

第 33 章 香港深基坑开挖设计与施工

33.1 概述

在香港地区，当基坑开挖深度超过 4.5m 被定义为深基坑。主要是基于以下考虑，这个开挖深度超过了设置地下室的深度，更为重要的，在香港许多工程中，当基坑开挖至 4.5m，就会发现地下水。

由于土地资源稀缺，香港的楼房经常附有地下室用以商业用途，譬如购物中心或者地下车库。在基础设计的建设过程中常碰到明挖法隧道或其它形式的地下结构。香港地区大规模的基坑开挖开始于 1970 年左右的地下铁路线的建设（Davies & Henkel, 1980）以及商业大厦的高速建设，在这些地下结构的施工过程中经常需要设置支护结构。根据工程需要、场地及地层条件情况，采用不同形式的围护结构和支撑系统。

尽管在地下管道、地铁和快速线的施工中盾构方法越来越普遍，但深基坑技术发展的脚步从来没有停顿，本章介绍了香港地区常用的围护结构和支撑系统，以下将通过实际工程介绍其主要特点。

33.2 深基坑支护结构的一般特点

香港岛的地形地貌图如图 33-1 所示，近山坡和海岸线的地形区域有明显的区别，这就造成了深基坑开挖中地质条件的差异性。近山坡地带，典型的地质条件是表层为较薄的人工填土，填土下面为厚度起伏变化的非均质沉积层和完全风化的花岗岩与火山岩。基岩的埋深在地面以下几米到 100 多米不等，沉积层一般夹有砾石和细软的土体，可能会对支护结构的施工产生障碍。



图 33-1 香港岛的鸟瞰图

由于地形的原因，下雨期间会造成坡体的下滑（滑坡），地表水的渗流，地下水位的升高，这些都应该在基坑支护设计中考虑。

土地资源稀缺，为了解决城市发展问题，自 1860 年以来香港已经多次进行山体的开垦改造以增加土地面积，现在大部分的市区都是经开垦而建成的。

开发较早的山区常覆盖有海洋淤泥土。对于深基坑开挖，经常会遇到 10 米厚左右的填土层，几米厚的淤泥质黏土，厚度变化的沉积层。风化岩石的埋深一般随场地的不同而变化。图 33-2 为典型的地质剖面图。地下水位一般位于地面以下 2—3 米。

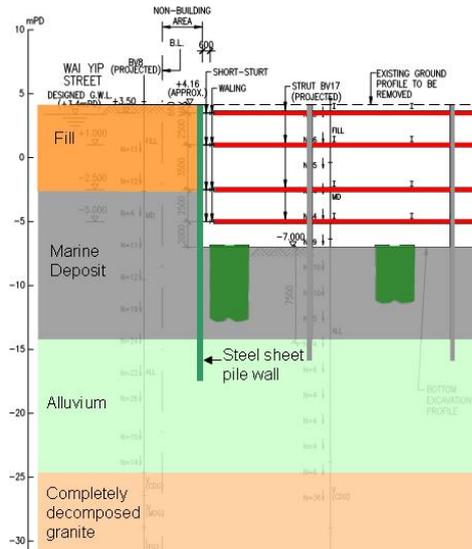


图 33-2 开发较早的场地地质条件

深基坑的支护墙一般嵌入到基岩中，以便为提供足够的墙趾稳定性和阻断地下水渗流。因此基坑挖深范围的土质一般为人工填土层和黏土层，大概厚为 15 米，一般为三层地下室加下部结构的基坑开挖深度。

形成于 20 世纪 90 年代的开发区一般都是把黏土层挖走，并代之以砂土，以便于基础设施的快速施工。砂土的换填深度可以超过 30 米，在随后的场地适用中，会采用振动压缩固结的方法把砂土层压实。

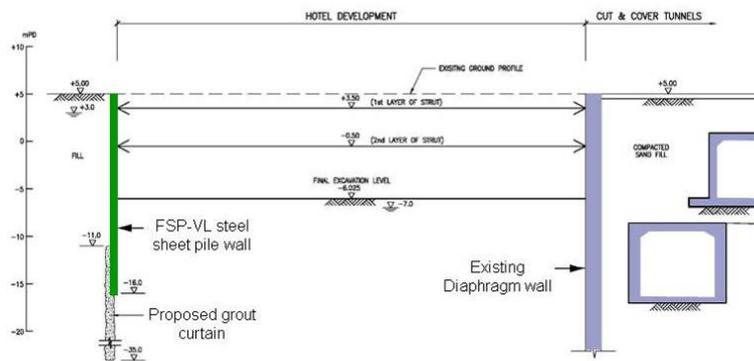


图 33-3 新近开发的场地地质条件

在这些场地深基坑开挖中，支护墙一般要求嵌入到均质且密实的砂土中。除非墙嵌入深度足够深或者坑底下卧层土的渗透性比较低，否则需要施工水泥浆止水帷幕以用来阻断高渗透性填土中地下水的渗流。

在深基坑工程中，根据材料的使用不同，板式支护主要分为两种围护结构形式：

- a 现场灌注钢筋混凝土桩墙—例如大直径灌注桩和连续墙。
- b 预制钢结构墙体—例如板桩墙，兵桩，钢管桩。

大部分情况中，钢板桩墙一般作为地下室的顺作法施工临时支挡结构，一般适用于不超过三层地下室的开挖深度。在地下室结构完成后，钢板桩将被拔出或顶部的几米割除，钢板桩的优点在于施工和拔除速度快，不需要养护时间并且现场质量控制容易。

钢筋混凝土地下连续墙一般用于挖深超过 15 米的深基坑或者地下室的逆作法施工中。在这种条件下，地下连续墙在建设阶段到永久施工阶段可能被用来承受上部结构荷载。从经济角度，地下连续墙可以作为永久性的地下室外墙，并从建筑角度，考虑在围护墙内部是否

设置内衬墙。

总体上，临时钢板桩支护已经成为趋势，因为紧凑的施工项目不允许在养护和后续完整性试验（包括波速试验）上浪费时间。

33.2.1 钢板桩

钢板桩几乎是相当地区使用最普遍的临时围护结构。钢板桩由单块板桩咬合拼接而成，就单位刚度与承载力的比值而言，钢板桩效果良好。常用的截面类型范围有 FSP II—FSPVI。钢板桩因其良好的隔水效果尤其适合于在高地下水位的地下空间开发中。图 33-4 便是钢板桩支护的一个深基坑实例。

钢板桩一般由振动法或锤击法贯入，锤击法一般用于标准贯入击数达到 60 的密砂或者硬质粘土。这两中贯入方法都非常有效，但是不可避免的对环境造成振动以至引起邻近建筑的地表移动。贯入过程见图 33-5。



