挖方案

放坡开挖具有施工方便、造价低廉等优点。适用于场地周边环境相对简单，对基坑变形无严格控制要求，且场地具备放坡条件的基坑。

放坡开挖须验算边坡的稳定性，经计算：坡率达 1:10，边坡稳定安全系数 1.18，接近 1.2。计算结果表明：基坑挖深 5 m，水平放坡距离要达 50 m 左右，方能满足边坡稳定要求，如图 1。显然，一般基坑工程周边场地不具备这样的放坡条件，因此放坡方案基本不适用。

若在坡面增设 4 道土钉，土钉长度均为 15 m，倾角 45°，竖向间距分别为 1.5 m、1 m、1 m、1 m，水平间距均为 1 m，坡率取 1:8，边坡稳定安全系数 1.16，说明增设土钉，效果也不理想。

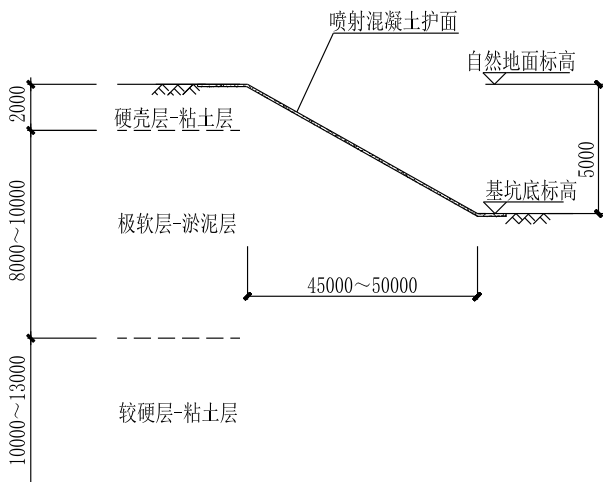


图 1 放坡开挖方案 (单位: mm)
Figure 1 Plan of step-slope excavation

(2) 重力式挡土墙方案

采用水泥搅拌桩进行浅层土体加固，在一定深度和宽度范围内形成水泥土坝体，以同时达到挡土

和止水目的。

优点：基坑开挖方便，挡土墙养护到期，就可以直立开挖至坑底；缺点：需要占用坑外较大场地，挡土墙抗变形的性能较差。

拟定方案采用直径 700 mm 双轴水泥搅拌桩，相互搭接 200 mm 的格构式挡土墙，水泥掺入比 15%，42.5 普通硅酸盐水泥，墙宽 4.7 m，墙体插入坑底深度 9 m，插深比 1.8，计算结果：最大位移 81.3 mm，抗倾覆安全系数 0.81，搅拌桩应力验算不满足要求。

如对被动区沿基坑裙边采用水泥搅拌桩加固，加固厚度 3 m，宽度 4 m，如图 2 所示，经计算挡土墙最大位移减小到 22.5 mm，抗倾覆安全系数提高到 1.2，搅拌桩强度验算满足规范要求。说明坑内加固使重力式挡土墙的性能得到了显著改善。

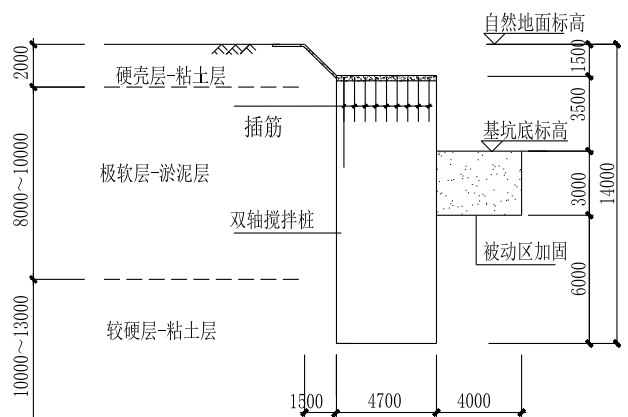


图 2 重力式挡土墙方案 (单位: mm)
Figure 2 Plan of gravity retaining wall

经过计算分析可知：单独采用重力式挡土墙方案，往往不能满足支护设计要求。若同时在被动区对基坑裙边进行适当加固，重力式挡土墙方案具有实施的可行性。

(3) 悬臂桩方案

仅靠桩插入坑底一定深度, 属于悬臂式支护, 包括没有支撑和锚固的板桩式支护、排桩式支护。

优点是: 占用坑外场地较小, 结构简单, 施工方便; 缺点是: 围护结构变形较大, 不易控制, 嵌固深度大。

拟定方案采用直径 1 m, 间距 1.2 m 的钢筋混凝土钻孔灌注桩, 插入基坑坑底深度 12 m, 计算最大位移 101.4 mm, 抗倾覆安全系数 1.02, 而且配筋量也很大 (主筋 47Φ25, III级钢)。

