

文章编号: 1000 - 7598 (2014)增 2 - 0290 - 09

大面积基坑多级支护理论与工程应用实践

郑 刚, 郭一斌, 聂东清, 刁 钰, 刘 畅

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: 大面积基坑采用常规钢筋混凝土水平支撑时, 其水平支撑造价高、施工工期长, 且拆除后会产生大量固体废弃物。发展了系统的大面积基坑多级支护方法, 对其破坏机制和设计方法开展了研究。当围护结构内侧的反压土宽度不够大时, 采用多级支护取代宽度较大的反压土, 可有效控制基坑围护结构变形。当两级支护之间宽度较小时, 多级支护的工作机制和破坏机制近似于异形重力式挡土墙, 可产生整体式破坏 (包括整体倾覆、整体失稳等); 而随着多级支护之间的宽度增大, 土体的破坏面可进入多级支护的围护桩之间的土体, 并使多级支护桩的破坏产生相互关联的影响; 当多级支护的宽度足够大时, 多级支护可产生各自独立的破坏。工程应用实践表明, 条件适当时, 多级无支撑支护可取得较好的经济效益并节省地下工程工期。

关 键 词: 基坑; 稳定性; 变形; 多级支护; 工程应用

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Theory of multi-bench retaining for large area foundation pit and its engineering application

ZHENG Gang, GUO Yi-bin, NIE Dong-qing, DIAO Yu, LIU Chang

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: When the horizontal reinforced concrete struts are used in retained foundation pit of large area, the cost of horizontal reinforced concrete struts will be very high and need long construction period. Moreover, large amount of solid waste will be produced after the struts been demolished. Therefore, the multi-bench retaining method is developed and was used in large area foundation pit projects. The failure mechanism of multi-bench retained foundation pit is investigated and design method is studied. The multi-bench retaining structure can fail as overall stability failure or overall overturning failure like a gravity retaining wall when the width of the bench is small. The slip surface can extend into the soil between retaining pile of different benches with the increase of the width of the bench, this leads to the mutual-effect between the multi-bench retaining piles. Separate failure can occur to the multi-bench retaining pile when the width of the bench is big enough. The application of multi-bench retaining method shows that multi-bench retained foundation pit with the use of horizontal reinforced concrete struts can be highly cost-effective and construction period of underground structure can be significantly reduced.

Key words: foundation pit; stability; deformation; multi-bench retained excavation; application in engineering

1 引 言

目前, 深大基坑工程支护技术已成为当前建筑业的一大技术难点。基坑的开挖深度可达到 20 ~ 30 m, 软弱土中基坑一次性开挖面积达 $5 \times 10^4 \sim 10^5 \text{ m}^2$, 大面积的深基坑也越来越多。例如: 上海虹桥交通枢纽开挖面积达 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^2$ 以上; 天津仁恒海河广场基坑开挖深度为 17.5 m, 基坑开挖面积约 10^5 m^2 ; 天津高银 Metropolitan 中央商务区基坑

开挖面积近 10^5 m^2 , 大面积基坑开挖深度为 19 m, 天津大悦城基坑开挖面积约 $7 \times 10^4 \text{ m}^2$, 大面积基坑开挖深度为 15.5 m; 天津津港中心基坑开挖面积达 $6 \times 10^4 \text{ m}^2$ 以上; 位于天津滨海新区软土中的天津滨海财富世贸中心基坑长度近 400 m, 基坑开挖面积近 $5 \times 10^4 \text{ m}^2$, 基坑开挖深度约 6 m。

对大面积基坑, 当基坑开挖深度较大、土质相对软弱时, 基坑支护常常需要设置钢筋混凝土水平支撑, 如图 1 所示。

收稿日期: 2014-06-19

基金项目: 国家科技支撑计划资助课题 (No. 2012BAJ01B02)

第一作者简介: 郑刚, 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事软土地基与地下工程方面的研究工作。E-mail: zhenggang1967@163.com

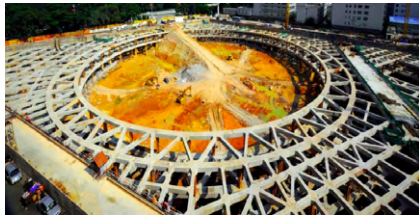


图 1 大面积基坑钢筋混凝土水平支撑
Fig.1 Horizontal concrete struts of large-area foundation pit

由图 1 可以看出，对大面积深基坑，密集的水平支撑工程量大，存在着支撑造价高、施工工期长、土方开挖不便、建筑物的地下结构部分施工不便、拆除会产生大量固体废弃物的缺点。因此，近年来针对天津土质条件下的大面积基坑工程，作者开展了多级支护的研究，提出了多种形式的多级支护型式，揭示了其工作机制和破坏机制，提出了考虑其破坏形式的设计方法，发展了基坑多级支护技术，并成功应用于工程实践。

2 基坑多级支护的定义及形式

2.1 基坑多级支护的概念

如图 1 所示，为了满足基坑围护桩（墙）的稳定、变形与内力控制的要求，需要设置一道或多道水平支撑（或锚杆），此时基坑的典型剖面如图 2 所示。对于以软弱黏性土为主的天津地区，20 世纪 90 年代的工程实践经验表明，采用锚杆时，往往会产生较大的围护桩水平位移和较大的地面沉降，从而对基坑周边环境造成有害影响。

对于天津市代表性土层分布条件，根据基坑变形控制要求的严格程度的不同，开挖深度为 6~11 m 的基坑可采用 1~2 道水平支撑，开挖深度为 11~15 m 时一般采用 2~3 道水平支撑，15~20 m 时需采用 3~5 道水平支撑。

