

深基坑开挖支护体系理论及其应用评述

林天健

(水利部珠江水利委员会, 广州 510611)



林天健, 高级工程师, 1953年毕业于天津大学水利系, 同年进入长江水利水电科学研究所, 先后在土工研究室及三峡岩基专题研究组等机构工作, 1980年调广州珠江水利委员会。40多年来, 主要从事岩土工程、岩溶地下水资源以及地下建筑物与高坝岩基各向异性力学等研究工作, 并在化学灌浆及深基础工程设计与施工方面工作多年。曾先后任武汉大学数学系、长江工程大学工程力学系及华南工学院建筑工程系兼职教师, 讲授岩石力学与有限元法等课程。现为广州环宇化学灌浆技术工程公司总工程师, 并曾担任过中国岩土工程研究中心广州岩土工程公司、广州芳村岩土工程公司以及中国海洋航空公司广州分公司等单位总工程师职务, 以及中国科学院广州化学灌浆工程总公司高级顾问等。在国内外刊物及国际国内重要学术会议上发表论文 110 多篇。现为本刊编委。

摘要 本文对深基坑开挖支护的一些新的技术和作法及其应用从理论上进行某些分析并作综合评述。其中特别注意介绍一些近似计算方法并简要援引工程实例。

关键词 深基坑支护, 变形控制, 支护体系多步分析

1 问题的提出

高层建筑与各种类型构筑物的深基坑开挖是力学与工程实践相结合的一个典型问题。深基坑开挖, 特别是城区闹市高层建筑深基坑开挖的支护, 由于其施工条件差、对减小环境不良效应的要求高、地质条件大多数也比较恶劣等原因, 加之竞争机制的引入, 业主对工程施工的要求越来越高, 使得深基坑开挖的支护技术以及这一课题的理论研究越来越具有重大的工程意义。现时, 已提出和应用于工程实践中的深基础开挖技术和工艺不下数十种, 各有千秋, 正是在这一“热门”的行业中, 力学显示了它那严肃的原则性和善于应变的灵活性。数量众多的工程以及复杂多变的工程环境, 给深基坑开挖支护技术的表现提供了广阔的舞台。而在许多情况下, 由于工程建设任务的需要, 工程师们不得不改变或发展传统的一些作法, 设计出和实施一些新的支护形式和结构。这些技术和结构, 在概念上和理论上与传统迥异, 它们在某些方面可说是“离经叛道”, 而且迄今为止, 它们也还未被在理论上充分地分析和阐述。

科学的发展需要概念的改变, 而工程实践也需要理论的指导和验证。本文将对深基础开挖支护的一些新技术和作法特别是某些近似计算方法从理论上进行简要的分析, 特别是对“支护”新概念的内涵作些综合评述, 以供从事深基坑支护设计和施工的同行人以及有兴趣的读者们参考。

2 悟以往之不足, 知来者之可追

深基坑开挖支护, 在传统概念上一般是指设置于基坑边缘用以防渗挡土的护壁及其有

关的支撑，它不仅要保证基坑内施工作业的安全，而且要防止可能发生的不良环境效应。由于现时工程建设规模不断增大，基坑开挖的深度和难度也随之增加，问题变得更为复杂，原来的“支护”概念已不能满足工程要求。首先，支护的含义已发生变化，它不但是指对基坑坑壁安全与稳定的防护措施与结构，而且还包括对施工程序的配合、环境效应的考虑、临时支护结构与地下室永久性保护作用的结合，以及地基土、建筑物桩基与支护结构的协同作用等。因此，“支护”应看作为一个系统，对深基坑开挖的支护设计必须从“支护体系”的概念出发，应用“支护体系理论”来分析和解决问题。为了便于对支护体系的阐述，这里给出一个关于支护类型的不完全的“型谱”(图 1)。