显然, 该方案不可行。

采用双排桩, 在前排桩的后侧 2.8 m 处再设一排钻孔灌注桩, 桩径、桩长与前排桩相同, 间距 2.4 m, 两排桩顶用连梁相联, 经计算: 最大位移 48.6 mm, 抗倾覆安全系数 1.11。可见, 插深比已达 2.4, 还不能满足规范要求, 此方案欠佳。

但如在单排桩方案的被动区沿基坑边采用水泥搅拌桩加固, 加固厚度 3 m, 宽 4 m, 如图 3 所示, 计算挡土墙最大位移减小到 25.7 mm, 每根桩承担的最大弯矩标准值 559.6 kN·m, 灌注桩主筋配 13Φ22, III级钢, 抗倾覆安全系数提高到 1.39, 其它验算都能满足规范要求。因此, 被动区加固, 效果明显。

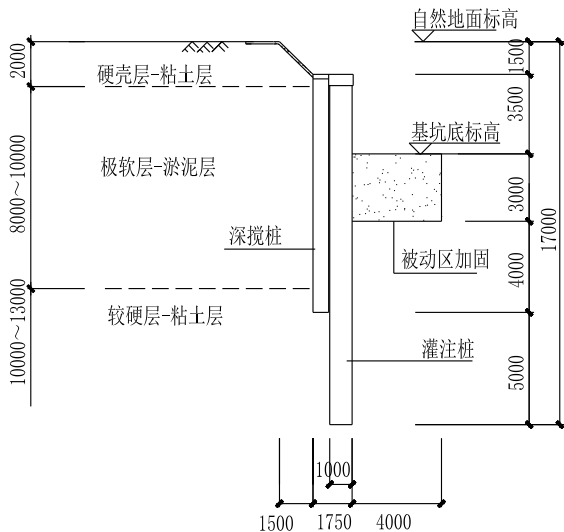


图 3 悬臂桩方案 (单位: mm)

Figure 3 Plan of cantilever pile

(4) 桩加撑方案

桩加撑是一种最基本且最可靠的支护方案, 优点: 支护结构刚度好, 变形小; 缺点: 施工不便, 造价高, 拆撑、换撑施工繁, 工期长。

桩通常选用 PHC 管桩、钢筋混凝土灌注桩、钢板桩、SMW 工法桩, 支撑可以选用各种钢管、型钢或钢筋混凝土材料。

桩加撑方案其强度、刚度、稳定性容易满足设计要求。但如用在面积较大的基坑工程中, 则支撑

多, 立柱多, 往往成本更高。

如能将水平内撑改为斜抛撑, 则可以有效解决上述问题。

拟定方案如图 4 所示: 采用直径为 0.7 m, 间距为 0.9 m 的钢筋混凝土钻孔灌注桩, 插入基坑底部深度为 9 m, 桩长 12.5 m, 斜撑采用 Φ377×8 钢管, 间距 6 m, 水平倾角 30°, 支撑轴力标准值 1361.14 kN, 斜抛撑基础采用钢筋混凝土结构。

计算结果: 最大位移 35 mm, 每根桩最大弯矩标准值 422.5 kN·m, 灌注桩主筋 12Φ25, III级钢, 其它验算均满足要求。

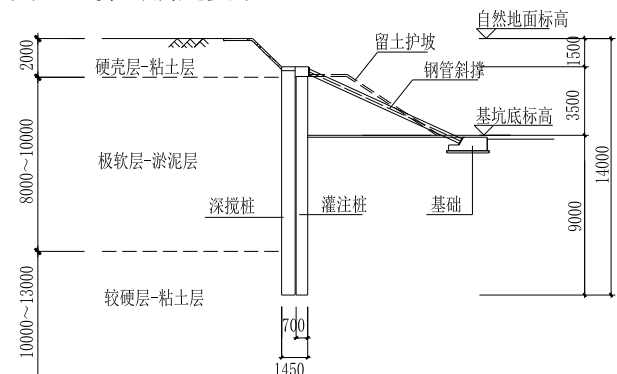


图 4 桩加斜撑方案 (单位: mm)