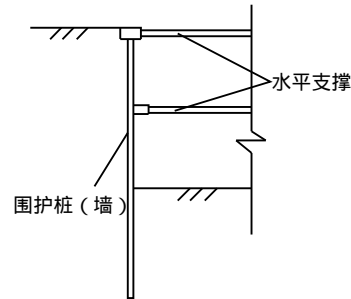


图 2 有水平支撑支护典型剖面图
Fig.2 Typical profile of foundation pit with horizontal retaining

对应于图 2 所示的典型剖面，当地下室结构外有一定的场地，且对基坑变形的要求不是很严格时，则可采用图 3 所示的多级支护形式，通过设置两排或多排桩体和墙体，实现基坑边坡的稳定与变形控制，从而避免大面积水平支撑的使用。

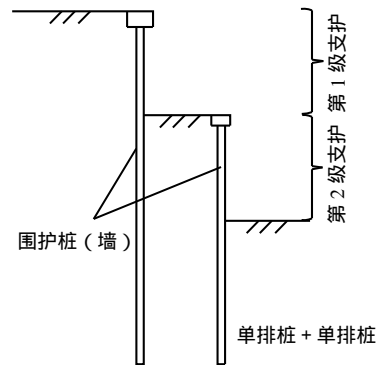


图 3 典型多级支护形式剖面图
Fig.3 Typical profile of multi-bench retained excavation

另外，当大面积基坑靠近基坑边缘附近有局部加深的基坑时，也往往形成图 3 所示的多级支护。

2.2 基坑多级支护形式

在近年来的工程实践中，作者设计的多级支护形式见图 4。

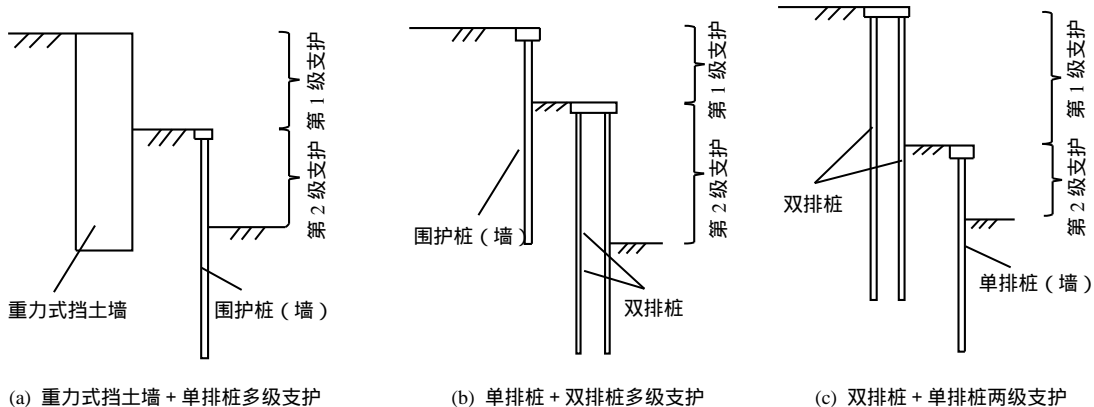


图 4 多级支护主要形式
Fig.4 Main types of multi-bench retaining

对于图3所示的单排桩+单排桩多级支护、图4(a)所示的重力式挡土墙+单排桩多级支护形式,主要用于基坑总体深度不大,基坑支护以悬臂式单排桩或重力式挡土墙为主,辅以单排桩2级支护。当基坑采用悬臂式单排桩或重力式挡土墙进行设计并完成支护结构施工、但因设计变更导致基坑深度加大时,或者大面积基坑深度采用重力式挡土墙支护、基坑内存在靠近基坑边缘的局部深基坑时,可采用此种2级支护形式。对天津市土质条件来说,重力式挡土墙或悬臂式单排桩的适用深度最大一般不超过5.5m。但采用上述两种支护形式后,基坑开挖深度可达8m左右,从而实现了取消钢筋混凝土水平支撑。

图4(b)所示的形式主要用于以第2级双排桩支护为主、第1级单排桩为辅的多级支护。根据作者已进行的研究和工程应用经验,此时第1级支护深度较小,一般为3~4m,第2级支护深度可达5~8m,即基坑总体支护深度可达11~15m,当1级支护、2级支护宽度足够大时,目前已应用的最大基坑深度达22.5m。

图4(c)所示的形式主要用于以第1级双排桩支护为主、第2级单排桩为辅的多级支护。根据作者已进行的研究和工程应用经验,此时第1级支护深度较大,一般为6~8m,第2级支护深度可达3~4m,即基坑总体支护深度可达11~13m,当1、2级支护宽度足够大时,可支护的最大基坑深度还可进一步增大。

上述2级支护可同理发展为3级支护甚至更多级支护。例如,国家大剧院基坑最大开挖深度为32.5m,采用了图5所示的3级支护,由上到下分别采用了排桩+锚杆、地下连续墙+锚杆和薄壁悬臂地下连续墙进行了多级支护。

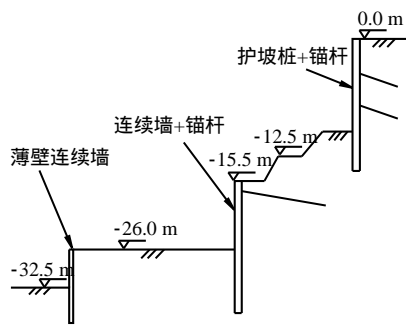


图5 国家大剧院3级支护
Fig.5 Three-bench retained excavation in China's National Grand Theater project

