

城市深基坑支护工程设计若干问题浅析*

Analysis of Some Problems with the Design of Supporting Engineering of Deep Foundations in Cities

吴 恒 潘树青 张信贵 易念苹
Wu Heng Pan Shuqing Zhang Xingui Yi Nianping

(广西大学 南宁市西乡塘路 10号 530004)

(Guangxi University, 10 Xixiangtanglu, Nanning, Guangxi, 530004)

摘要 分析与城市深基坑支护设计相关的主要影响因素,土体性状及设计思路等问题,强调土体结构强度在支护设计中的重要性,同时指出支护工程的设计要有系统分析和优化的思想。

关键词 城市 基坑 结构 设计

Abstract Through the analysis of such problems as the primary influence elements, soil properties and design thinking pertaining to deep foundation supporting design, this paper stresses the importance of soil structure strength in supporting design for which systematic analysis and optimization are needed.

Key words city, excavation, structure, design

中图法分类号 TU 473

在城市建设中,兴建高层、超高层建筑有如下几点特征:

(1)随建筑高度的增加,基础埋置深度越来越大,以满足其稳定性的要求。

(2)城市用地紧张,向地下开拓生存空间的趋势日益显著。如地下车库,商场等。

(3)基坑开挖要保证周围密集建筑和地下设施的安全。

这些特征便引发出深基坑支护的问题,相应的支护技术也成为高层建筑施工中一个非常突出的关键技术。

基坑支护工程设计涉及面广,有着较多的不确定影响因素^[1],加上设计理论尚不完善,支护设计有较大的随意性,或偏于保守,造成浪费,或有盲目性,造成工程事故。本文根据众多的有关深基坑支护工程的研究成果及本文第一作者所接触和参与过的一些深基坑工程实例,认为与支护工程密切相关的问题有:对主要影响因素的认识与分析,土体结构特性及

土压力计算,支护的思路及技术路线等。

1 主要影响因素及分析

城市深基坑支护工程大多数属临时支挡工程,具有显著的时间特征,要求在基坑土方开挖,基础工程施工期间确保基坑边坡稳定,其工程服务期至建筑(构筑)物的构件施工达到地面时便终止。

尽管基坑边坡的形成只是建(构)筑物施工过程中的一个环节,然而其毕竟与建(构)筑物同在一岩土环境之中,与场地的岩土特性相关,与建(构)筑物的结构相关。由于确保边坡稳定需采取有效的工程措施,因此影响基坑边坡支护工程设计的因素尚包括施工技术、方法及措施。

1.1 环境因素及分析

这里所称的环境包括建筑用地,场地岩土特性及地下水等。

1.1.1 建筑用地

由高层建筑用地的地理位置和环境,在进行支护工程设计和施工时应注意以下两点:

(1)高层建筑多处市中心,建筑场地周围建筑物密集,地下管线多,限制了基坑的放坡,往往需要垂直开挖,而在开挖中应注意到边坡侧移和地面沉降对

1997-07-28收稿

* 广西留学回国人员自然科学基金资助项目(9652013) 国家自然科学基金资助项目(49662010)。

周围建筑物和地下设施安全构成的潜在威胁

(2) 在城市中, 环保要求较高, 选择支护方案时, 应考虑到支护工程施工产生的振动, 噪音、泥浆、化学浆液等对城市功能正常运行的影响。

1. 1. 2 岩土特性

场地岩土特性是确定支护结构形式的一个重要因素, 不同地层组合模型对支护结构形式的要求不同。图 1 显示了两种地层组合模型:

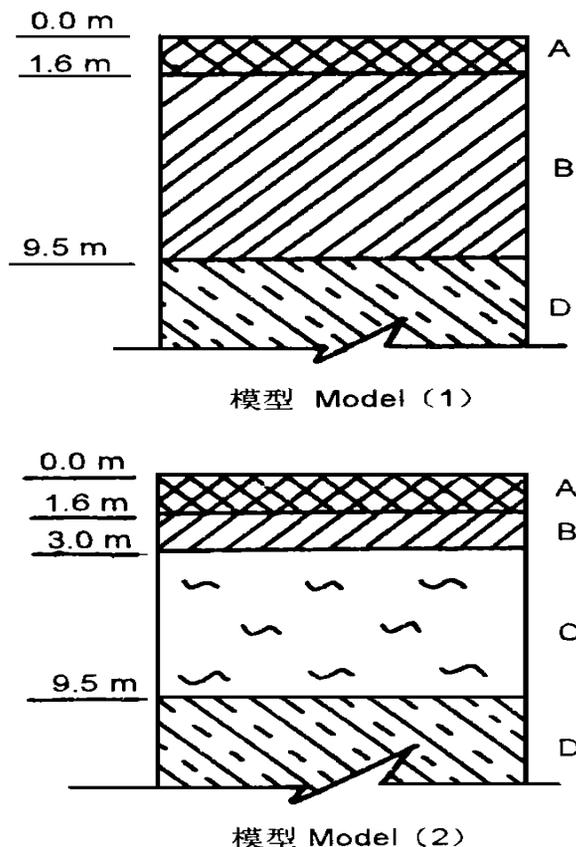


图 1 两种地层组合模型示意图

Fig. 1 Diagram of two composite soil layer models

A 杂填土 Miscellaneous fill; B 粘土 Clay; C 淤泥 Silt; D 粉质粘土 Silty clay.

假设基坑开挖深度 $H=12.0\text{ m}$, 模型 (1) 岩土特性比较好, 对支护结构形式无特别要求。模型 (2) 中存在一层 6.5 m 厚的淤泥, 为防止开挖中淤泥挤出, 就要采取连续的支护结构形式, 如钢板桩、地下连续墙、密排桩等, 或采取一些加固措施, 对淤泥层进行加固。

1. 1. 3 地下水

地下水对基坑支护结构形式的选取有很大的影响。统计资料表明, 国内因地下水处理不当引起的基坑支护事故占 22% 之多^[2]。

对场地地下水的处理常见有三种形式:

外降水: 操作简便, 基坑开挖施工安全, 支护结

构的形式较简单, 影响范围大, 易引发周边地质环境问题;

内降水: 对支护结构要求较高, 不影响周边地质环境;

补排结合降水: 操作较复杂, 支护结构形式较简单, 对周边地质环境影响小。

1. 2 建筑因素及其分析

对基坑支护工程设计而言, 其与建(构)筑物基础结构形式、基础工程施工方式相关。

1. 2. 1 基础结构形式

基础设计不能孤立地只设计基础结构本身而不考虑施工。反之, 基坑支护结构设计也要充分利用基础结构的现有条件, 以降低支护工程的造价。

如武汉佳丽广场中心岛斜内支撑支护采用图 2 的形式^[3]:

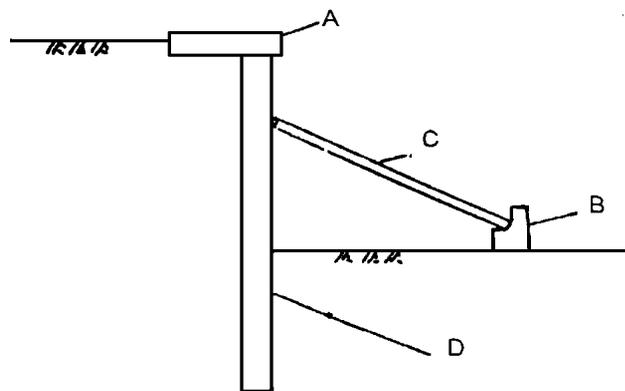


图 2 利用基础结构做支护结构的支撑点

Fig. 2 Use the foundation structure as the bearing point of the supporting structure

A: 锁口梁 Periphery beam; B: 承台 Bearing platform; C: 斜撑 Diagonal bracing; D: 钻孔灌注桩 Bored pile.

该工程采用群楼承台作为提供给支护结构支撑作用力的内斜撑支点, 充分利用了基础的有利条件, 节省了资金, 加快了工程进度。

1. 2. 2 基础工程施工

基础工程与支护工程同在一个施工场地, 均对场地的岩土施加扰动作用, 相互之间还可发生干扰。

例如, 当基础采用打入式桩基础时, 沉桩过程中对土体的挤压作用可波及支护结构, 造成支护结构的开裂。与此相似, 用打入式沉桩工艺施工支护工程桩时, 必然会对邻近基坑边缘的工程桩产生影响, 使工程桩产生位移或偏斜。