Figure 4 Plan of pile plus oblique bracing

该方案可行, 但地下室底板需分多次施工, 工期相应加长。

(5) 桩加锚方案

在基坑的外侧设置锚桩, 对竖向挡土结构提供锚拉力, 优点: 坑内无支撑, 施工方便, 工期短、造价低; 缺点: 坑外设置锚桩可能超出用地红线。

拟定方案采用钻孔灌注桩, 直径 0.7m, 间距 0.9 m, 桩长 12.5 m, 在距坑顶 1.7 m 处设置 1 道锚桩, 桩长 22 m, 桩径 500 mm, 间距 1.8 m, 倾角 40°~45°, 内配 3Φ15.2 钢绞线, 形成单支点桩锚受力结构体系。冠梁采用钢筋混凝土梁, 断面 0.7 m×0.5 m。如图 5 示。

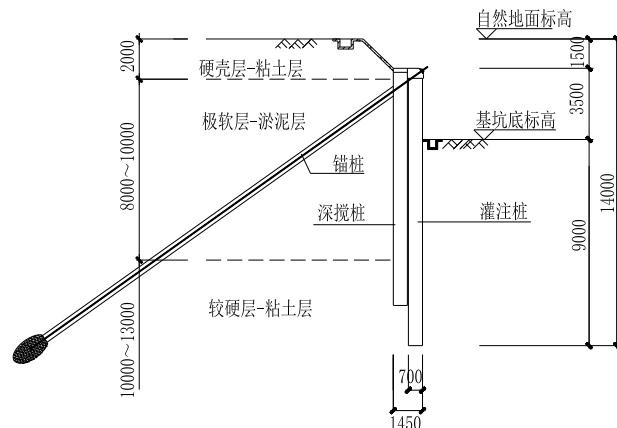


图 5 桩加锚方案 (单位: mm)

Figure 5 Plan of pile plus anchor

计算结果：最大位移 28.6 mm，每根桩最大弯矩标准值 489.1 kN·m，灌注桩主筋 15Φ25，III级钢，锚桩锚拉力标准值 495.54 kN，抗拔安全系数 $1.81 > 1.6$ ，稳定性验算均满足要求。

如采用钢板桩代替灌注桩及止淤桩，造价的优势将更加明显。

综合以上分析，对于一层地下室基坑，比较可行的支护方案及其性价比汇总见表 2。

2.2 二层地下室基坑

二层地下室基坑支护，采用放坡、重力式挡墙、悬臂桩方案，显然都不可行，只就桩加撑和桩加锚方案进行分析与比较。

(1) 桩加撑方案

二层地下室桩加撑方案通常采用钢筋混凝土灌注桩加两道钢筋混凝土内支撑。

由于设置两道内支撑，设撑、换撑、拆撑，施工难度大大增加，往往造价也高。

如果设置一道内支撑，不仅可以降低支撑系统的造价，更重要的是减少一道内支撑的浇筑、养护和拆除工序，大大缩短工期，方便土方开挖和主体结构施工。为了尽可能减小支护桩的水平变形和弯矩，将一道支撑系统尽量下移，一般距坑顶 3.5 m 左右。