此外,为了提高各级支护的抗侧移能力,还提

出了图6所示的几种支护形式,可用于多级支护中的任一级支护形式中。

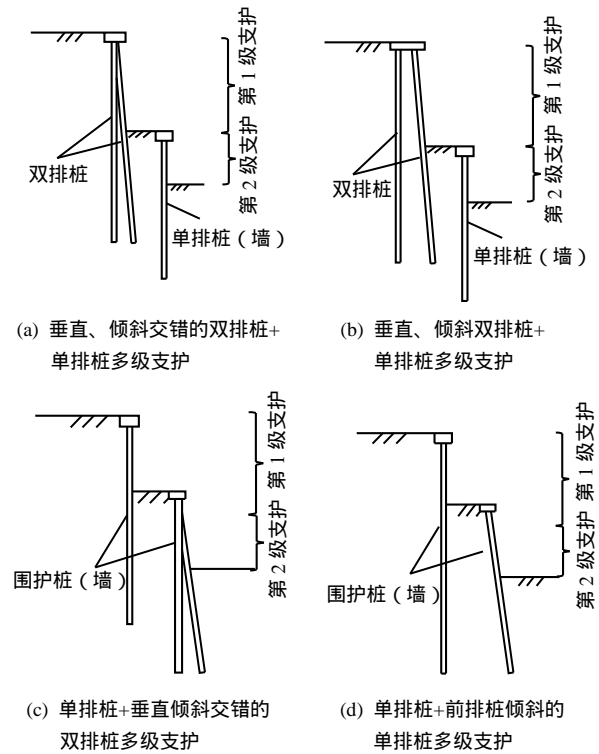


图6 设置倾斜桩的多级支护
Fig.6 Multi-bench retaining with inclined retaining pile

图3~6所示的不同形式的多级支护工作机制、破坏形式均远较现在单一的悬臂式支护、重力式挡土墙支护以及图2所示的单道或多道支撑的支护形式更为复杂。各级支护之间可能存在着复杂的相互作用,从而使多级支护的工作机制、变形机制和破坏机制变得较为复杂。

3 基坑多级支护的工作和破坏机制

3.1 基坑多级支护基本机制

如图7所示,对不同形式的支护,条件适当时,可采用在围护桩(墙)以内设置反压土(earth berm)的形式,以提高基坑围护桩(墙)的稳定性,减小

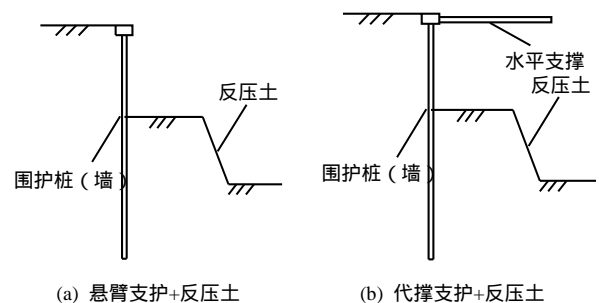


图7 围护桩+反压土支护
Fig.7 Retaining piles with earth berm

围护桩变形与内力。关于反压土的工作机制已有较多的研究^[1-4]。

郑刚等^[5]研究了图 7 所示的反压土工作机制，提出了基于弹性抗力法，考虑反压土对开挖面上围护桩（墙）提供的抗力作用及对开挖面以下土的侧向刚度提高的简化计算方法，见图 8(a)。进一步地，李顺群等^[6]基于 Rankine 土压力理论、滑移线场理论和 Boussinesq 解答在均布条形荷载作用下的表达式，建立了考虑反压土自重对坑底土体水平抗力的增强作用和反压土本身的嵌固作用两种机制时悬臂式支护结构嵌固深度的计算方法（见图 8(b)），并进行了算例分析。研究表明：虽然反压土能提供给支护结构的水平抗力较小，但由于其合力力臂较大，因此，对支护结构有明显的嵌固作用。

此外，李顺群等^[7]还基于《建筑基坑支护技术规程》的相关规定和非饱和土强度理论，建立了考虑预留土的嵌固和水平支撑双重作用和非饱和特性时支护结构嵌固深度、位移和内力的计算方法。研究表明，预留土的作用可以概括为两个方面：虽然能提供的水平抗力不是很大，但由于其合力力臂较大，因此对支护结构有明显的嵌固作用，从而可以缩短支护结构的嵌固深度；能在支护结构上部形成弹性支承，从而减小支护结构的水平位移和内力。算例分析表明，采用预留土并降水的施工方法能大幅度缩小支护结构的嵌固深度、位移和内力。

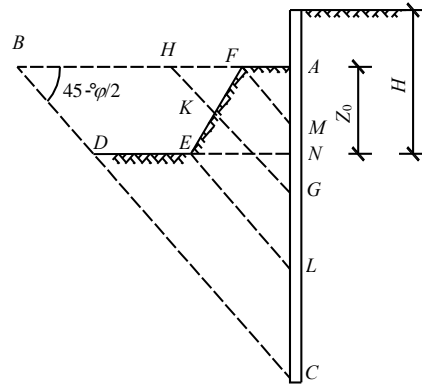
由图 7、8 及相关研究可看出，反压土的作用需要足够的反压土宽度和高度来保证。但实际工程中，由于地下室外墙以外的可用场地往往不能满足较大的反压土宽度要求，而较小的反压土宽度又不能有效地起到减小围护桩内力与位移、提高基坑稳定性的作用。

因此，基于图 7 的反压土支护形式，当实际工程无法保证反压土的宽度时，如在距围护桩（墙）一定距离处设置相对较短的排桩（墙），如图 9 所示，使较小宽度的反压土与围护桩（墙）形成 2 级支护，从而可有效地起到减小围护桩内力与位移、提高基坑稳定性的作用。