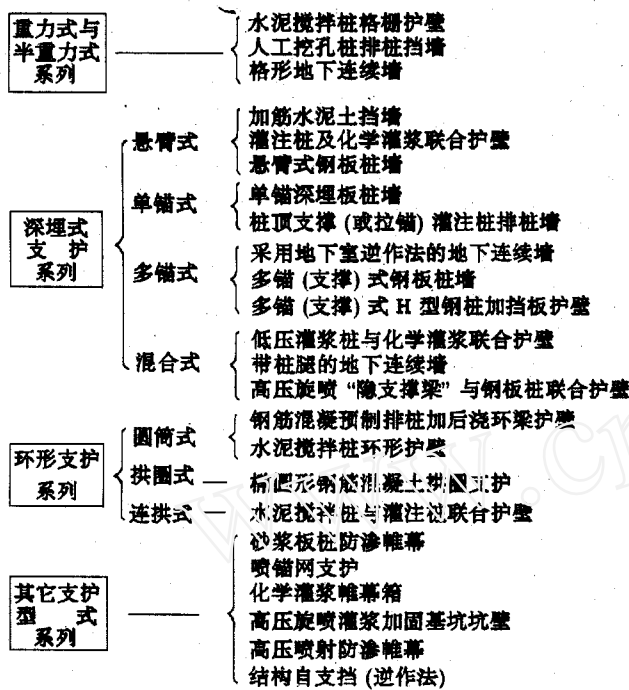


图 1 深基坑开挖支护类型型谱

可见，现代支护所应用的设计理论和方法已非过去那一套借用自挡土墙和桩基等领域的零碎理论与公式，而是在自身的发展中已形成了一个自有其特点的学科分支。不过，令人遗憾的是，关于这个学科分支，至今未能整理出一套系统的、完整的理论，而现实的情况表明，单项的具体实际问题的解决已不能适应形势；同时，个别的理论研究成果和工程经验和积累已为系统理论的建立创造了一定的条件。工程界不少有识之士已有“悟已往之不足，知来者之可追”之感，这正如著名的生理学家巴甫洛夫所说：“我们已达到了更高的水平，看到了更广阔的天地，见到了原先在视野之外的东西”。

今天，在深基坑开挖支护技术的领域中，我们达到了多高的水平？已

认识到哪些不足？在原先的视野之外，我们又看到了些什么？

下面，我们将对有关支护体系总体设计的几个主要问题作简要的讨论，限于篇幅，不可能涉及太具体的细节，只能是在宏观的意义上讨论，“点到为止”。

2.1 关于荷载分析

作用在或影响到深基坑开挖支护体系上的荷载主要有土压力、水压力、施工机械荷载、支护结构本身自重以及打桩时的挤土及振动作用等。作为临时结构的支护体系，一般对地震力的作用不予考虑。

荷载的大小和组合情况密切地关系着支护结构的设计，但事实上很难精确估计和确定荷载的大小和组合情况，一是由于施工环境的多变性；二是由于支护体系中主要的挡土结构系属于所谓“被动桩”或其类似结构，它主要并不直接承受外荷载，只是由于支护结构周围土体在自重或外荷载下发生变形或运动才受到影响，这种影响与支护结构的形状、数量和布置等均有关，即“荷载”是土体运动引起的“果”，它的原始数据是变化的，存在着不确定性。

土压力是支护结构承受的主要荷载, 基于上述原因和土质条件、支护体系边界条件、支护结构各部分刚度不同、顶撑或锚系松紧程度不同以及施工工艺不同等, 都会使土压力发生很大变化, 因此难以准确地估计土压力的精确数值. 在以往的支护结构设计中, 一般都以古典的朗肯公式或库伦公式作为计算土压力的基本公式. 该两公式在一般有关挡土墙的文章中已有详细介绍. 这里只就其用于支护体系结构计算时的某些不尽理想之处略加评论:

(1) 朗肯理论及库伦理论所针对的挡土墙问题是平面问题, 而深基坑开挖支护问题实际上是空间问题.

(2) 朗肯理论与库伦理论是针对先筑墙后填土的挡土墙情况的, 而深基坑支护的情况是在设置挡墙后, 再在基坑范围内开挖土方, 从而使支护结构上所承受的土压力系由静止状态而逐渐变为全面破坏时的主动土压力或被动土压力. 此外, 支护挡墙后的土体系多年形成的具有一定强度的天然土体, 其均质性和强度均有别于挡土墙后的人工填土.

(3) 作用于支护结构上的土压力与多种因素有关, 简化的朗肯公式与库伦公式不可能考虑及这些因素中的主要部分, 例如墙后土体力学参数对结构设计的灵敏度、支护类型、施工程序……, 等等. 特别是朗肯公式与库伦公式所确定的主动土压力均基于支护结构有较大的位移, 而在深基坑开挖有支撑或环形支护的情况下, 大多数支护的位移是较小的.