图 33-4 顺作法钢结构支撑板桩墙施工实例



图 33-5 振动法贯入钢结构板桩墙

近些年，反力贯入法，例如 Giken 法，很受用户青睐，因为它降低了对环境的振动和周边建筑物的沉降，但是该法仅限用于对变形要求较高的建筑附近。

33.2.2 钢管桩

钢管桩由紧密连接的圆形中空截面(CHS)构成，钢管截面外径可达 273mm 至 610mm。圆形中空截面(CHS)厚度可达 6mm 至 20mm。有些情况下也贯入钢结构工字形—UC 截面以提高抗弯刚度和承载力。钢管桩外侧一般辅以止水帷幕隔断地下水渗流。钢管桩基坑支护实例见图 33-6。



图 33-6 钢结构支撑钢管桩施工实例



图 33-7 ODEX 钻头

尽管有些时候采用钻孔法贯入，但是最常用的方法还是打入钻进法。图 33-7 是 ODEX 钻头，它实际上是一个带有扩张翼缘的 DTH 振动锤，翼缘从两侧延伸以形成比刚套管截面稍大的桩孔。套管下部有环形钢靴，从而 ODEX 钻头钻进的时候就不需要外部手段。高压驱动活塞控制锤击，转杆随之转动，转头逐渐击碎岩体，岩体残渣随着高压气流排出。ODEX 钻入法不用改变设备就可以很容易的钻透岩心。近来，不同的空气动力钻头被改造，以减少钻孔过程中对临近地面的扰动。

33.2.3 兵桩

兵桩 (soldier pile) 由通用工字形钢柱—Universal Column (UC) 截面组成，有钢轨桩、H 型钢及 I 型钢，型钢常用于一般性砂质或粘土质地块，轨桩由于断面较小，较容易贯入地块，因此常用于较硬的地块或卵砾石地块；视现地土壤性质及强度特性，兵桩之间可放置或不放置横板条 (laggings)。图 33-8a 所示为兵桩之正面图及断面图；兵桩贯入前需要预钻孔，桩间距大约 3 倍的 UC 截面宽度。如果土质良好，桩间距可以增大。UC 截面宽度通常为 254mm 至 358mm。桩间土体由钢板条防护。兵桩经常用于地下水位较低的场地。图 33-8 (b) 是基坑开挖面的兵桩墙体。

采用兵桩围护的主要施工流程如下：将兵桩打入土中，通常情况下，兵桩是锤击贯入，如遇硬土层，可采用预钻引孔。如采用贯入钢管桩相同的方法—ODEX 钻入法。但是工字钢贯入后，套管必须拔出，空隙由低级别水泥浆填充作为止水帷幕。兵桩施工完成后，进行基坑开挖，一边开挖，一边贯入横板条，在横板条背填土。开挖过程中，于适当位置架设水平支撑。开挖完毕，开始构筑地下室内墙，逐层拆支撑及构筑楼板；当地下室构筑完毕后，进行拔桩施工。

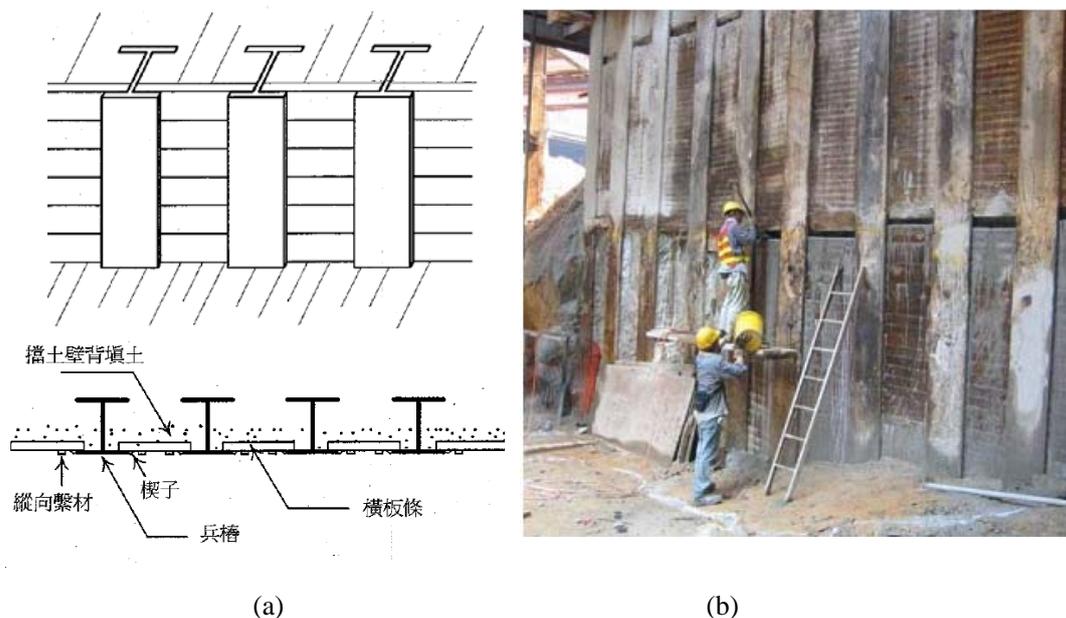


图 33-8 兵桩支护

33.2.4 沉箱

由于小型设备和工作环境的需要，如图 33-9，人工沉箱是城市密集区和坡地最流行的深基坑嵌入式挡土墙形式，如图 33-10。例如，在 20 世纪八十年代中期，许多地铁车站采用人工沉箱作为沿主干线和建筑物间的深基坑开挖挡土墙。沉箱直径 1.2 至 2m。

在沉箱中开挖，每开挖 1m 就必须浇注混凝土环梁以提供水平支撑，防止孔洞塌方，直至硬层或岩层。可惜，出于健康和考虑，在九十年代中期，香港就禁止了沉箱人工开挖。大型沉箱或竖井机械开挖依然使用，但是不适于作为围护结构。



图 33-9 沉井施工



图 33-10 沉井和混凝土板条

33.2.5 钻孔灌注排桩

灌注排桩可以重叠排列也可以连续排列，常用灌注桩的直径一般为 1.0 至 3.0m，混凝土强度等级为 40 至 45 MPa (28 天强度)。墙体后连续灌注桩止水帷幕必须有良好的隔水效果。由于对周边地表扰动较小，灌注桩在敏感建筑附近使用较多，如图 33-11。



图 33-11 钻孔灌注桩施工

尽管市场上有许多施工技术，但是对于大直径灌注桩来说，还是先沿桩全长设置临时钢结构套管支护岩面上部土体，然后用冲击式抓斗开挖表面沉积土和风化土，如图 33-12。首先用振动法贯入带有切削齿的套管，随着挖掘的进行，再使用振动法或旋转法。对于重叠式灌注桩，必须在主排和次排桩之间设置临时直立混凝土或者钢结构以保证合适的位置。