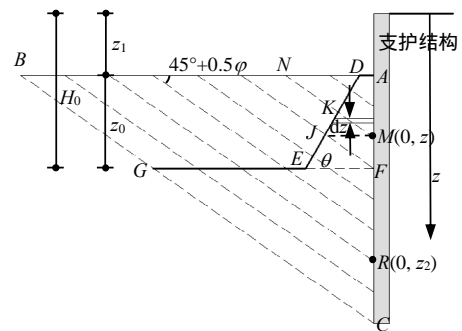
对图 9 所示的 2 级支护，从机制上只需 2 级支护的桩（墙）加上两排围护桩（墙）之间的土体，对第 1 级支护提供的支撑作用和嵌固左右等效，则可将 2 级支护的宽度相对反压土宽度显著缩小。

3.2 基坑多级支护破坏机制

多级支护的关键理论就在于其破坏机制。为了研究其破坏机制，任望东^[8-9]、郑刚^[10]等采用有限元法、MPM (material point method) 等方法，研究



(a) 反压土作用的经验计算方法 1



(b) 反压土作用的经验计算方法 2

图 8 反压土对围护桩的影响简化计算方法
Fig.8 Simplified methods considering the effect of earth berm on retaining pile

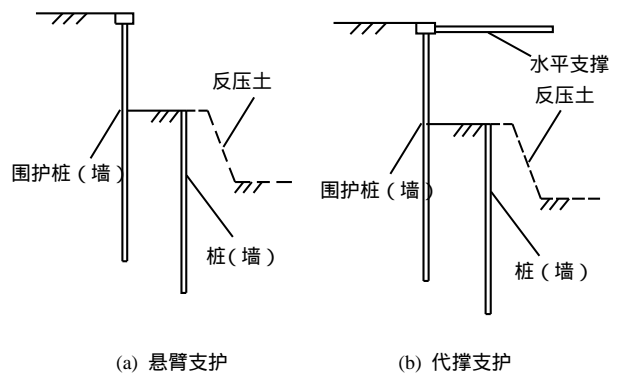


图 9 反压土转化为二级支护
Fig.9 Earth berm replaced by second-bench retaining

了多级支护形式中，如图 10 所示的基本计算模型基础上，变化前后排桩的距离 B_1 、前后排桩的长度 L_1 和 L_2 、两级支护的高度 H_1 和 H_2 等参数变化时，多级支护的工作机制和破坏形式。图 10 所示模型参数如下，按平面应变问题分析，考虑模型对称性，取基坑宽度的 1/2 进行分析，为了考虑足够大的基坑开挖宽度，取总开挖宽度为 200 m。模型尺寸为 200 m×40 m。第 1 级开挖深度 $H_1 = 6$ m，第 2 级开挖深度 $H_2 = 4$ m；单排桩长 $L_1 = 12$ m，双排桩长 $L_2 = 25$ m，其前、后排距为 3.6 m；单排桩与双排桩的间距 $B_1 = 5$ m。不考虑超载和放坡的影响。模型边界条件为

底部约束水平位移和竖向位移,两个侧边约束水平位移。图10依托的实际工程、数值模拟采用的本构模型及计算参数见参考文献[9]。

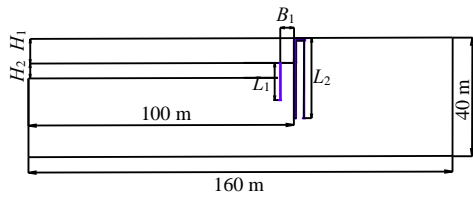


图10 多级支护数值分析模型

Fig.10 Numerical analysis model of multi-bench retaining

根据上述模型,随着 B_1 、 L_1 、 L_2 、 H_1 、 H_2 等参数的变化,可得到3种典型破坏模式:

(1) 整体式破坏 即两排桩之间土体形成一个类似整体的重力式挡土墙,发生整体的倾覆破坏,形成如图11(a)所示的临界滑动破坏面,土体滑动面不进入两排桩之间土体。此时,多级支护可近似按重力式挡土墙计算稳定。

(2) 分离式破坏 两级支护的围护桩各自发生倾覆破坏,形成如图11(b)所示的临界滑动破坏面,两组滑动面互不相交,土体滑动面进入两排桩之间土体。此时两级支护可各自按照相应开挖深度、围护桩参数进行稳定计算,不必考虑两级支护的相互作用。

(3) 关联式破坏 两级支护的围护桩各自发生倾覆破坏(但可能分先后),形成如图11(c)所示的临界滑动破坏面,两组滑动面进入两排桩之间土体,在两排桩(墙之间)相交。此时两级支护不能按照相应开挖深度、围护桩参数进行稳定计算,需要考虑两级支护的互作用。

对于多级支护的变形问题,其相互作用应比稳定分析时的相互作用更为复杂。

3.3 多级支护变形相互作用与稳定相互作用分析

B_1 、 L_1 、 L_2 、 H_1 、 H_2 等参数变化,可同时影响多级支护的变形与抗倾覆稳定安全系数。为了研究两者的变化规律及两者变化规律之间的关系,针对图10所示的模型,进行了不同开挖比 H_1/H_2 (H_1/H_2 分别为3/7、4/6、6/4、7/3)时,多级支护抗倾覆安全系数与第1级围护桩最大水平位移的对比,见图11。图中竖直虚线是第1级支护最大位移随着两级支护之间水平距离 B 增大逐渐减小并趋于稳定对应的 B 值;竖直实线是基坑稳定安全系数(稳定破坏指两级支护中任意一级趋于破坏)随着两级支护之间水平距离 B 增大逐渐增大并趋于稳定对应的 B 值。