工程实践和许多现场监测资料表明, 往往是支护结构的最大弯矩仅为设计弯矩的 30% ~ 60%, 实测主动土压力仅为设计的 1/3 至 1/4, 可见, 对支护系统的设计来说, 朗肯-库伦理论只能适用于一部分情况. 在许多情况下, 还必须应用其它的理论来确定作用于支护结构上的土压力. 作为例子, 这里提供几种情况下的计算方法:

①在圆形基坑(环形支护)情况下:

i 应用松散介质极限平衡理论轴对称课题的解计算环形支护结构上作用的土压力^[1]. 垂直基坑周围松散介质的完全极限状态的条件即

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi \\ \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi \end{aligned} \right\} = K \quad (1)$$

在圆柱坐标轴对称情况下, 介质单元体平衡方程(应力分量与 θ 角无关)有下列形式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = \gamma \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(1) 与 (2) 式中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为作用在一点上的主应力, γ 为土的容重, r, z, θ 分别为轴对称的 3 个方向.

这样, 由式 (1)、(2) 即可确定圆形垂直基坑周围松散介质的完全极限状态区域内 4 个未知应力分量 $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$ 和 τ_{rz} , 根据 B. Г. 别列赞采夫提出的土压力近似计算图形(图 2)及其假设: 极限状态区被锥形表面圈定, 其母线与水平面的夹角为 $\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}$, 土与护壁间的摩擦被忽略, 由此可以导得作用在基坑壁上的土压力为

$$e_a = \gamma R \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2}\right)}{\eta - 1} \left[1 - \left(\frac{R}{r_b}\right)^{\eta-1} + q \left(\frac{R}{r_b}\right)^\eta \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) + \left[\left(\frac{R}{r_b}\right)^\eta \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) + 1 \right] \operatorname{ctg} \varphi \right] \quad (3)$$

式中, φ 为土的内摩擦角, $\eta = 2\text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$, $r_b = R + Z\text{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$, R 为圆形基础的半径.

ii 按实测结果假设土压力分布 根据一些实际量测资料报导^[1,2]可以看出,土压力随深度分布并非是深度的线性函数,近基坑顶部土压力随深度而增大,但至一定深度以下土压力即无多大变化.文献[1]对圆形基坑护壁(天津国际贸易大厦:土的等值内摩擦角 $\varphi_D = 35^\circ$,基坑深度9.8m,基坑半径 $R = 25\text{m}$,护壁桩入土深度 $H' = 42\text{m}$)根据实测结果采用了如图3所示的梯形土压力分布.

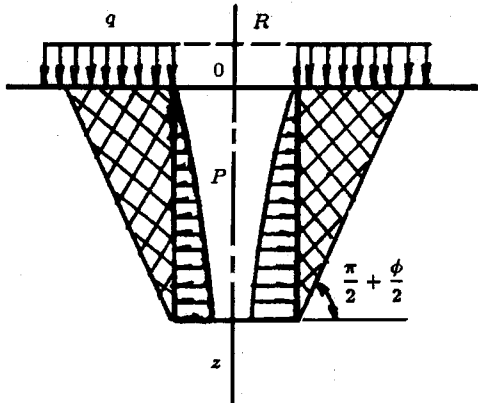


图2 松散介质极限平衡理论轴对称课题的计算简图^[1]

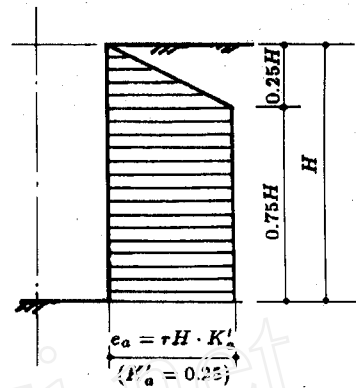
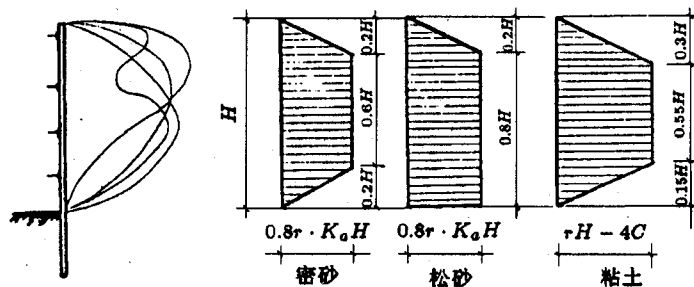