1. 3 施工技术、方法及措施

随岩土工程技术的发展, 各种岩土工程施工机具、技术的种类繁多, 而采用不同的方法手段对支护工程的设计是有影响的。

图 3 为“重力坝”式深层搅拌桩支挡结构示意图^[4]。

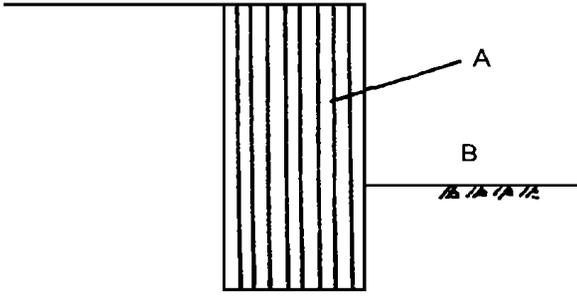


图 3 采用深层搅拌桩做基坑支挡结构体

Fig. 3 Using deep layer mixing pile as the supporting body of foundation pit

A 搅拌桩体 Mixing pile; B 坑底 Pit bottom.

该工艺的优点是: 施工时振动和噪音小, 工期较短, 在使用上结构平面形式变化灵活, 既可挡土也可防水, 坑内不设支撑, 坑外不设拉锚, 施工方便, 而且造价低廉。其缺点是: 为重力式支护结构, 体积一般较大, 支护深度有限, 对一些坚硬地层不适用。

2 土体工程理论现状

支护工程是对基坑边坡土体实施支挡, 与土体结构、变形、破坏等特征密切相关。对于支护结构的强度、稳定性计算又与土压力的计算相关。

2.1 经典土压力理论

2.1.1 几种土压力理论

土压力计算是支挡结构设计的一个难点, 但又是一关键环节。土压力的分布与土性, 支护结构形式, 施工过程都有很大关系。

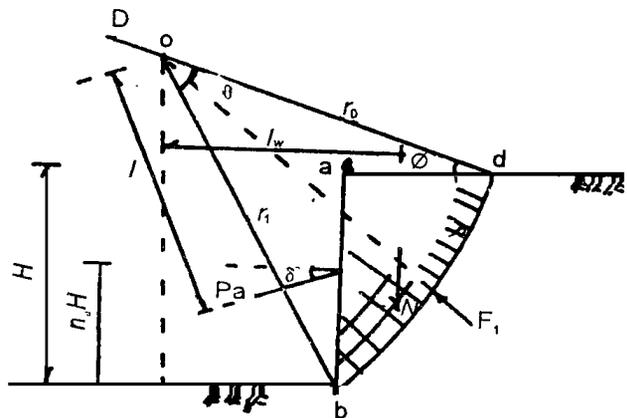


图 4 泰沙基土压力计算的模式图

Fig. 4 Computation model of Terzaghi earth pressure
 ϕ : 墙后土体内摩擦角 Angle of internal friction of soil behind retaining wall;
 δ : 墙摩擦角 Friction angle of retaining wall

(1) 泰沙基 (Terzaghi) 土压力计算模式^[5]

泰沙基土压力计算模型如图 4 所示。假设滑动面

为一螺旋线, 其给出的土压力计算公式为:

$$\text{对无粘性土: } P_a = \frac{W \cdot l_w}{l}$$

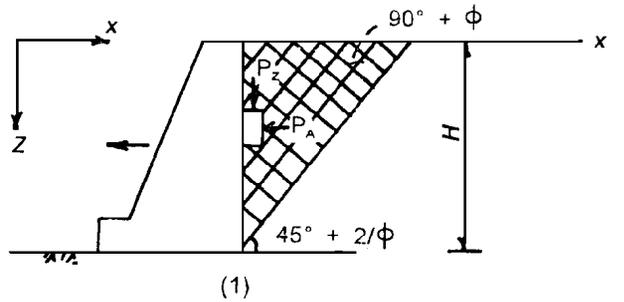
$$\text{对粘性土: } P_a = \frac{1}{l} \left[W \cdot l_w - \frac{c}{2 \tan \phi} (r_1^2 - r_0^2) \right]$$

上两式中, l_w , l 分别为土楔重 w 和支撑反力 P_a 对 0 点的力臂; r_0, r_1 分别为 0 点到 d 点和 b 点的距离; c 为土的粘聚力。