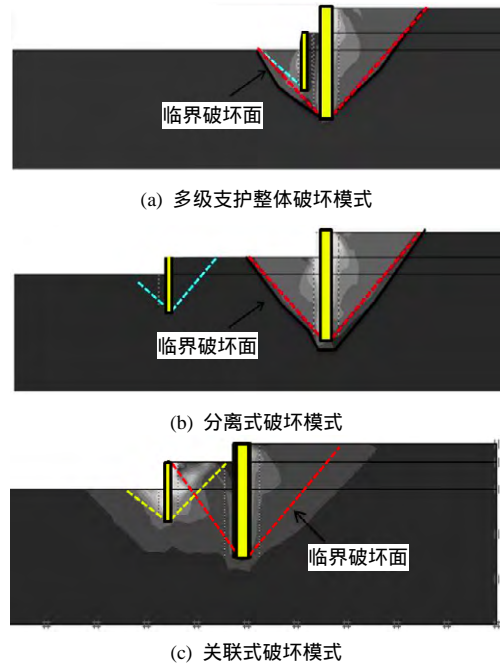


图11 多级支护破坏模式分类

Fig.11 Classification of failure modes of multi-bench retaining

从图12可以看出,其他条件不变时,随着两级支护之间距离 B 的增大,基坑安全系数随之增大并逐渐趋于稳定,同时,第1级支护桩的最大水平位移随 B 值增大而减小,并逐渐趋于稳定。但是,对应于不同的 H_1/H_2 时,随着 B 的增大,多级支护的宽度对围护桩的稳定与变形的影响规律虽大致相同,但第1级支护的围护桩顶最大位移趋于稳定对应的 B 值不一定与基坑稳定安全系数随 B 值增大而减小并趋于稳定对应的 B 值相同。同时, B 值的增大在提高稳定性和减小变形两个方面都是有利的,但当两者均随 B 值增大而趋于稳定后,再增加 B 就没有意义了。

4 工程应用实例

4.1 天津嘉海花园1期工程

拟建工程位于天津市河北区狮子林大街与海河东路交口处。基坑近似为矩形,开挖面积为43 980 m²,基坑开挖深度为15.75 m,基坑北侧建筑物位置处基坑挖深为17.60 m,局部深坑挖深为22.0 m,如图12所示。基坑北侧围护桩3~6 m以外就是重要道路。现场的土层分布如图13所示,土的物理力学指标如表1所示。

基坑支护方案对比表明,根据该工程的开挖深度、土层情况、环境条件等,一般需要采用2~3道钢筋混凝土水平支撑,由于基坑开挖面积很大,钢筋混凝土水平支撑的造价将近3 000万元。为此,采用了中心岛的支护方案,即先开挖基坑内部土体,

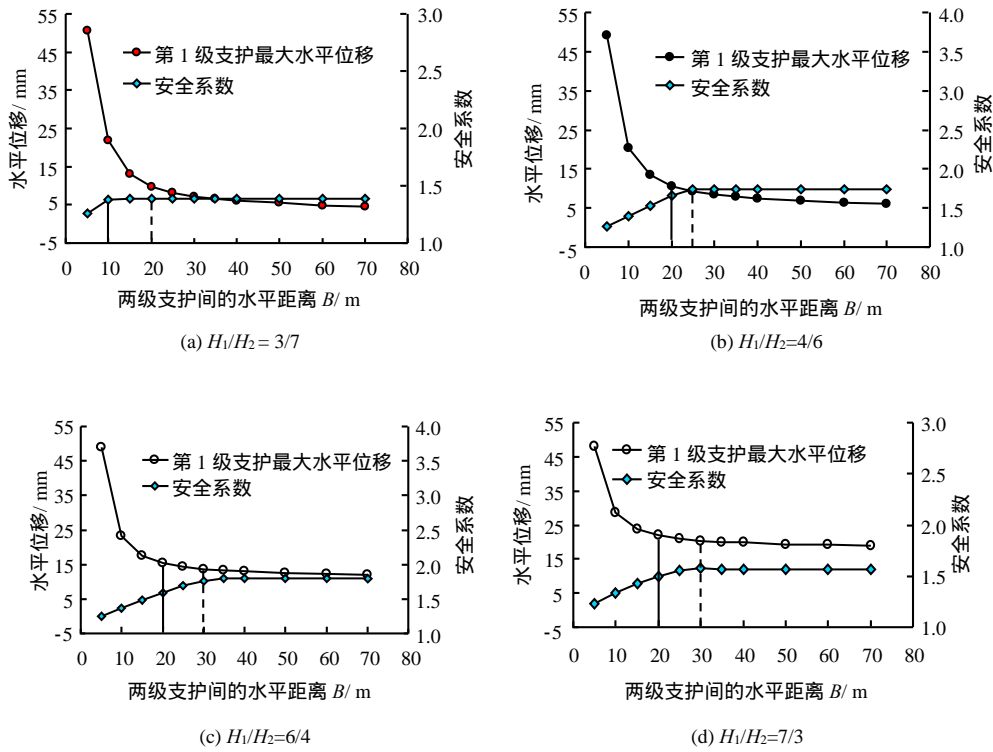


图 12 第 1 级支护变形、稳定与两级支护之间距离 B 关系

Fig.12 Variation of horizontal displacement of 1st bench retaining pile and factor of stability in two-bench retaining structure with width of bench