图 33-12 土体开挖



图 33-13 螺旋法施工灌注桩

如果要嵌入岩层，用反循环钻机钻进法代替凿入法。水流将带出桩孔和循环系统过滤器中的切削碎渣。由于海边地下水位较高，常采用导管法浇注混凝土。在浇注过程中，临时性导管可以分批拔出。

如果地表条件合适，可以在方形钻杆机械上安装钻斗或螺旋钻，这样会取得更好的效益，如图 33-13。临时性钢套管的短端用来支护松散的浅层沉积土。膨润土泥浆支护桩孔其余长度。导管法浇注混凝土时，泥浆将会被置换出桩孔。方形钻杆可以更好的控制套管尖端以外的垂直度。

33.2.6 地下连续墙

连续墙是由依次施工的单体矩形壁板拼接而成，壁板由止水带或者刀头连接以取得良好的隔水效果。连续墙抗弯刚度高，容易配筋，已成为深基坑最常用的挡土结构。常用的壁板长 2.8 至 7m，厚 0.8 至 1.5m。图 33-14 是基坑中的连续墙。



图 33-14 连续墙



图 33-15 渠刀开挖连续墙槽段

连续墙通常在直线排列的导墙之间施工，以保证位置和方向。开挖采用电缆抓斗或者渠刀。抓斗更合适浅开挖或开挖前需凿进破坏其下硬质材料的场地。如果场地合适，也可用渠刀或者水力扩孔钻开挖。如图 33-15，导向架装有反向旋转刀具。渠刀还装有内置测斜仪，时刻监视开挖垂直度，导向杆可以调整以控制垂直度。连续墙施工的最大难点就是保证沟渠的稳定性。用膨润土泥浆护壁，并且在施工过程中严格控制其性状。如果水下浇注混凝土必须在混凝土上面覆盖膨润土泥浆用以保护混凝土，最后检查垂直度时，常采用超声波检测，例如 Kodex 检测。

根据在香港地区的应用情况，对各种类型的支结构进行简单的比较分析，总结如表 33-1：

不同类型的支护结构对比

表 33-1

支护结构类型	适用的开挖深度	特点/优点	缺点
板桩墙	适于 15 米	相互连接的板桩截面能增大截面模量和抗弯刚度。承载力高/重度比较高的阻断地下水渗流	振动过程会产生地面沉降 不能穿透硬的材料，若遇到地下障碍物，需要预先钻孔
钢管桩	适于 20 米	便于施工，能够容易的穿透地下障碍物 在中空截面内插入 H 截面的型钢会提高承载力和抗弯刚度	如果人工操作不规范或者由于地质条件的非均质性，可能会引起不可预测的地下空洞 需要在墙后或者墙底施工止水帷幕，以阻断地下水渗流
兵桩	适于 20 米	竖向构件少 适合快速施工项目 方便与竖向构件间的锚杆连接	仅适用于在干燥环境条件下的开挖，如近山坡地带 必须注意填充板条间空隙的施工工艺
钻孔灌注桩	适于 30 米	施工扰动小 采用 RCD 技术，能够穿透岩石形成岩石墙或者穿透地下障碍物	抗渗性差，需要施工止水帷幕或者桩桩之间重叠 在一定比例的配筋下，抗弯能力弱
沉箱	适于 30 米	施工机具少 适用于陡峭地带的基坑开挖。	大范围的降水会对邻近结构造成破坏 存在潜在的人身安全风险
地下连续墙	适于 40 米	抗弯刚度高，可以有效抵抗墙体弯曲，因为钢筋一般位于距离中轴最远的位置 有效地阻断地下水渗流 可以作为地下室的永久性墙体	在连续墙施工过程中，会产生较小的地面沉降 需要为机械和施工膨润土泥浆的附属设备提供较大的空间。

33.3 常用水平支撑系统

33.3.1 钢支撑

顺作法常用的支撑系统是水平十字交叉钢支撑。通常地下室结构会占据整个施工现场，因此必须搭建水平十字交叉钢支撑施工平台，如图 33-16。

围檩和支撑一般采用通用工字型钢梁—Universal Beam (UB)和通用工字型钢柱—Universal Column (UC)，有时也采用钢管作为支撑以减小对立柱的要求。预先制作的带有螺栓连接的大型截面支撑变的很普遍，它尤其适合于规则型的场地且要求施加较高的预应力。对于大型基坑，即将完工的地下室结构上的斜支撑将产生整体效益。

支撑大小决定于强度和刚度的要求。为控制墙体水平侧移和地表沉降，对支撑施加预应

力已不罕见。围檩和挡土墙之间采用短支撑以方便地下室施工。临时水平十字交叉钢支撑平台方便了工作人员在有限的空间内进行取土。



图 33-16 临时水平十字交叉钢结构支撑平台

33.3.2 锚杆

临时锚杆如图 33-17，它能为基坑开挖提供开阔的工作面。对于无法使用钢支撑的大跨度基坑，常采用锚杆支护。预应力锚杆也可控制墙体变形和地表沉降。由于作业区土地问题和获得政府批准的困难性，香港一般不采用锚杆支护。如果允许使用锚杆，常采用无预应力的高强度钢杆，这类类似于土钉。一般用气动锤击法贯入锚杆。依地质条件考虑是否使用临时性钢套管。

33.3.3 主体结构梁板代支撑

逆作法施工地下室，采用主体结构梁板替代水平支撑，如图 33-18。在多数情况下，不需要另外施加临时支撑，除非连续的跨度过大。无梁楼盖板更合适于基坑开挖的逆作施工。

开口处附近的梁板局部应力在瞬时条件下有时会超过永久条件下的应力。如果考虑早期强度提高施工速度，那就需要加强主体结构钢筋的截面。由于逆作施工困难，地下室的坡道和楼梯常采用顺作法。



图 33-17 临时预应力锚杆



图 33-18 逆作法梁板结构

33.3.4 大直径圆形地下连续墙—无支撑

大直径圆形地下连续墙通常由近似曲线槽段拼接而成。它利用自身的环形作用支护基坑因而不需要内支撑。如图 33-19，内径 37m 的圆形地下连续墙，坑底为建于基岩上的筏板基础。

超高层需要巨型基础，有些情况下个别桩无法承担如此大的荷载，此时通常选用大直径圆形地下连续墙。如果地质条件良好，大直径圆形地下连续墙可以满足施工基岩上的筏板基础，也可以允许在施工地下室结构前施工塔式结构。