图3 按实测分布规律假设的土压力

②在矩形基坑情况下,为使护壁后土体产生主动应力状态和被动应力状态,护壁必须有位移.对于粘性土,据工程实践经验及有关文献所作的分析,产生主动和被动土压力状态所需的墙顶位移分别为 $0.001H$ 和 $0.05H$ 左右;对于无粘性土,产生主动应力状态所需的墙顶平移或绕基底转动均约为 $0.004H$.

除了采用朗肯-库伦理论估算支护结构所承受的土压力外,根据工程具体情况还可采用反分析、离心模型试验以及根据土的流动性质与支护边界条件建立数学模型等方法来估算土压力,这些方法都大有发展前途.对于具有支撑的护壁的土压力计算,文献[2]提出了基于实测资料而简化构成的土压力分布图形(图4).实际压力曲线均大致呈抛物线形,且最大土压力强度约在基坑的半高度处.

作用在支护系统上的其它荷载如水压力等均可按常规方法计算,这里不再重复.



(a) 土压力的实测分布曲线

(b) 计算支护系统断面用的土压力分布曲线

图4 支护系统断面计算用土压力

2.2 关于结构计算

本节只就某些带有特殊性的理论问题略作评述。

(1) 变形控制问题 有关支护体系设计的新理论和方法大都由传统的强度与稳定性控制的验算趋向于由支护结构内力与周围土体变形来控制的验算。“变形控制”是支护结构传统计算方法不够重视的一个方面，常规计算方法对支护结构及基坑周围土体的变形未能给出相应的解答，这是导致一些支护结构失败的主要原因之一。对支护结构的研究和工程实践表明，被动土压力是挡墙位移的函数，最大位移点取决于支护的形式，墙身在向基坑移动的同时也发生倾斜。此外，基坑开挖也可能引起周围地基土的沉陷，侯学渊^[8]等曾用 Biot 固结理论及有限元和无限元耦合方法进行深基坑开挖模拟计算，并得出一些重要的结论。例如：开挖宽度增加，则支护结构下部侧向位移、周围地基土沉陷量和沉陷范围都相应增加；对于刚度较大的支护结构，试图加大横撑刚度以限制支护结构的最大侧移及下端侧移，其效果都不是很大，但能减小周围地基的沉陷量；开挖深度越大，支护结构的侧向位移与周围地基土的沉陷都非线性地增加，特别是下端侧移明显增大；加大支撑结构刚度能有效地减小最大侧移量和周围地基土的最大沉陷等等。因此，新的支护设计概念是将支护结构与地基及环境看作是一个体系，重视其协同作用，重视变形的制约。

(2) 支护多步分析概念 支护多步分析概念是考虑到深基坑开挖有一个逐步的、分阶段的过程，支护结构亦系分阶段设置，为使设计出的支护结构其工作情况更能符合实际，需要在设计时与施工过程相对应，逐步分析每个施工阶段的情况，并根据每步设计计算出来的支护结构内力和周围土体变形来控制支护体系的设计，计算时考虑支护体系与周围土体的协同作用^[9]。

(3) 支护统一系统设计理论 该理论将深开挖支护不只看作是一个挡土墙及防渗帷幕，而是看成一个支护体系，它包括护壁、防渗帷幕、地基土体、基坑底部加固体、锚固构件、排水设施等，强调体系各部分的协调作用。对这一理论研究得最多的是支护结构（特别是受水平荷载的被动排桩）与地基土协同作用的理论^[4~6]，这些理论大致可概括为地基反力系数法、弹性理论法和有限单元法等三类，这些在一般有关支护设计的论文中均有叙述。一般地说，这些方法计算工作量大，分析费用很高，现时还未能作为普遍应用的直接设计方法，工程实践中，人们更寄希望于那些既有理论和试验验证又简单实用的近似方法。

3 念理论之悠悠，取近似而实用

工程界一般对简单实用的理论和方法更感兴趣，从事深基础工程实践的科技工作者和工程师们研究和创造了很多有关支护系统近似计算的理论和方法及其可靠性的评价方法。此外，关于支护结构的选型和方案优化等，也已逐渐形成一套基本理论，这些方面的内容较为丰富，比之传统的支理论，它们虽稍嫌粗糙简略，但却解决实际问题，简单而又有根有据。