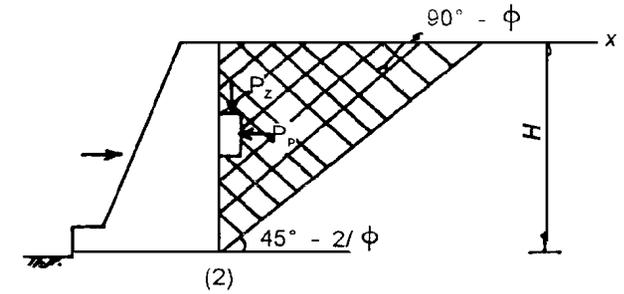
在具体计算中, 还要通过试算确定 d 点的真实位置。

(2) 朗肯 (Rankine) 土压力理论

朗肯土压力理论是假设墙后土体处于极限平衡状态推导得出的, 其模型如图 5 所示。



(1)



(2)

图 5 按朗肯土压力理论给出的示意图

Fig. 5 Diagram according to the Rankine earth-pressure theory

(1) 主动土压力 Active earth pressure (2) 被动土压力 Passive earth pressure.

其计算公式为:

$$\text{对无粘性土: } P_A = \frac{1}{2} r H^2 \tan^2 (45^\circ - \phi / 2)$$

$$P_P = \frac{1}{2} r H^2 \tan^2 (45^\circ + \phi / 2)$$

$$\text{对粘性土: } P_A = \frac{1}{2} r H^2 \tan^2 (45^\circ - \phi / 2) -$$

$$2c \cdot H \cdot \tan (45^\circ - \phi / 2) + \frac{2c^2}{r}$$

$$P_P = \frac{1}{2} r H^2 \tan^2 (45^\circ + \phi / 2) +$$

$$2cH \tan (45^\circ + \phi / 2)$$

式中, P_A, P_P 分别为主动土压力和被动土压力; r, ϕ, c 分别为墙后土体的容重, 内摩擦角和粘聚力。

(3) 库伦 (Coulomb) 土压力理论

库伦假设挡土墙是刚性的，墙背填土是无粘性土。当墙背离开土体移动或推向土体时，墙后土体达到极限平衡状态，如图 6 所示。BC 为破裂面，通过分析刚体 ABC 的平衡条件，按平面问题解得作用在挡土墙上的土压力。

$$P_A = \frac{1}{2} r H^2$$

$$\frac{\cos^2(\varnothing - X)}{\cos^2 X \cos(X + W) \left[1 + \frac{\sin(\varnothing + W) \sin(\varnothing - U)}{\cos(W + X) \cos(X - U)} \right]^2}$$

$$P_P = \frac{1}{2} r H^2$$

$$\frac{\cos^2(\varnothing + X)}{\cos^2 X \cos(X - W) \left[1 - \frac{\sin(\varnothing + W) \sin(\varnothing - U)}{\cos(X - W) \cos(X - U)} \right]^2}$$

式中, P_A, P_P, r, \varnothing 的物理含义同前; W 为墙摩擦角; 其余参数可参看图 6

2.1.2 经典土压力理论评述

由对土压力理论及其表达式的分析, 可以认为它们构筑的基础有如下两点:

(1) 土体在遭受扰动后, 其应力场 (主要是自重应力场) 将产生调整, 具有向侧向临空面释放变形的趋势。

正是由于这种调整和趋势, 才可能驱使土体产生侧向变形, 产生了作用在支护结构上的主动土压力。

(2) 土体是松散结构体, 颗粒间的“咬合”作用力被忽略。支撑理论的岩土模型是以饱和扰动土和砂土为物理原型。

由经典土压力理论还可以获得这样的推论: 基坑边坡土体只是一种作用在支护结构上的荷载, 支护结构提供的反力在量值上应与这种荷载相匹配。

正是由于经典土压力理论存在的缺陷, 导致在大量的工程实践中出现了土压力理论计算值大于实测值的现象。而其本质就是未把土体视为一种结构体, 忽视土体固有的结构强度。

2.2 土体的逐渐破损理论

沈珠江院士认为^[6], 逐渐破损理论是现代土力学的重要标志之一, 其描述在荷载增加的情况下, 土体真实的破坏过程。并且进一步提出 21 世纪土力学的核心问题是关于土体结构性的问题, 认为土体的结构强度是逐渐丧失的, 其结构完全破坏后尚有一定的强度。