图 33-19 大直径圆形地下连续墙

33.4 设计和现场监测要求

33.4.1 设计方面

基坑支护设计必须满足建筑规范条例。岩土指南 1(GEO, 1993) 与 GCO 期刊 No. 1/90 (GCO,1990) 如图 33-20 图 33-21 为设计原理和基坑支护岩土设计方面提供指导。在香港，基坑支护设计采用极限平衡法。岩土和结构设计需考虑安全系数。在写本章时，香港正在试行 CIRIA Report C580 提出的极限状态分项系数法，但是行业还是采用传统方法。

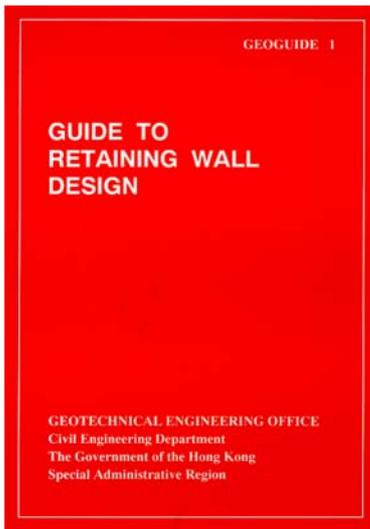


图 33-20 岩土手册 1—基坑支挡结构设计

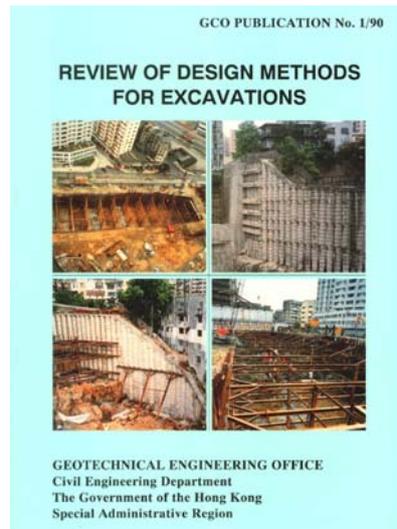


图 33-21 GCO 期刊 No. 1/90—开挖设计方法概述

虽然现场勘察没有强制性的规范，但是为了获得详细的地质资料和水位地质条件，以确保基坑设计，毫无疑问广泛的综合的具有比较密的钻孔现场勘察是很有必要的。一般来说，对于详细设计，钻孔间距为 20—30m 是可行的。一般会在支护墙施工位置进行钻孔勘察，以便修正地质剖面。设计中，土的抗剪强度指标和变形参数一般比较保守，主要来源于室内实验和现场试验或经验公式，地下水位一般考虑假想水位，因为在雨季维多利亚港口附近场地的地下水位一般靠近地表。

对于较深的地下室，常采用多道支撑开挖，设计工作一般要考虑两点：承载力极限状态和正常使用极限状态。在承载力极限状态中，需要验算抗倾覆稳定性，坑底抗隆起稳定性和抗管涌破坏。验算抗倾覆稳定性的方法根据在 NAVFAC (1982) 如图 33-22 中所提到的方法，而且可以用手算。在极限平衡状态下，转动点被认为位于最低水平支撑处，而且在被动土抗力中引入一个安全系数，开挖侧不存在水压力。在抗倾覆稳定性验算中的安全系数一般取为 2.0。

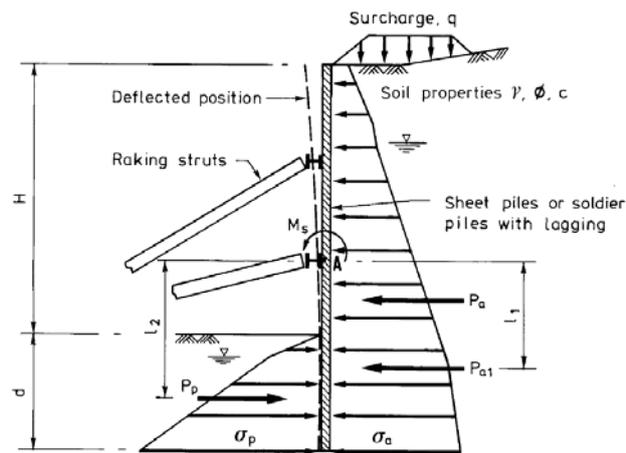


图 33-22 抗倾覆验算示意图

对于高压缩性或中压缩性的软黏土，一般都要进行基坑抗隆起稳定性验算，如图 33-23。最小安全系数一般取为 1.5。如果安全系数取的太小，那么墙体会由于下卧层土体屈服破坏产生很大的水平位移，当然可以通过对抗底土进行加固改良的措施提高其稳定性。但是在很

多情况，提高稳定性最简单方便的方法是把围护墙体插入深度增大至硬土层，以抵抗墙趾位移。

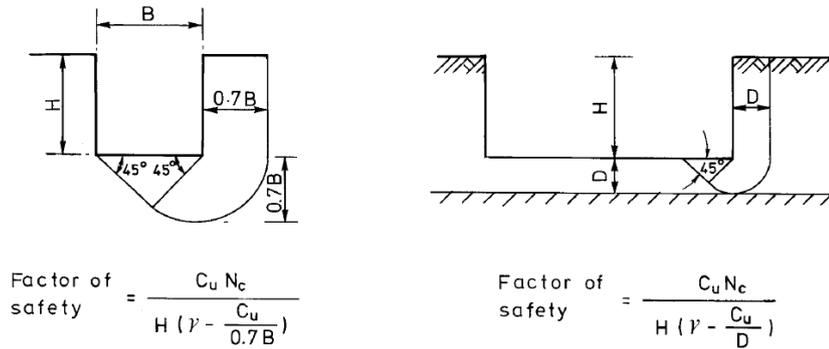


图 33- 23 坑底抗隆起安全系数计算（太沙基 1943）

正如前面所提到的，在香港基坑开挖经常会遇到地下水的问题。在靠海的开垦区进行基坑开挖，一定要谨慎对待抗管涌安全系数。支护墙前的水力条件可以通过渗流有限元计算软件进行分析，也可以通过设计表格简化计算，如图 33-24。一般要求最小安全系数为 1.5，可以通过把支护墙的墙脚嵌入足够深以提供足够的安全系数，或者通过在墙脚处注浆以提高稳定性。