据作者所掌握的资料，现将有关深基坑开挖支护设计的几种近似方法作简要介绍。

(1) 联合控制法（提出者林天健）该方法的概念结构包括：

i 将整个深开挖支护工程看作是包括几个子结构的复杂系统，在结构选型的基础上采用简易工程分析方法处理各个子结构，然后在宏观的意义下协调和控制全系统的工作状态和近似最优控制。

ii 将理论方法、经验和实测结合起来以代替似乎十分深奥、严谨但与真实情况不尽相

符的纯理论方法。

iii 本方法对支护系统设计着重控制 5 个方面：问题性质判别、宏观应力控制、地基变形控制、支护结构局部变形控制以及环境效应控制。

iv 本方法的特点是充分发挥支护结构与地基土的潜在能力，特别注意结构形式的创新性，作为临时结构的合理安全储备等。这一方法对各种不同条件下的深基坑开挖支护均适用。

(2) 等值梁法：

i 将深埋板桩或排桩墙视作一相当梁的构件，上端各锚拉或支撑点为简支，下端为固定支承。在单锚的情况下如图 5 所示，正负弯矩在 C 点转折。如在 C 点切断 ab 梁，并置一自由支点 C ，则 ac 梁上的弯矩保持不变，此 ac 梁即为 ab 梁上 ac 段的等值梁。

ii 用土压力等于零点的位置代替正负弯矩转折点的位置，并按墙前被动土压力等于墙后主动土压力的平衡条件算出 C 点离挖土面的距离 y 。

iii 按简支梁（多锚时为多跨连续梁）计算等值梁最大弯矩和各支点的反力。多锚板计算与此类似。它适用于单锚或多锚式深埋板桩的条件。

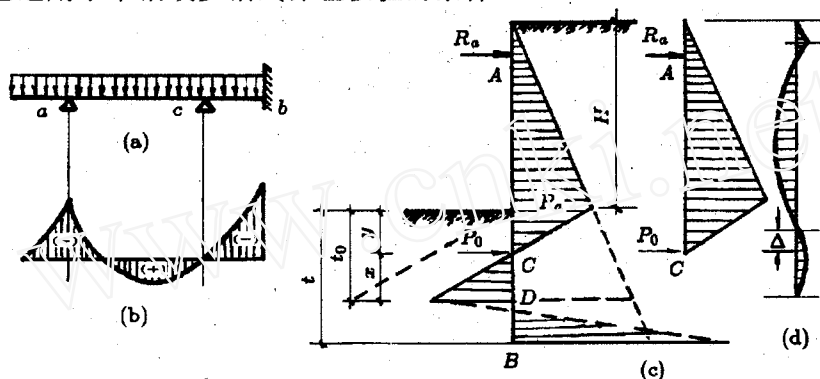


图 5 等值梁法计算单锚（支撑）板桩简图

(a) 等值梁， (b) 等值梁弯矩图， (c) 板桩上土压力分布， (d) 板桩弯矩图

(3) 盾恩近似法 先绘出板桩上的简化后土压力分布图（图 7），假定作用在板桩 FB 段上的荷载 $FGN'B'$ 一半传至 F 点上，一半由坑底土压力 $MB'R'$ 承受，由几何关系及主动与被动土压力平衡条件得求解入土深度 x 的二次方程，再假定 F 点及被动土压力合力作用点 W 两点为固定端，即可近似地按两点固定计算 F 点的弯矩。本方法适用于多锚（支撑）式板桩的施工条件。

(4) 布氏图解法（提出者 H.Blum） 该法将桩反弯点下面的被动土压力用一通过此部分阻力重心处的一个单力 P 代替，它围绕桩底端点能满足 $\Sigma M = 0$ 及 $\Sigma H = 0$ 的条件。当取 $\Sigma M = 0$ 时，桩会得到一个较小的插入深度。布氏并作了一图解以求桩的需插入深度（图 8），其适用条件为顶部无锚拉（或支撑）的悬臂桩。

(5) 其它方法 除上述诸法外，尚有基于实测土压力分布规律的实用计算简图法；根据监测成果的信息反馈指导设计和施工的信息化施工法；以支护结构的势函数为判据的突变模型分析法；以破坏概率的大小判别支护结构稳定性的概率控制法等。适用于支护结构的宏观分析及对传统设计方法对比验证。