奥地利岩石力学派的创始人缪勒认为, 对岩体实施支护仅仅是给其一种“帮助”, 目的是让岩体自己支护自己。

从本质上讲, 缪勒的观点是说明, 在实施岩体工程时, 尽可能少地扰动岩体, 尽可能发挥岩体的结构强度。

土体同岩体类似, 亦具有结构强度, 只是后者因在漫长的地质历史中颗粒产生了密实的胶结, 前者在颗粒间或是水胶连结或是轻微的产生钙质、硅质胶结。两者的差异只是在胶结程度上的量级差异。

注重土体工程性状还在于对不同性状土层在空间分布、组合的形式。

在城市环境下, 地基土中会存在软弱的淤泥、淤泥质土、填土等。通常这类土的抗剪强度值较小, 如图 7 所示。

然而在多数情况下, 淤泥质土的上下又常分布着工程性状较好的粘土层及粉质粘土层, 对淤泥质土层的侧向变形构成一种“抑制”作用。如果仅以淤泥质土的强度作为基坑边坡土体的强度, 或忽略土层的结构及层间变形的“抑制”作用则必定产生土压力理论计算值大于实测值的结果。

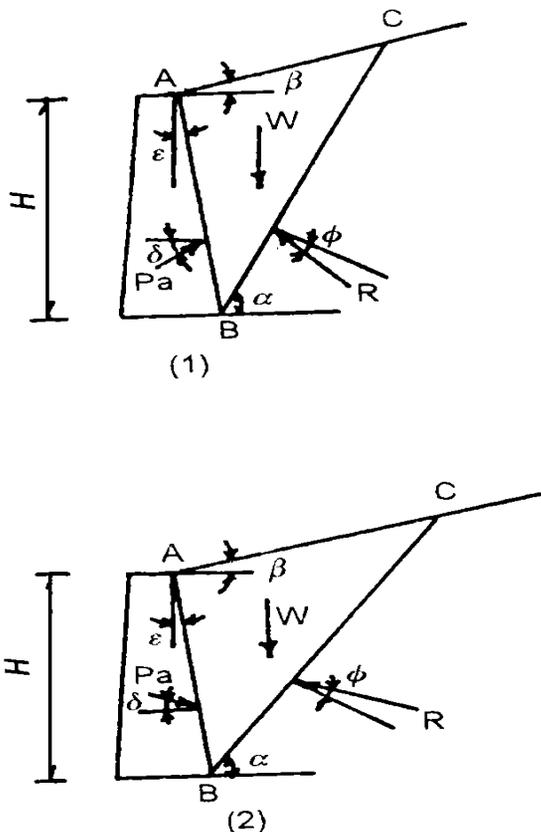


图 6 按库伦土压力理论给出的示意图

Fig. 6 Diagram according to the Coulomb earth-pressure theory

(1) 主动土压力 Active earth pressure; (2) 被动土压力 Passive earth pressure.

考虑土体结构的逐渐破损,土颗粒间的联接强度及不同介质层之间的变形协调作用,就可对土体工程性状有全面认识,由此才可能设计出合乎实际的支护结构体系

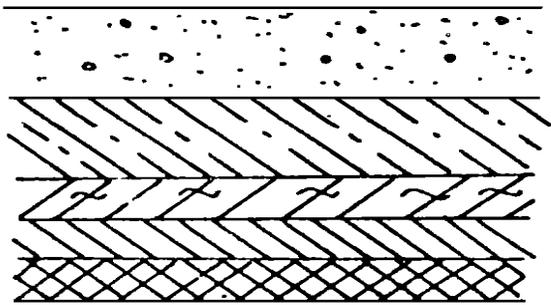


图 7 城市区土层结构示意图

Fig. 7 Diagram of soil layer structure in urban district

3 设计思路

对支护工程的设计,必须遵守两个原则:

- (1) 确保基坑边坡在给定时段内保持稳定;
- (2) 对土压力与地下水问题一并考虑。

在实施设计时,通常又有两种思路,即顺作法设计和逆作法设计。

3.1 顺作法设计

这是一种较为流行的设计思想和方法。其指导思想是:构造一个稳固的支护体系之后,再实施土方开挖和基础施工。

该设计方法在工程实施时具有简明,易组织管理的特点,在理论上有很好的“安全感”。但其缺陷是要独占工期,工程经济性差一些。

3.2 逆作法或半逆作法设计

这是一种有创意且逐步被工程界所采用的设计思想和方法。其指导思想是,支护工程与基础工程或土方工程施工同步或交叉,且互为安全依托。

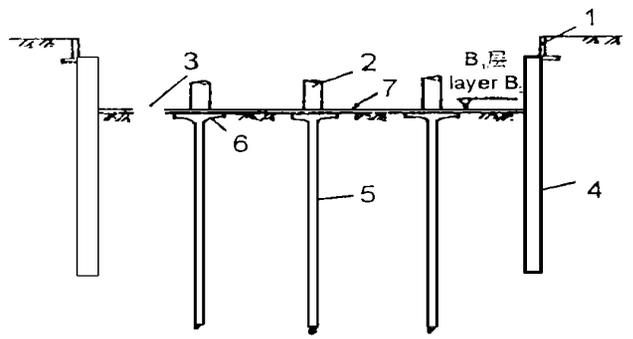
这类设计可分为三个分支。

3.2.1 建(构)筑结构的逆作法设计

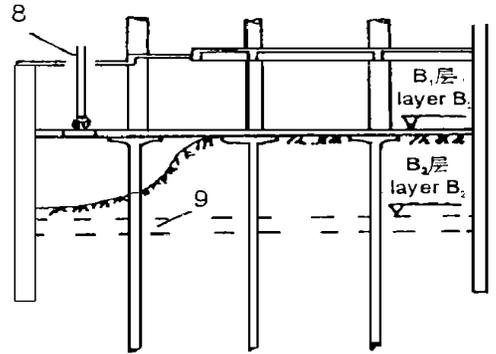
将基础结构与支护结构视为一体,在此基础上将建(构)筑物地面以上的部分与地面以下部分(基础工程)同步施工,是这种设计思路的要点。

通常对用地下连续墙(或连续绞结式灌注桩支护结构)作支挡结构者,其又是建(构)筑物基础的外墙。在其施工完毕之后便浇筑第一层地下室顶板,之后便可同时砌筑上部结构及下部土方开挖和施工地下室底板等。

以海口国际金融大厦的逆筑法施工为例^[7]。



挖去B₁层土准备浇筑楼板
Excavating layer B₁ and preparing to concrete the floor slab



B₂层挖土
Excavating layer B₂

图 8 逆筑法施工示意图

Fig. 8 Diagram of reverse sequence construction method

- 1, 导墙 Guide wall; 2, B₁层柱子 Pillar of layer B₁; 3, 预留出土口 Retaining exit for soil excavation; 4, 地下连续墙 Diaphragm wall; 5, 工字钢中间支承柱 steel middle bearing post; 6, 柱帽混凝土胎模 Concrete forging of column head; 7, 楼板混凝土胎模 Concrete forging of floor slab; 8, 出土抓斗 Soil grab bucket; 9, B₂层楼板 Floor slab of layer B₂

施工过程如上两图所示。其施工步骤为: (1) 先作导墙,后沿基坑四周做地下连续墙(此墙既作基坑挡土结构,又作建筑物外墙); (2) 打入中间支承柱; (3) 露天开挖到 B₁层楼底板,浇筑楼板并与连续墙连接,待楼板达到规定强度即可作为连续墙的支撑系统; (4) 按上述方法继续向下开挖土方并逐层施工,与此同时,在已竣工的底面梁板结构向上接柱子或墙板,向上逐层进行结构施工。

3.2.2 基坑支护工程结构的逆作法设计

将基坑支护工程结构的施工与土方开挖交替进行,是这种设计思路的要点。喷锚网支护就是这种设计的典型例子。

其施工工序为^[8]: 施工前降水(如存在地下水)→分层开挖→施工锚杆→坡面挂挂双向钢筋网→喷射

混凝土→按同样方法进行下一层开挖，挂网

从工序可以看出，这种设计可以使土方开挖与支护工程施工共用工期，对加快施工进度是有益的。但采用这种逆作法设计的基坑支护对土体性状有较严格的要求，且基坑深度通常不大于 7 m

3.2.3 变异的逆作法或半逆作法设计

如前所述，基坑支护工程的稳定性与土体性状和基础工程类型及施工方法相关。同理，其稳定性与土方开挖强度，顺序也密切相关

变异的逆作法或半逆作法设计将主要针对土方开挖及基础浇筑而言。其指导思想是，在场地环境许可的前提下，对基坑内的部分土体预留而暂不挖除，形成支护结构下部的反压作用力，当基础工程结构的一部分施工完毕且可以给支护结构提供支撑反力后，再挖除预留的反压土