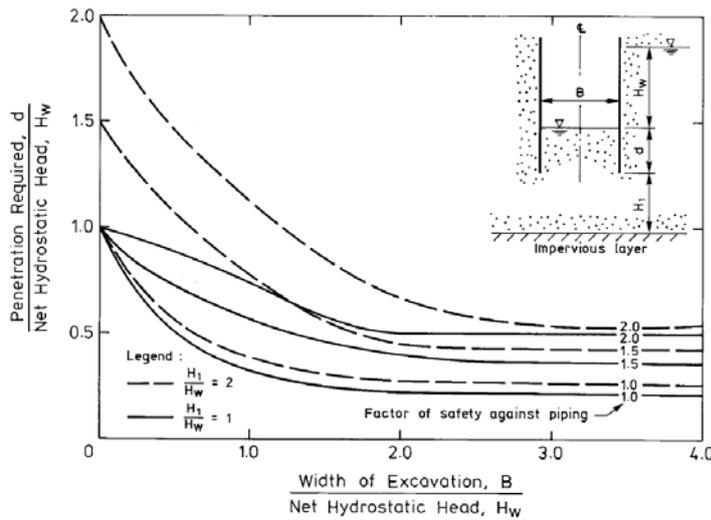


图 33-24 支护墙的插入深度与抗管涌安全系数间的关系（NAVFAC 1982）

挡土墙和水平支撑结构设计必须遵照现行的钢结构实施规范(BD, 2005)和混凝土实施规范(BD, 2004)。如果挡土墙作为基础的一部分，设计必须同样满足基础实施规范(BD, 2004)。支护结构的弯矩，剪力，轴力一般通过开挖的计算模型得到。支护结构和支撑系统的承载力验算的荷载系数一般为 1.4。

在城市市区，很大一部分的建筑物都附带有地下室。由于对邻近建筑，道路和市政管线的影响，支护结构的变形有严格的要求。地面沉降大的估算方法有几种：（O'Rourke et al (1976)）根据工程实例所得到的经验方法，如图 33-25；或者通过经验数据来预测地面的初始沉降以反分析邻近建筑的沉降。

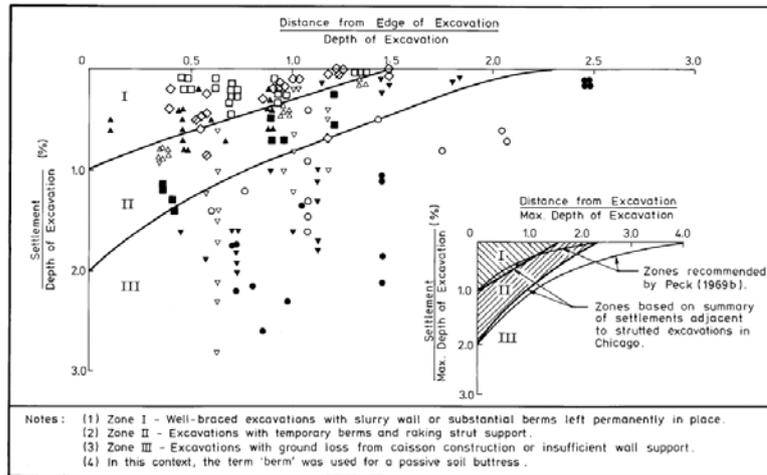


图 33-25 基坑周边地面沉降概述

现在有很多计算软件用于基坑支护设计,这些岩土软件能够考虑在承载力极限状态和使用极限状态下支护结构和周边地面的特点。虽然在其他国家这些被广泛的应用,但在香港弹性地基梁模型如把支护结构模拟为梁,周边土体作为弹簧却很少运用,因为这种模型不能反映土体的真实性状和施工顺序。而边界单元法如 OASYS FREW (Pappin et al, 1985)被广泛的用于分析不同类型的支护结构。图 33-26 表示的是边界元法的计算结果

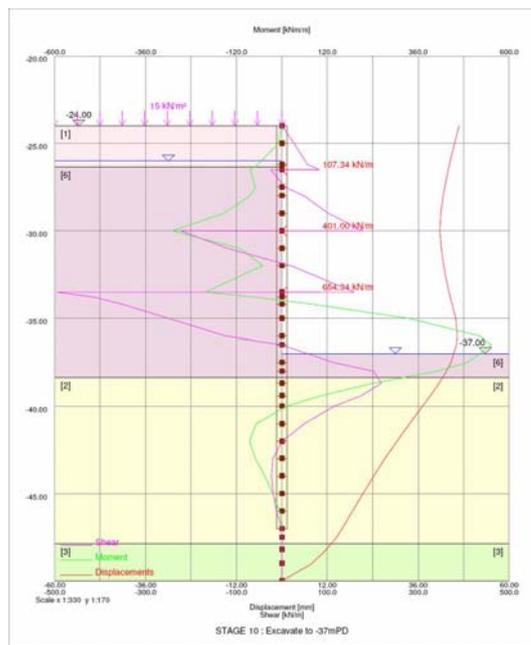


图 33-26 边界元法的输出结果

例如 FREW 计算程序,它能够模拟不同的施工阶段,包括开挖,填土,降水,支撑,预应力锚杆,超载,土体和支护墙参数的改变;可以进行极限平衡分析,用弹塑性模型的实体单元来模拟土体,并用有限单元法来获得弹性系数;可以考虑土体的拱效应和沿墙体土压力的重分布。

这个程序可以预测墙的变形,剪力,弯矩和计算每一施工阶段墙体两侧的土压力和水压力,然后这些内力可以用于支撑结构设计和支撑数量。根据上面提到的经验公式,可以根据墙体变形估算地面沉降,来验证是否满足使用要求。

这个程序也可以计算一些安全系数,以验算处于极限状态下支护墙的设计。

对于深基坑工程，现在又采用更复杂更精确的二维有限元方法如 OASYS SAFE 或者 PLAXIS BV 2-D PLAXIS 来研究基坑、地面和相邻建筑之间的相互作用，从而优化基坑支护设计和基坑施工次序以避免对邻近道路和结构物造成负面影响。必要的话，可以通过提高墙的刚度，减小支撑间距或者增大预应力等措施来满足使用要求。

在多数情况下，注册结构工程师(RSE)对基坑支护担负法定责任，岩土工程师参与设计咨询和监督岩土工程施工，但是注册结构工程师仍然需要对这些工作担负法定责任。2004年(BD, 2004)更清楚的划分了注册结构工程师和注册岩土工程师(RGE)的职责。对于深基坑开挖，注册岩土工程师负责岩土方面的材料，包括岩土工程设计文件和所有地表调查文件。

作者想用一些问题提醒读者，这些问题可能影响基坑设计，但是规范确实允许。

33.4.1 地下连续墙施工引起的地表位移

为了量化基坑设计中地表沉降，往往忽略墙体成槽施工引起的地面沉降。由于成槽方法，施工工艺和地表状况不同，因此对施工引起的地面沉降难以量化。

墙体贯入施工将不可避免的引起显著的地面沉降，从而影响基坑作业。例如，在 LMC Spurline 实例中，为方便反压法贯入钢结构板桩，曾对铁路干线附近地表下的卵石层进行预钻孔穿透，结果导致了 20mm 的累积沉降，与后续开挖引起的沉降相比，该值相当可观。