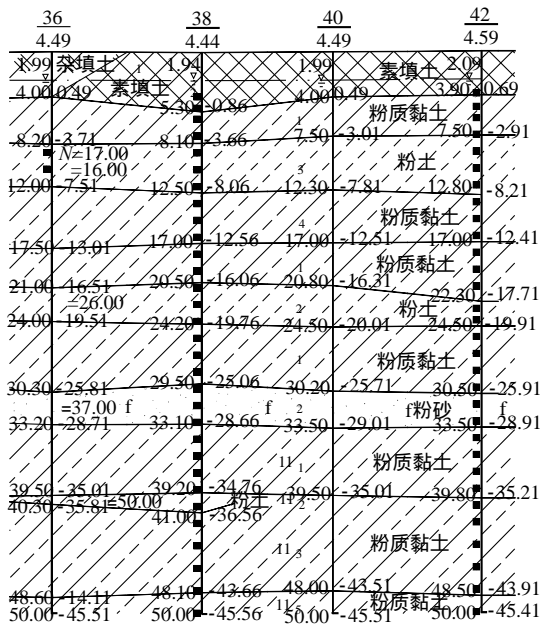


图 13 施工现场土层剖面图 (单位: m)

Fig.13 Ground profile at construction site(unit: m)

基坑周边预留反压土,形成图 9(a)所示排桩+反压土的支护形式。由于基坑北侧基坑开挖深度达 17.60 m,局部开挖深度达到 22.0 m,采用排桩+反压土的支护形式时,围护桩水平位移过大并导致坑外地面、路面沉降过大和开裂,因此,采用了图 14(a)所示的多级支护形式,反压土宽度为 22 m。该处基坑开挖

到底后的实景见图 14(b),第 1 级单排桩桩身水平位移的侧斜结果见图 14(c)。

由图 14(a)可看出,基坑开挖到基坑底部后,基坑局部开挖深度达到 22.0 m,1 级支护的围护桩桩身侧斜结果表明,围护桩最大水平位移约 37 mm。基坑外马路无任何开裂。

4.2 天津嘉海 2 期基坑工程

本工程为民用住宅,14 栋多层及高层住宅楼及多栋公用配套建筑,其中 9 栋约 130 m 高层住宅和 5 栋高度约 30 m 多层住宅。拟建场地建筑范围内设有整体 1 层地下室,局部 2 层地下室。基坑开挖面近似为五边形,开挖面积为 50 600 m²,2 层地下室处基坑开挖深度为 10.8 m,1 层地下室处基坑开挖深度为 7.0 m,局部电梯坑挖深为 12.8 m。深度大致为 6.5~7.0 m 之间,地下 2 层处的基坑开挖深度在 8.8~10.3 m 之间,其中局部电梯坑深度达 12.3 m。

工程基坑开挖面南侧距已建地下直径线控制线最近为 2.08 m;西侧距用地红线最近为 12.6 m,距翔纬路最近为 19.2 m;北侧和东侧偏北有规划用地退线北侧距用地退线最近为 30.6 m,距嘉海花园高层住宅楼最近为 44.1 m;东侧距用地退线最近为 9.8 m,距嘉海花园高层住宅楼最近为 22.2 m。该工程所在场地的土层分布见图 15,土层物理力学指标见表 2。

表1 嘉海1期工程土层物理力学指标
Table 1 Physico-mechanical indexes of soils for the first phase of Jiahai

层号	土层	w / %	重度 / (kN/m ³)	孔隙比 e	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	压缩模量 E _{S1-2} / MPa	标贯击数	有效黏聚力 c' / kPa	摩擦角 φ' / (°)
1	杂填土		19.0							
2	素填土	31.7	18.7	0.940	11.8	0.89	4.38			
1	粉质黏土	30.0	19.2	0.875	13.0	0.72	4.50	9.89	26.38	
3	粉土	26.4	19.5	0.754	6.5	0.76	12.20	6.33	29.03	
4	粉质黏土	29.7	19.2	0.844	11.1	1.03	5.71	8.6	14.73	27.07
1	粉质黏土	24.8	20.0	0.702	11.0	0.70	5.16	23.8	23.11	28.02
2	粉土	22.2	20.2	0.637	7.0	0.72	11.99	25.9		
1	粉质黏土	26.2	19.8	0.74	12.0	0.65	5.21	15.0	26.90	20.86
1	粉质黏土	25.6	19.9	0.737	11.2	0.62	5.45	19.7		
2	粉砂	16.4	21.1	0.487			14.13	36.3	13.20	35.90
1	粉质黏土	24.8	19.9	0.713	11.7	0.58	5.50		24.62	24.66
2	粉土	22.7	20.4	0.648	5.6	0.69	10.70	50.0	5.19	31.46
3	粉质黏土	27.2	19.6	0.783	12.6	0.61	5.82	22.3	27.50	24.23
5	粉质黏土	26.9	19.7	0.774	12.9	0.57	5.79	35.0	43.64	25.31