上海人民广场地下车库工程的施工就体现这种设计的优越性。该工程开挖简图如下：

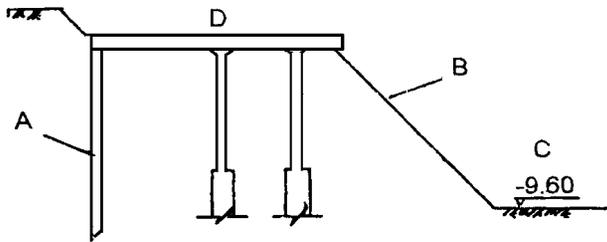


图 9 上海人民广场地下车库开挖剖面示意图

Fig. 9 Diagram of excavation section of the garage under the peoples square in Shanghai

A 连续墙 Continuous concrete wall; B 预留反压土坡 Retaining back-pressure soil; C 中心岛 Central island; D 圈顶板 Slab on the circle.

其施工工序为：(1) 先作外围连续墙围护体系；(2) 开挖中心岛，并预留足够的反压土和平缓的坡度来保证连续墙在侧压作用下的平衡和边坡自身的稳定；(3) 在中心岛用正作法结构施工；(4) 在圈顶板下用半逆作法施工，最后使中心岛与周围连续墙连成整体

这种设计的优点在于充分利用土体自身实施加固，在施工组织和管理上亦较前一种设计简单易行，具有较好的经济性

4 支挡与加固

对基坑边坡实施支护，其实现方式上可分为支挡与加固两类

支挡是假定边坡一定范围内的土体会产生侧向位移，而抑制这种机械位移是对土体施加反力。构筑支挡结构即为提供反力。

加固是认为边坡土体变形破坏的原因是其内在的强度不够，采取加固措施的目的是提高土体的结构强度，最终实现让土体“自立”。

4.1 支挡工程设计

支挡工程设计的重要依据之一是对边坡土压力的计算，由此产生多种类型的支挡形式。如悬臂式和单点、多点支撑式等

支挡结构体是一种人造物，其强度和稳定性完全可以由所采用的材料、空间组合形式、构件的尺寸等因素控制，因而有较高的“安全感”。如前所述，由于土压力计算的原因，在设计上不考虑土体自身的结构因素，其结果大多是偏于保守，经济性较差

4.2 加固工程设计

目前，常用的加固措施是对土体实施灌浆，目的是使土颗粒间的连接强度增加。在实施技术上有压力灌浆，深层搅拌，旋喷注浆等工艺。在一些特定的环境下，尚可采用冻结法对土体实施加固

对基坑边坡土体实施加固设计，其加固效果是由加固技术与土体性状共同决定的。由于土体是一种自然物，其本性易被许多不确定因素所遮掩。因此，加固工程的“安全感”是较低的，以致于单纯使用加固技术作为使基坑边坡保持稳定的措施在应用上有诸多限制

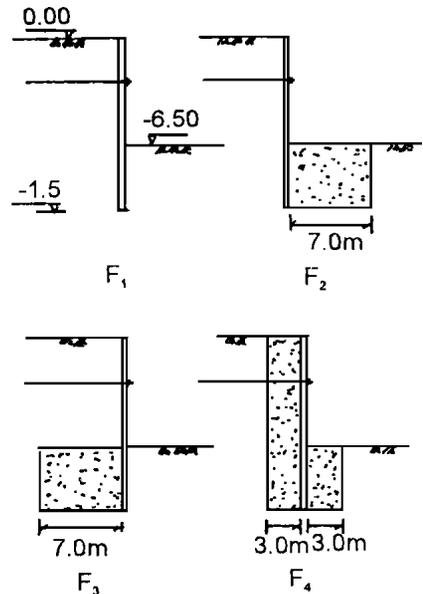


图 10 四种不同支挡加固形式简图

Fig. 10 Diagram of four different forms of consolidation in supporting construction