4.2 支撑的预加轴力

前面已经提到过，预应力支撑可以减少深基坑开挖墙体水平侧移，其带来的附加影响就是墙体两侧产生较平衡的弯矩包络图，使嵌入式钢结构墙体的设计更加需要考虑经济。

保守的模型设计，土体参数估计，最不利地下水位评估和允许强大的施工超载都会引起较高的预应力施加荷载。这些假设在现场施工中都显的很保守，施加的预应力值太大。图 33-27 是基坑第二道支撑施加预应力前后的墙体侧移图。从图中可以发现，支撑面的墙体被顶回墙后软弱的土体中，这就导致墙趾陷入，基坑附近道路沉降增大。

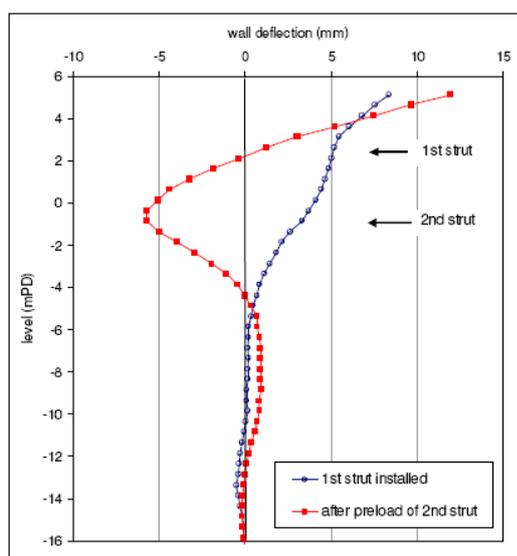


图33-27 预应力对墙体侧移的效果

4.3 立柱的连接节点

在香港和其周边地区，糟糕的支撑连接设计和施工常引发较大沉降量和深基坑不同程度的塌方，(GEO, 1999)。近些年已经强调了支撑连接的详细设计。图 33-28 是围檩和支撑的连接详图，如此设计是为了避免局部失稳和剪切破坏，以形成更加坚固的支撑系统。

除了组合支撑系统，围檩连接不仅可以作为支撑系统还可以延长临时性挡土墙的墙体长

度。围檩质量至为关键，已被纳入质量保证的一部分，仅合格的围檩工可以操作围檩施工。合格的围檩工指的是持有 CITA 颁发的行业测试认证书并在该行业登记的工人。测试不仅包括施工技术而且包括施工程序。



图33-28 围檩和支撑的连接详图33-

33.4.4 深基坑反分析得到土体刚度参数

一般用标准贯入击数初步估计土体强度。基坑设计通常采用一个较低的相关系数 $E' = 1 \times \text{SPT}'N'$ (MPa)，许多工程师利用反分析证明现场观测可以取得一个更高的相关系数，例如 Lui & Yau (1995), Davies (1987), Chan (2003) 以及 Pan et al (2006)。这些文章总的认为，对于表面沉积土 $E' = 1.5 \times N'$ (MPa)，对于风化土 $E' = 2-3 \times N'$ (MPa)。

33.5 现场监管要求

现场施工需要得到相关政府部门的同意。根据施工次序，基坑支护结构的施工一般分阶段得到批准。

例如，围护结构和相应的土体注浆加固改良施工一般会得到同时批准；而坑内土体的开挖和支撑的施工则单独得到批准。在审批申请阶段，需要向官方提交支护墙和注浆止水帷幕的施工计划与抽水试验报告，地下室永久结构的施工需要在另一个阶段得到严格审批。

香港现场监管要求与周边城市有点不同。规定要求工程咨询师必须同时负责设计和现场监管。与审批申请阶段一样，相应资质的现场监管人员需要得到政府部门的批准。

现场监督涉及工程监督和现场安全监督。工程监督是为了确保施工技术是否符合建筑法规的条例；现场安全监督是为了控制施工引起的破坏，以确保现场工作人员的生命安全，周边公共环境，相邻建筑和设施的安全。现场监督人员涉及设计施工过程中的主要职能技术人员，包括业主（一般为私人房产公司），注册结构工程师，注册岩土工程师和注册合同师。现场监督的典型的管理流程如图 33-29 所示

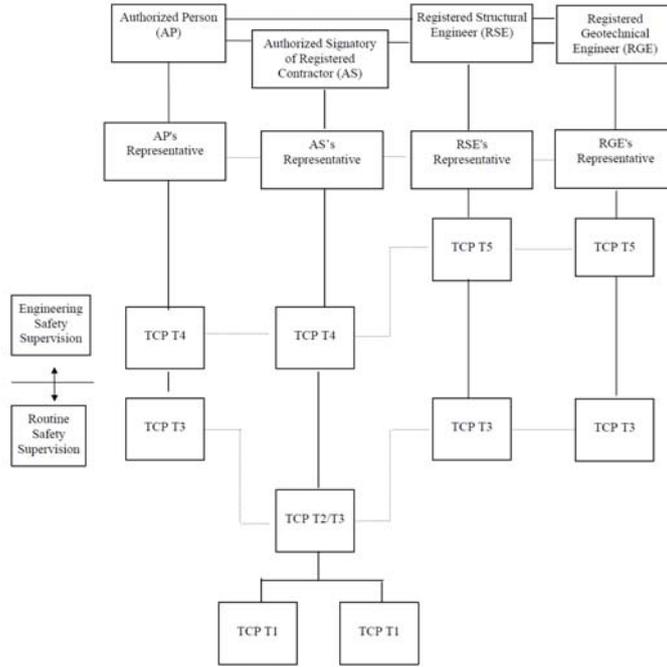


图 33-29 现场监督的管理流程

考虑到设计人员的角色，不同级别的监管技术合格人员的资格要求如下表。

表 33.2 : 现场监督人员的资质要求

TCP 水平	学术/专业资质		相关经验
	注册结构工程师	注册岩土工程师	
T5	注册专业工程师(土木/结构/岩土)	注册专业工程师(岩土)	n/a
T3	土木, 结构, 岩土工程专业, 较高学历	土木, 结构, 岩土工程专业, 较高学历	5 年
	土木, 结构, 岩土工程专业学位	土木, 结构, 岩土工程专业学位	2 年
	土木, 结构, 岩土工程专业学位, 参加并通过规定的 top-up 课程考试	地质工程专业学位或者土木结构, 岩土工程专业学位, 参加并通过规定的 top-up 课程考试	1 年