因此，两层地下室如采用桩加撑方案应优先考虑设置一道撑，这样工期较短，施工较方便，造价也较低，如图 6 示。

(2) 桩加锚方案

二层地下室基坑支护用外锚代替内撑，承担水平力，因取消内撑，方便挖土，无须拆撑、换撑，施工进度快，工期短，造价低。

该软土区桩加锚支护方案具有如下特点：

a) 排桩上端与冠梁相连，下段支承于第(3)层土-陆相沉积粘土层内，充分发挥该土层物理力学性质较好的作用。

b) 锚桩上端通过冠梁或腰梁与排桩联结，下段穿过第(2)层土-淤泥层，锚固于第(3)层土-陆相沉积粘土层中，稳定，可靠。

高压旋喷加劲水泥土桩用作锚桩，它通过旋喷搅拌法形成扩大头水泥土变径桩体，并插入钢绞线作锚筋制作而成，与传统的锚杆、锚索相比具有显著优点，方案示意图 7。

近年来，为了解决锚桩超红线的问题，研发的采用高压旋喷工艺的可回收式锚杆，不仅承接了传统锚杆的技术优点，而且可在施工后回收，消除了

周边场地的后续施工障碍，具有广阔的应用前景。

通过以上分析可知，对于二层地下室基坑，采用桩加撑及桩加锚方案都是可行的，但桩加锚方案优势更明显，如采用桩加撑方案则以设一道撑为佳。

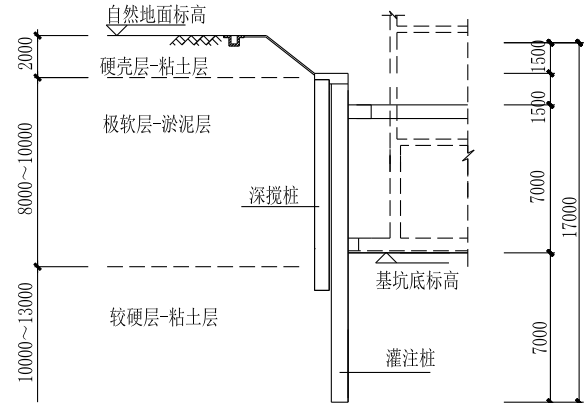


图 6 桩加撑方案 (单位: mm)
Figure 6 Plan of pile plus bracing

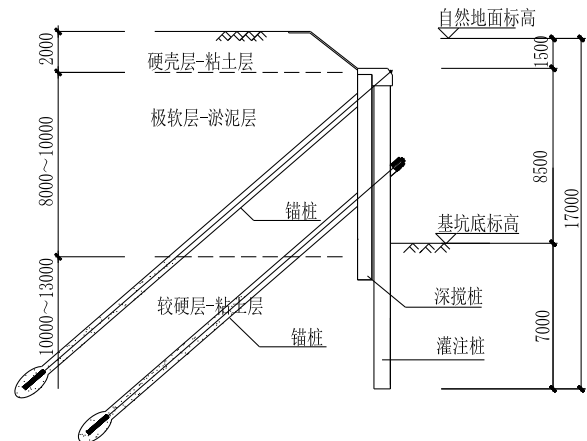


图 7 桩加锚方案 (单位: mm)
Figure 7 Plan of pile and anchor

3 工程实例

实例 1，秀逸苏杭东苑工程位于连云港市新浦区玉兰路北、学院路东。基坑南北宽 125 m，东西长 200 m，基坑面积约 25000 m²，挖深 5.5 m。

支护方案剖面图如图 8 所示，除上段放坡外，其下采用 Q295bz-400×170 mm 拉森钢板桩，小锁口打入，桩长 12 m，插入坑底深度 7.8 m，桩顶设钢筋混凝土冠梁，断面 0.6 m×0.6 m，冠梁侧面设置锚桩，锚桩长 22 m，桩径 450 mm，间距 1.6 m，倾角 35°，内配 3Φ15.2 钢绞线，形成单支点桩锚受力结构体系。

计算结果：最大位移 25.3 mm，每根桩最大弯矩标准值 274.9 kN·m，钢板桩边缘最大正应力 189.21 MPa，小于拉森钢板桩允许应力 265 MPa，每根锚桩的最大锚拉力标准值 287.05 kN，抗拔安

表2 一层地下室基坑可行支护方案性价比表

Table 2 Performance-price ratio of feasible supporting scheme for foundation pit of the first basement

序号	方案名称及简述	抗倾覆安全系数	最大位移/mm	造价估算/(元/m)	施工难易度
①	重力式挡土墙加坑内加固, 墙厚 4.7 m, 插深 9 m, 坑内加固厚 3 m, 宽 4 m	1.2	22.5	12500	易
②	悬臂桩加坑内加固, 灌注桩 $\Phi 1\text{ m}$ 、@1.2 m、L=15.5 m, 坑内加固厚 3 m, 宽 4 m	1.39	25.7	17500	较易
③	桩加斜撑, 灌注桩 $\Phi 0.7\text{ m}$ 、@0.9 m、L=12.5 m, 钢管斜撑 $\Phi 377 \times 8$ 、@6 m	2	35	11500	较难
④	桩加锚, 灌注桩 $\Phi 0.7\text{ m}$ 、@0.9 m、L=12.5 m, 锚桩 $\Phi 0.5\text{ m}$ 、@1.8 m、L=24 m	2	28.6	12000	较易

全系数 1.82 > 1.6, 其余验算均满足规范要求。

采用拉森钢板桩, 省去了排桩外侧的止淤桩, 钢板桩还可回收利用, 每延米基坑支护费降低到 9000 元左右。

监测结果: 桩顶冠梁水平位移均在 30 mm 以内, 周边道路最大沉降 23.85 mm。桩锚支护结构取得了较好的技术经济效益。

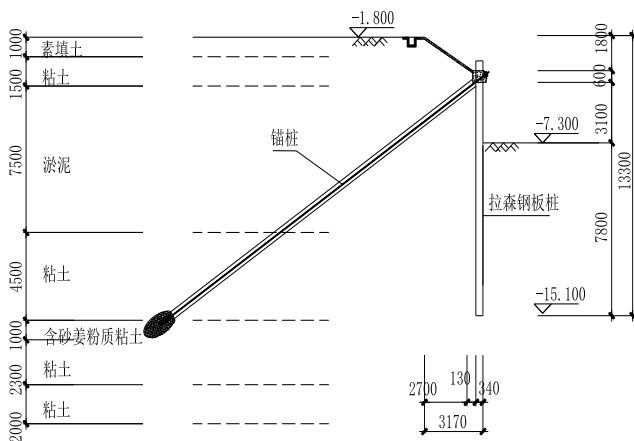


图8 实例1方案剖面图 (单位: mm)