应该指出，有关深开挖支护的某些理论不仅是在应用上太繁琐，难以普遍推广，且其本

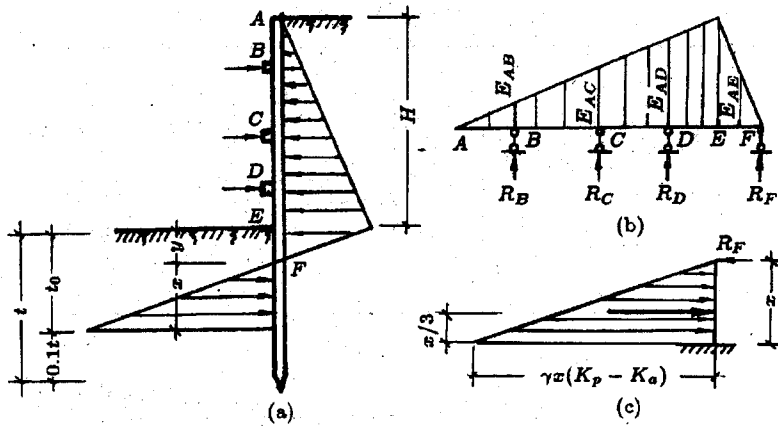


图6 等值梁法计算多层支撑板桩简图 [7]

(a) 土压力分布, (b) 等值梁, (c) 入土深度计算简图

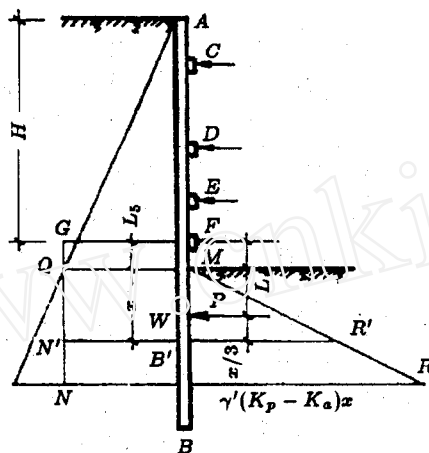


图7 多层支撑板桩计算简图 [7]

身的深入和发展也还存在一定的难度, 例如支护体系向概率极限状态设计过渡问题, 现时, 由于支护系统的荷载、承载力和变形参数等均非定值, 而且具有可变性和随机性的随机变量, 因而传统的定值设计法已显露出它的不完善, 支护体系采用可靠性分析原理按极限状态设计已成为发展的总趋势, 但要走出这一步还是很艰难的。

“念理论之悠悠, 取近似而实用”, 这是现时工程界所能作到的和过渡的做法. 作为例子, 在本文的结束时提供一个按“联合控制法”设计的深开挖支护系统. 该支护工程系由本文作者设计, 地下室拟开挖最深为地面以下 7.00m, 场面土层的有关设计要素如表 2 及图 8 所示. 沿地下室外墙周边的基坑坑壁周长 190m, 采用化学灌浆帷幕及低压灌浆排桩墙支护, 沿基坑周边布置 3 排灌浆孔. 采用能控制凝结时间和扩散半径以及可灌性好的灌浆材料并应用诱导灌浆工艺, 沿基坑周围造成一道宽 2.0m、高 9.3m 的化学灌浆帷幕, 帷幕外侧布置一排配筋的深埋低压灌浆桩 (图 9). 对地下水池深开挖的支护则采用深层水泥搅拌桩环形结构, 让护壁圈结构的内力自身平衡, 不传至护壁下地基土上 (表 1).