根据规范第 7 节，挖深超过 4.5 米的深基坑被认为是比较复杂的岩土工程问题，现场监督需要注册结构工程师和注册岩土工程师的代表，现场监管规范(BD 2005)规定了监管技术合格人员(TCP)监督的级别、资格、数量和频率，同时监督也取决于工程的类型、规模、现场敏感性和复杂度。业主，注册结构工程师和注册岩土工程师的职责是相互联系的，而和注册合同师是独立的，因此，在许多情况下，现场监管人员代表了两类人员—注册结构工程师和注册岩土工程师。

对于小规模的基础，现场监督可能需要 T3 监督人员全职驻扎在现场，而 T5 监督人员需要每隔一周进行现场检查。注册结构工程师和注册岩土工程师可以自主监督认为有必要监督的场地。

在项目关键阶段，T5 现场监督人员要参与到现场工作，而且检查的最小的间隔时间如下表：

表 33-3：基坑施工关键阶段

关键项目	检查的最小频率
影响直径大于 200mm 的水管，煤气管线，浅基础建筑物，隧道，MTR/KCR 结构(例如，在基坑底部到地表的 60° 连线的范围内)	一周两次
在距离 MTR 结构，公路，铁路，给排水结构，直径大于 200mm 的水管，煤气管线，浅基础建筑，隧道，边坡等 5 米的范围内进行地下连续墙，钻孔灌注桩，钢板桩，钢管桩和兵桩的施工	一周两次
支撑预加荷载	在第一批支撑预加载期间
当地表和建筑物的沉降，地下水位的下降超过允许值时，所采取措施的实施	一周两次
抽水试验，地表现场监测，回灌井的施工	前七天的每天，之后一周两次
结构支撑的拆卸	拆除过程
Confirmation of founding level of retaining wall	First batch of retaining wall footings with each value of bearing pressure
现场爆破，包括爆破会导致临近居民抗议或紧邻需要保护的陆地和建筑	每次爆破

而对于大规模的基坑，现场监督需要 T5 监督人员全职驻扎在现场，并领导一些 T3 监督人员负责检查所有的施工项目，当然包括项目的关键施工阶段。

对于基坑开挖大于 7.5 米深的敏感场地，要求会更严格。所谓的敏感的场地是指施工会对生命财产造成重大损失的场地。这些场地会对浅基础的老建筑，隧道，主要的公路，铁路，水管，煤气管线，边坡，支护墙和具有不稳定的历史的场地造成一定的影响。在这种情况下，除了 T5 和 T3 监督人员以外，现场监督指导员（咨询指导员或注册岩土工程师）每月去现场巡视一次以提高现场技术监督。现场监督指导员拥有注册岩土工程师或注册专业工程师资质，在公司担任合作者或指导员，负责递交岩土工程报告。负责项目的注册岩土工程师也可以作为现场监督指导员。

所有的 TCP 必须履行上级赋予的职责，所有现场的监督记录必须保存下来以便于建筑当局和岩土工程师办公室代表在不提前通知的情况下随时查询。

33.6 工程实例

本节介绍几个工程实例，由香港 Ove Arup & Partners 负责基坑设计和现场监测。

33.6.1 香港大潭道 12—16 号发展项目—兵桩+锚杆支护

场地长 57m，宽 45m，环绕于 Tai Tam 路和延伸于大海的天然边坡之间。开发项目包括 6 座 3 层的住宅楼。基坑最终开挖面与路面高差 13m。

场地地层由 2 至 6m 的薄地层构成，表面是 2 至 4m 的全风化凝灰岩，下面是基岩。基岩位于路面以下 5 至 8m，强度稍弱于凝灰岩。地下水位较低，但设计需要考虑岩面顶部 2m 厚的上层滞水。

考虑地形倾斜和周边汽车坡道，采用临时兵桩支护。锚杆和兵桩作为临时挡土结构以方便基坑开挖和通畅的施工 L 形钢筋混凝土永久性挡土墙，同时也为取土和施工地下结构提供最大的工作面。

兵桩墙由等级 43，规格 254x254x73kg/m 的工字型钢柱构成，水平间距 750mm。贯入次序为首先利用临时套管和 ODEX 钻头预成孔，然后贯入工字型钢柱至设计标高。型钢依

次贯入且用焊接连接。孔环空隙由非收缩水泥止水帷幕填充，然后拔出临时套管。每三根桩里面有一根贯入标高以下以满足墙体稳定性。其他桩稍高于岩层顶面防止被拔起。渠状板条与上部兵桩焊接，板条后面的空隙由素混凝土填充。现场如图 33-30，图 33-31 是暴露的岩面。



图 33-30 现场图



图 33-31 暴露的岩面和排桩

锚杆是直径 20mm 和 50mm 的高强度钢筋混凝土杆，安装于直径 100mm 的钻孔内，倾斜 20 度，间距分别为 750mm 和 1500mm。以气体为媒介冲击钻进。杆件安装完成后，灌浆填充空隙。这是香港地区常用的土钉锚杆支护。不对锚杆施加预应力，所以他们处于被动工作状态。基坑开挖至 2m，进行锚杆支护。图 33-32 是锚杆的详图。



图 33-32 锚杆抗拔试验



图 33-33 手工岩体开挖

岩体开挖时每 2m 要测绘岩石的节理，以评估岩体的稳定性和提高开挖方法并且可以及时的用锚杆支护潜在的不稳定的岩体。靠近兵桩时，应该用手工开挖以减小超开挖，因为超挖会破坏和影响墙体的稳定性，如图 33-33。

记录的墙体最大侧移小于 10mm，远远小于设计值。这主要归咎设计时对地下水位和岩层顶面附近材料的弹性模量的保守估计。

33.6.2 新界落马洲支线东进口隧道—钢板桩+支撑

为了将 Sheung Shui 北侧的 East Rail 主干线与 7.4km 长的落马洲(LMC)高速线相连，需要开挖 14 m 深 20 m 宽的基坑用以建设 700 长的进口隧道。施工场地位于 East Rail 主干线和提供来自大陆饮用水的 Dongjiang 储水库之间的狭长地带。图 33-34 是竣工的结构，储水库附近的开挖工程见图 33-35。



图 33-34 竣工的隧道



图 33-35 储水库附近的浅轨道基坑开挖

沿隧道的地质条件为处于深度 4 至 8 m，5 m 厚的冲击土，位于全分化的火山岩上。岩面位于地表下 19 至 35 m，地下水位位于地表下 2 至 3 m。

施工扰动和地表沉降是铁路局和供水部门—Water Supplies Department (WSD)最为关注的，因此必须严格挑选方案，制定好施工顺序，认真做好检测工作，以确保运行铁路和水库不受影响。