Figure 8 Profile of example 1

实例2, 秀逸苏杭2期工程位于连云港市新浦区科苑北路东侧, 凌州路南侧。

基坑南北向宽约 110 m, 东西向长约 310 m, 周长 840 m, 基坑面积 34100 m², 基坑挖深 10.3 m; 主楼挖深 11.2 m。

支护方案如图9所示, 基坑段上部 1.8 m 放坡支护, 下部桩锚支护, 排桩用 $\Phi 800\text{ mm}$ 钢筋混凝土钻孔灌注桩, 间距 1 m, 桩长 16.5 m, 在距坑顶 2.0 m、4.8 m 处分别设置第一、第二道锚桩, 桩长分别为 28 m、22.5 m, 桩径 400 mm, 间距 1.5 m, 倾角 40° ~ 45°; 在距坑顶 7.6 m 处设置第三道锚桩, 桩长 17 m, $\Phi 400\text{ mm}$, 间距 2 m, 倾角 40° ~ 45°, 形成 3 支点桩锚受力结构体系, 灌注桩外侧设一排 $\Phi 700\text{ mm}$ 水泥搅拌桩止水、止淤。冠梁采

用钢筋混凝土梁, 断面 1 m × 0.8 m, 腰梁采用双拼 28 a 槽钢。

监测结果: 从基坑开挖到地下室底板施工结束, 压顶梁最大水平位移: 基坑北侧 19.02 mm, 西侧 18.21 mm, 最大沉降 7.05 mm。

深层土体水平位移曲线大致呈倒锥形, 距地表 1 m 处最大水平位移 10.38 mm。

附近道路及地下管线的变形均未超过报警值。

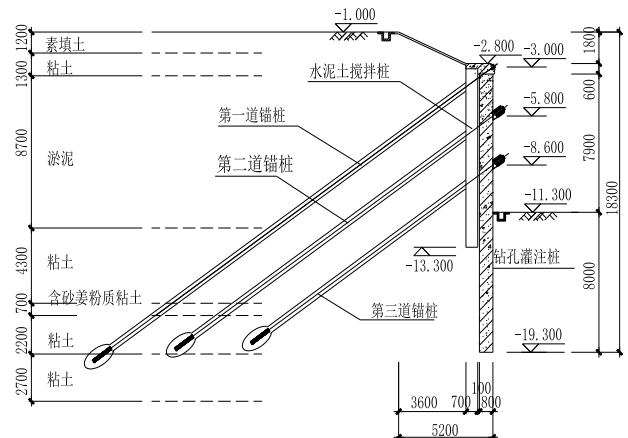


图9 实例2方案剖面图 (单位: mm)

Figure 9 Profile of example 2

4 结 语

针对连云港软土区工程地质特点, 对一层地下室、二层地下室基坑的支护方案进行了分析与比较, 最后小结如下:

(1) 第 1 层土为硬壳层, 应充分利用硬壳层土质尚好的特性, 基坑上段 1.5 ~ 1.8 m 采用放坡支护方案, 技术可行, 施工方便, 节省造价。

(2) 第 2 层土为淤泥层, 具有不透水性, 坑内采用明沟加集水井疏干排水, 坑顶设截水沟拦水、排水。为防止淤泥从排桩间的缝隙中挤出, 须在间隔布置的排桩外侧设一排水泥搅拌桩止水、止淤。

(3) 第3层土为陆相沉积粘土层,土性好,强度高,应充分发挥其潜能,用作支护桩的持力层,高效合理、安全可靠。

(4) 一层地下室基坑采用桩加一道锚的支护方案,安全、经济,特别是排桩采用拉森钢板桩,绿色环保、更经济,应优先选用。重力式挡墙或悬臂桩支护必须在坑内被动区进行适当加固方可满足设计要求,造价相对较高。

(5) 二层地下室基坑采用桩加2~3道锚的支护方案,变形小、造价低,而且在基坑内形成无撑空间,大大缩短地下室的施工周期,特别是如排桩采用SMW工法桩,优点更突出,应优先选用。桩

加撑方案虽然刚度大,对周围环境影响小,但施工繁、造价高,应综合权衡利弊,如必须采用则尽量设置一道内撑。

参考文献:

- [1] JGJ 120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.