本设计异于一般常规方法的主要特点:

(1) 整个支护系由几种不同类型结构组合而成, 考虑了周围建筑物的限制及可能引起的

表 1 场地土层的有关设计

| 土层 | 指标名称 | | | | | | |
|-------|-----------|-------------------|-------------------|---------------------|------------------|-------|-------|
| | 厚度 (m) | 容重 | | 抗剪强度参数 | | K_a | K_p |
| | | 天然 (t/m^3) | 浮重 (t/m^3) | C (kN/m^2) | φ (度) | | |
| 杂填土 | 3.30 | 1.80 | 0.80 | 22 | $20^\circ 0'$ | 0.490 | 2.040 |
| 地下硬夹层 | 4.00 | 2.30 | 1.30 | 30 | $31^\circ 0'$ | 0.320 | 3.128 |
| 淤泥 | 4.50 | 1.51 | 0.51 | 19 | $22^\circ 0'$ | 0.455 | 2.198 |
| 粉砂 | 3.40 | 2.00 | 1.00 | 25 | $27^\circ 30'$ | 0.368 | 2.765 |

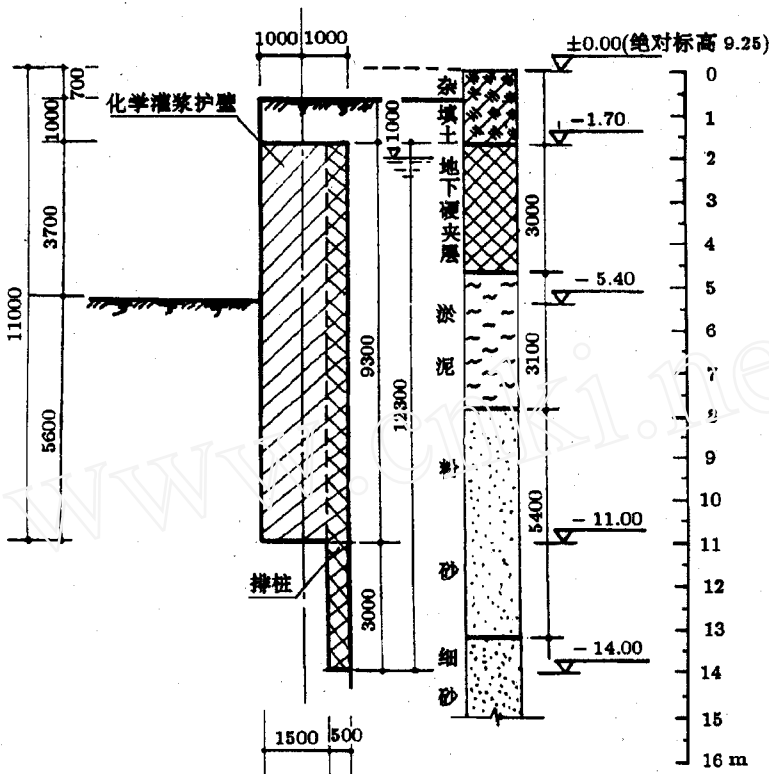


图 8 设计地质剖面

表 2 经结构验算最后确定的支护结构参数

| 工程部位 | 支护结构形式 | 护壁宽度 B_1 (m) | 护壁高度 Z_1 (m) | 护壁嵌入深度 t_1 (m) | 排桩墙宽度 B_2 (m) | 排桩墙高度 Z_2 (m) | 抗拔段长度 L (m) | 护壁顶高程 H_1 (m) | 护壁底高程 H_{b1} (m) | 台阶底高程 H_{b2} (m) | 排桩墙底高程 H_{b3} (m) | 灌注孔间距 D_1 (m) | 排桩间距 D_2 (m) | 每米宽排桩墙配筋 $n \cdot \phi$ (条数, mm) |
|-------------|--------------|----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------|--|
| 基坑周边 | 化学灌浆旋喷排桩联合护壁 | 2.00 | 9.00 | 4.30 | 0.50 | 13.30 | 4.30 | -0.70 | -9.70 | -11.00 | -14.00 | 1.00 | 0.50 | 2 ϕ 25 |
| 1-1轴地下室外墙周边 | 化学灌浆旋喷排桩联合护壁 | 2.00 | 0.30 | 5.60 | 0.50 | 13.30 | 3.00 | -0.70 | -11.00 | | -14.00 | 1.00 | 0.50 | 2 ϕ 25 |
| 地下水池 | 水泥搅拌桩 | 2.00 | 12.00 | 6.00 | | | | -0.70 | -12.70 | | | | 0.40 | |
| 基坑周边 | 环形护壁 | | | | | | | | | | | | | |