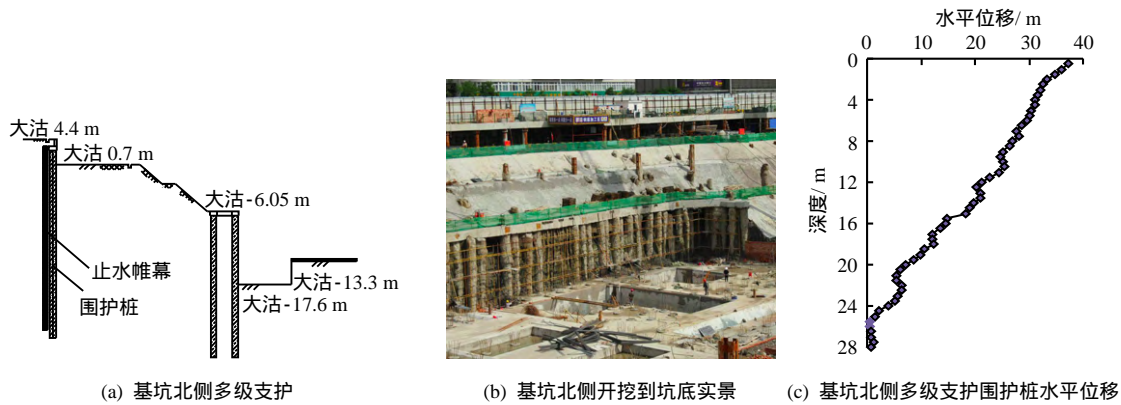


图14 嘉海1期北侧基坑多级支护

Fig.14 Multi-bench retained excavation at the north of the first phase of Jiahai

表2 嘉海2期工程土层物理力学指标

Table 2 Physico-mechanical indexes of soils for the second phase of Jiahai

层号	土层	含水率 w / %	密度 γ / (kN/m ³)	孔隙率 e	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	压缩模量 E _{S1-2} / MPa	固结不排水黏聚力 c _{cu} / kPa	固结不排水内摩擦角 φ _{cu} / (°)
1	杂填土		(19.0)					(8.0)	(6.0)
2	素填土	31.2	19.1	0.868	12.1	0.97	3.85	16.0	13.0
	淤泥质黏土	49.3	17.0	1.414	19.4	1.14	2.53	16.7	11.2
	黏土	33.7	18.8	0.963	16.3	0.72	3.85	23.9	12.9
1	粉质黏土	31.0	19.2	0.873	14.1	0.70	4.38	27.5	15.0
2	粉土	26.4	19.5	0.737	6.2	0.85	12.66	11.2	29.4
1	粉土	26.7	19.4	0.759	6.4	0.87	11.58	11.7	27.6
2	粉质黏土	30.2	19.2	0.845	11.4	0.99	5.19	20.4	16.9
	粉质黏土	26.4	19.8	0.740	11.8	0.68	4.81	23.7	16.3
11	粉土	22.1	20.1	0.624	6.0	0.67	13.98	11.9	30.3
12	粉质黏土	26.1	19.8	0.729	11.4	0.70	5.14	27.1	17.4
2	粉砂	19.4	20.5	0.554	6.4	0.66	14.50	11.8	31.1
1	粉质黏土	25.8	19.9	0.726	12.9	0.52	5.45	35.2	16.1
2	粉砂	20.3	20.4	0.576	5.5	0.62	15.53	11.3	31.2
3	粉质黏土	29.9	19.3	0.846	14.5	0.59	5.43	38.9	12.9
4	粉砂	21.0	20.1	0.607	6.1	0.68	13.54	13.4	30.4
	粉质黏土	28.6	19.5	0.814	12.1	0.49	5.69	42.2	13.2

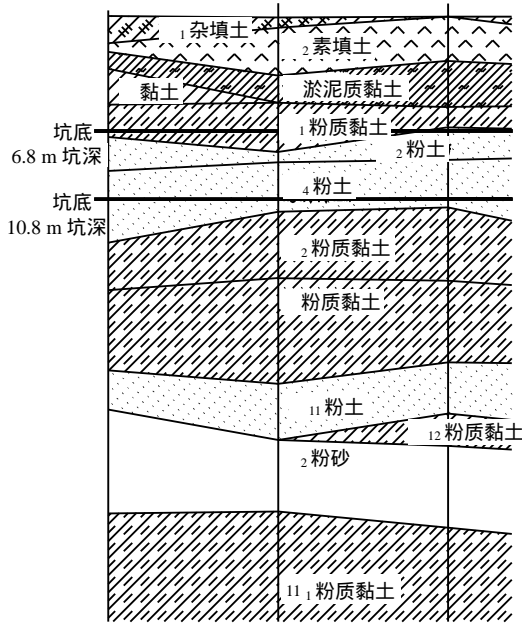


图 15 施工现场土层剖面图
Fig.15 Ground profile at construction site

确定基坑支护设计方案时考虑了以下几点：

(1) 对天津的土质条件，结合周围环境，基坑开挖深度超过 6.0 m 就需设置水平支撑，对深度为

10.8 m 的基坑，通常需设置一道水平支撑；

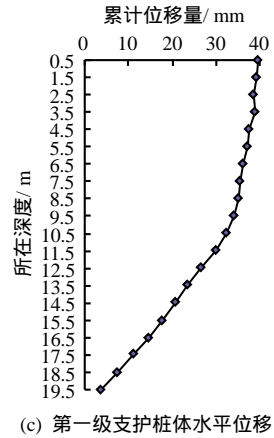
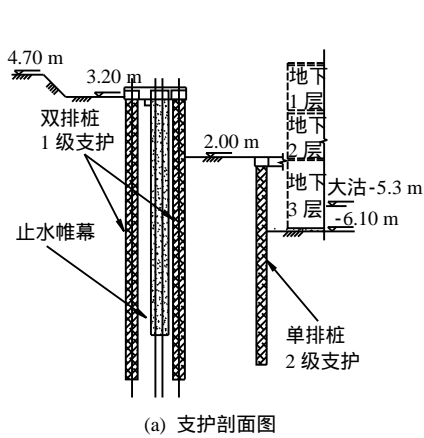
(2) 对地下室距离红线距离大于 15 m 的部位，采用了放坡开挖的形式；