4.3 支挡与加固并举的设计

由经济分析易知，加固措施的造价比支挡工程的造价低。另一方面，当土体的结构强度得以提高时，

支挡工程的实施可以变得更容易一些,其稳定程度也可以提高。目前,较为流行的是支挡与加固并举。

蔡伟铭曾对四种不同的支挡加固方案进行比较,如图 10 所示。

经计算,各种加固方案的桩顶位移,桩身最大水平位移,地面最大沉降,坑底最大隆起见表 1。

表 1 4 种不同支护设计方案的若干技术指标一览表^[4]

Table 1 Some technical specifics of four different supporting designs

方案代号 Design code	桩顶侧移 Lateral displacement of pile head δ_1 (cm)	桩身最大水平位移 Maximum horizontal displacement of pile shaft δ_2 (cm)	地面最大沉降 Maximum ground subsidence S (cm)	坑底最大隆起 Maximum upheaval of pit bottom Δ (cm)
F ₁	4.91	16.53	4.65	21.02
F ₂	4.35	12.30	3.69	13.81
F ₃	7.20	13.80	4.32	20.86
F ₄	6.47	11.94	4.05	19.75

由以上计算结果可看出,加固效果是明显的,而且加固基坑被动区土体是最有效的。

5 结论

由以上几个方面问题分析,可以得到如下几点结论:

(1)深基坑支护工程设计应当视基坑边坡支护工程与建(构)筑物结构工程为一个有机体,并进行系统分析。

(2)影响支护工程设计的因素较多,有确定因素,也有非确定因素,对于给定的工程而言,存在着优化设计的必要。

(3)对土体结构强度的认知程度决定着支护工程设计的合理性与经济性。

(4)支护工程的设计思路,实施方案,应当用系统分析的观点,土体是有结构的观点进行比较而择定。

参考文献

- 1 Venanzio R. Greco, Efficient monte carlo technique for locating critical slip surface. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122 (7): 517~ 525.
- 2 唐业清. 深基坑工程事故的预防与处理. *施工技术*, 1997, 26 (1): 4~ 5.
- 3 谭先康等. 武汉地区深基坑支护技术综述. *施工技术*, 1996, 1: 18~ 20.
- 4 黄强. 深基坑支护工程设计技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.
- 5 [美] K° 泰沙基著. 理论土力学. 徐志英译. 北京: 地质出版社, 1960.
- 6 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21世纪土力学的核心问题. *岩土工程学报*, 1996, 18 (1): 95~ 97.
- 7 赵志缙, 赵帆. 高层建筑基础工程施工. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994, 240~ 244.
- 8 李保国等. 基坑边坡喷锚网支护技术在复杂环境中的应用. *建筑技术*, 1996, 2: 86~ 87.
- 9 邱锡宏. 上海人民广场地下车库中心岛法施工技术. *施工技术*, 1995, 24 (2): 14~ 17.
- 10 蔡伟铭. 加固基坑支护被动区土体的效果分析. 见: 黄熙龄主编. 高层建筑地下结构及基坑支护. 北京: 宇航出版社, 1994, 225~ 231.
- 11 吴恒. 第四纪地层组合模型与建筑物地基稳定问题分析. *公路工程地质*, 1990, 8 (4): 38~ 43.

(责任编辑: 莫鼎新 邓大玉)

(上接第 290 页 Continue from page 290)

港湾的纳潮量损失不大,围垦工程对整个港湾潮流流况影响甚微,只是在工程附近的局部区域流况有较大变化。

吹填工程实施时,溢流泥沙造成二类水质的最大距离为 2 km,对航道深槽、企沙半岛及白龙半岛的沿岸海域影响较小,因此,工程实施时这些区域的海水养殖业及捕捞业不会受到明显影响。

参考文献

- 1 Casulli V. Semi-implicit finite-difference methods for

two-dimensional shallow water equations. *J Comput Phys*, 1990, 86: 56~ 74.

- 2 张存智, 杨连武, 窦振兴. 极浅海域潮流数值模型. *海洋与湖沼*, 1994, 25 (6).
- 3 天津大学研究生院泥沙研究室. 水流数学模型(下). 1988, 1: 127~ 129.
- 4 王尚毅, 顾元彬, 郭传镇. 河口工程泥沙数学模型. 北京: 海洋出版社, 1990. 218~ 218.
- 5 舒良华, 姜太良, 方正. 悬移质潮扩散的数值预测. *海洋学报*, 1993. 9.
- 6 S V 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算. 北京: 科学出版社, 1984.

(责任编辑: 蒋汉明)