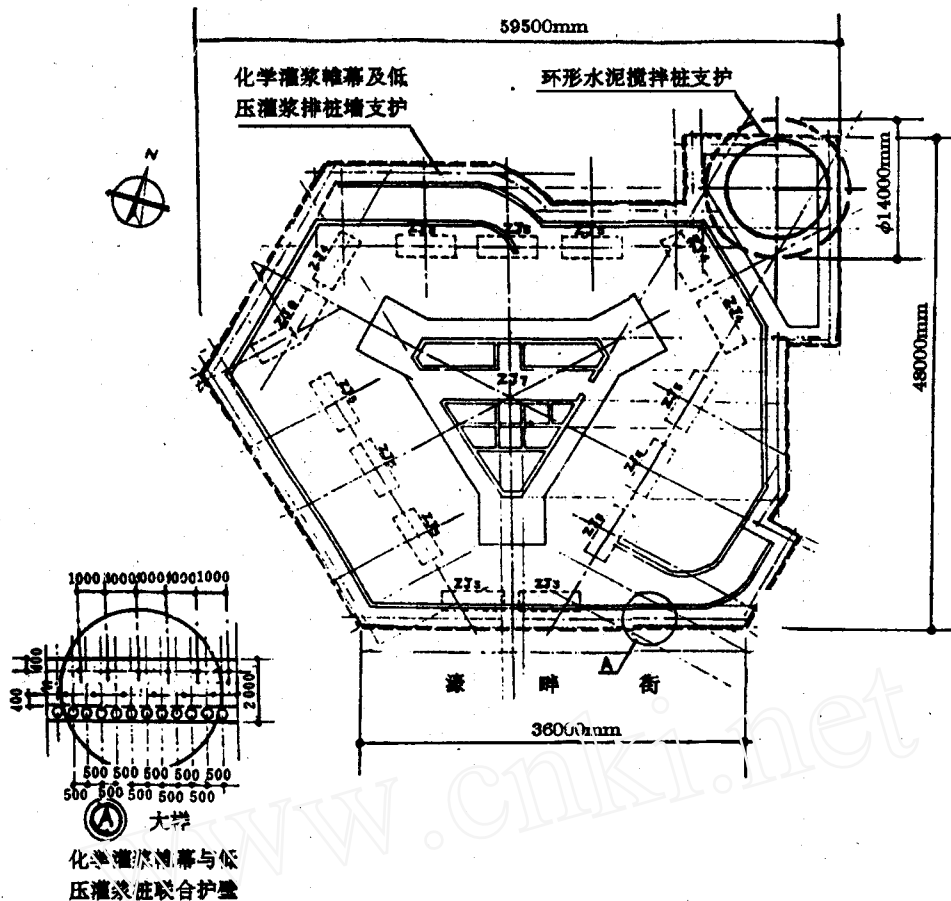


图9 广州海珠南路某大厦支护结构平面图

不良环境效应，并采用“联合控制法”设计。

(2) 主要起挡土作用的排桩设置于防渗帷幕的背侧，且利用超出帷幕 3m 的锚固段的抗拔力和抗剪强度以增大护壁抗滑动和抗倾覆能力。

(3) 将地下障碍物夹层利用灌浆胶固形成硬水平夹层以起“隐支撑梁”的作用，且节省了 10 多万元排障费用。

(4) 采用多种支护形式综合使用，扬长避短，充分发挥支护体系本身、地基土，甚至是地下障碍物的潜力，并在地下水池深开挖地段使用水泥搅拌桩环形支护，总造价比钻孔桩等传统支护方法节省 200 多万元。

参 考 文 献

- 1 顾晓鲁等. 深基础环形支护结构. 岩土工程师, 1989, 1(2)
- 2 天津大学等. 土层地下建筑施工. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982: 92-94
- 3 于志军等. 计算机辅助设计深基坑支护体系. 建筑施工, 1994, 16(2)
- 4 魏汝龙. 桩基结构与土的相互作用. 水利水运科技情报, 1989(3)
- 5 屠毓敏等. “被动桩”桩土相互作用分析. 桩基技术新进展学术讨论会论文集. 岩土工程师编辑部等, 1991
- 6 王利群, 林天健, 兰为学. 几种深基础开挖技术简介. 广州建筑, 1994(3)
- 7 江正荣等. 简明施工计算手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989
- 8 候学渊等. 深基坑开挖引起周围地基土沉降的计算. 岩土工程师, 1989, 1(1)

(1994 年 11 月 4 日收到第 1 稿, 1995 年 6 月 18 日收到修改稿)