(3) 对地下室距离场地用地红线 8~15 m 的部位，采用了图 7(a)所示的排桩结合反压土的形式，由于基坑深度较大，故将单排桩改为了双排桩；

(4) 对于反压土宽度小于 8 m 处，采用了图 16 所示的多级支护，两级支护之间土体宽度仅为 4~7 m；

(5) 由此，对开挖深度为 10.8 m 的大面积深基坑，实现了无水平支撑支护设计。各高层住宅施工时，可仅开挖建筑物处基坑，并只进行局部降水，实现“化大坑为小坑、分批降水、分批开挖、分批回填、最后施工地下车库结构”的目标，可大大加快高层住宅的施工，同时减小基坑的变形和各种风险。

由图 16(c)可见，图 16(a)所示剖面处基坑开挖到底后，对应于的墙顶水平位移为 39.9 mm，桩体的侧移表现出了明显的双排桩侧移性状，即桩顶横梁约束刚度的约束作用。本工程多级支护对变形的控制效果良好，取得了较好的技术经济效果。



(a) 支护剖面图 (b) 多级支护部分开挖后的实景图 (c) 第一级支护桩体水平位移

图 16 嘉海 2 期多级支护
Fig.16 Multi-bench retained excavation of the second phase of Jiahai

5 结 论

(1) 多级支护在条件适当时，其应用可避免大面积水平支撑的应用，降低工程造价、缩短工程周期，且避免了钢筋混凝土水平支撑拆除时产生的大量固体废弃物。

(2) 多级支护的破坏模式可分为整体式、分离式和关联式。多级支护的每级支护高度、两级支护之间距离、两级支护的围护桩的插入深度等均可影响多级支护的破坏模式。

(3) 基于多级支护的稳定、变形随每级支护高

度、两级支护之间距离、两级支护的围护桩的插入深度等的变化规律表明，其他条件不变时，随着两级支护之间距离的增大，基坑安全系数随之增大并逐渐趋于稳定，同时，围护桩的最大水平位移随之减小并逐渐趋于稳定。

(4) 对应于不同的 H_1/H_2 时，随着 B 的增大，第 1 级支护的围护桩顶最大位移趋于稳定对应的 B 值不一定与基坑稳定安全系数随 B 值变化并趋于稳定对应的 B 值相同。两者趋于稳定后，再增大两级支护之间的宽度 B 值就无意义了。

(5)此外,图6中还列出了带倾斜排桩的方式,作者的研究表明^[11-12],无论是单排桩还是双排桩,排桩适当的倾斜可显著减小围护桩水平位移和内力,其在多级支护中的应用尚待进一步研究,倾斜桩的施工技术也待突破。

参考文献

- [1] 郑刚, 陈红庆, 雷扬, 等. 基坑开挖反压土作用机制及其简化分析方法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1161 - 1166
ZHENG Gang, CHEN Hong-qing, LEI Yang, et al. A study of mechanism of earth berm and simplified analysis method for excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1162 - 1166.
- [2] 徐正来. 基坑工程中土坡的影响效应综合分析[D]. 上海: 同济大学, 2001.
- [3] Naval Facilities Engineering Command. Design manual 7.02: Foundations and earth structures[S]. Alexandria VA, USA: US Naval Facilities Engineering Command, 1986.
- [4] 龚晓南. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 129 - 149.
- [5] CLOUGH G W, DENBY G W. Stabilizing berm design for temporary walls in clay[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1971, 103(GT2): 75 - 90.
- [6] 李顺群, 郑刚, 王英红. 反压土对悬臂式支护结构嵌固深度的影响研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3427 - 3431.
LI Shun-qun, ZHENG Gang, WANG Ying-hong. Influence of earth berm on embedment depth of cantilever retaining structure for pit excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3427 - 3431.
- [7] 李顺群, 郑刚. 预留土对非饱和基坑支护结构的影响[J]. 工程力学, 2012, 29(5): 122 - 127.
LI Shun-qun, ZHENG Gang. Influence of earth berm on retaining structure for unsaturated pit excavation[J]. **Engineering mechanics**, 2012, 29(5): 122 - 127.
- [8] 任望东, 李春光, 田建平, 等. 软弱土中大面积深基坑工程快速支护施工技术[J]. 施工技术, 2013, 42(1): 35 - 39.
REN Wang-dong, LI Chun-guang, TIAN Jian-ping, et al. Rapid construction method of large area deep foundation excavation in soft soil[J]. **Construction Technology**, 2013, 42(1): 35 - 39.
- [9] 任望东, 张同兴, 张大明, 等. 深基坑多级支护破坏模式及稳定性参数分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 919 - 921.
REN Wang-dong, ZHANG Tong-xing, ZHANG Da-ming, et al. Parametric analysis of failure modes and stability of multi-level retaining structure in deep excavations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.2): 919 - 921.
- [10] 郑刚, 程雪松, 刁钰. 无支撑多级支护结构稳定性与破坏机制分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(4): 304 - 314.
ZHENG Gang, CHENG Xue-song, DIAO Yu. Analysis of the stability and collapse mechanism of non-prop and multi-stage retaining structure[J]. **Journal of Tianjin University (Science and Technology)**, 2013, 46(4): 304 - 314.
- [11] 郑刚, 白若虚. 倾斜单排桩在水平荷载作用下的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊): 39 - 45.
ZHENG Gang, BAI Ruo-xu. Behavior study of inclined single row contiguous retaining piles under horizontal force[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Supp.): 39 - 45.
- [12] 徐源, 郑刚, 路平. 前排桩倾斜的双排桩在水平荷载下的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊): 93 - 98.
XU Yuan, ZHENG Gang, LU Ping. Study on the behaviors of the double-row contiguous retaining piles with raking front-row piles under horizontal loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Supp.): 93 - 98.