临时性挡土墙采用等级 43 FSP-III & IV 板桩支护，4 道水平支撑，后面 3 道支撑施加最大预应力 250kN/m。

施工过程中，开始用振动法贯入板桩，然后用高频率锤击法贯入。根据经验，振动振幅导致铁路和水库附近的交通难以达到要求。因此在铁路和水库附近采用反压法贯入板桩，如图 33-36。



图 33-36 反压法贯入板桩



图 33-37 运行铁路旁隧道基坑开挖

尽管良好的地质条件为成功用于板桩支护奠定了基础，但是在贯入板桩的过程中，反压法无法穿透地下存在的岩石和巨，因此在贯入前需要采用 ODEX 钻头钻进，这就引起了铁路线的沉降。

图 33-37 是运行铁路旁隧道基坑开挖场面。同时对基坑进行了全面监测，包括对运行和改道的 East Rail 干线的自动监测，周边建筑设施的地表移动监测，周边地表还布置了孔隙水压计，沿墙体布置了测斜仪。经监测，墙体最大水平侧移为 25mm，道路累计沉降大约 45mm，其中大约一半沉降值来源于以上介绍的板桩墙预钻孔施工的扰动。同时需要夯实渣道控制面。对该项明挖法隧道工程的详细介绍来源于 Storry et al. (2006)。

33.6.3 香港理工大学酒店与旅游管理学院（九龙）—钢管桩墙+内支撑

场地是位于校园南端的大学 70 年代的职工宿舍。场地两边各有一条道路，北边有操场，南边有消防管理大楼。该场地被重新规划为学校的酒店旅游管理学院，附有四层地下室作为

礼堂和车库。基坑最大开挖深度为 25m。如图 33-38。



图33-38 基坑现场开挖图

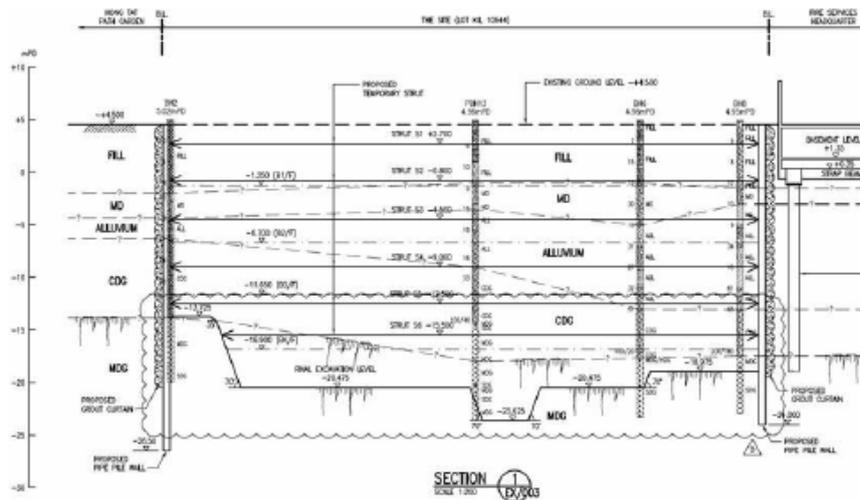


图33-39 土层剖面图33-（南—北方向）

由地质勘察报告,该场地为 6 至 7m 厚的砂填土上覆 5m 厚的海洋粉质粘土。以下有 10m 厚的冲积粉质粘土,基岩上覆薄层全分化的花岗岩。基岩位于地下 15 至 20m。地下水位于原始地面下 2 至 3m。图 33-39 是土层剖面图 33-（南—北方向）。

基础设计为筏板基础,承担上部荷载,微型桩抵抗上拔力。由于场地布满微型桩,影响取土效率。为了方便底层微型桩施工和缩短工期,地下室采用顺作法施工。

临时性挡土墙采用钢管桩,等级 50,外径 610mm,厚度 12mm,间距 800mm。由于基坑开挖深度已经平均进入基岩 7m,管桩在基岩顶面已为极限,因此在基岩顶面以下采用钢结构工字形柱以取得较快的施工进度。管桩后面用 tube-a-manchette 法布置止水帷幕,间距 800mm。

支撑系统采用十字交叉支撑且留有最大空间以方便底层贯入微型桩,6 道支撑,施加最大预应力 500kN/m。如图 33-40 和 41。

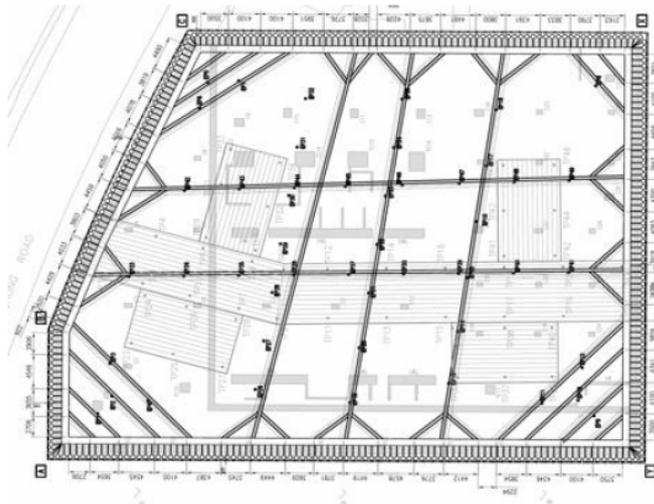


图33-40 十字交叉支撑



图33-41 贯入抗拔桩

33.6.4 九龙天光道某住宅开发工程—钻孔灌注桩+钢管桩+钢板桩墙

基础面积为 $120 \times 120\text{m}^2$ ，位于香港九龙半岛山脚附近。为便于裙房和地下室结构施工，要在起伏地形上进行超过 40m 的深基坑开挖，此为工程建设的难点。

除了以前作业留下的薄层人工填土，场地以下主要为天然密集的全风化花岗岩(CDG)（标准贯入击数‘N’ > 50）。由于香港地区的花岗岩风化具有差异性，所以在一些钻孔中发现，全风化花岗岩(CDG)中含有大量岩心。基岩剖面大致沿着地形向东面延伸，从山腰+20mPD至山下坡-9mPD，山腰和山下坡分别位于地表以下大约 41m 和 24m。

鉴于场地地形复杂，基岩顶面相对较高，因此选用临时锚杆支护，此法被认为是经济效益最高的方法，既能提供基坑开挖时的最大工作面，又可以对不平衡的开挖灵活处理。但方案被政府否决，原因是不允许临时锚入基坑外侧，这是香港企业面临的实际问题。

最终的方案为，塔楼 1 的最大临时支护高度为 44m，裙房上部悬臂高度超过 15m，因此采用直径 3m 的现场灌注桩，挡土区域采用钢板桩和钢管桩，以满足不同的开挖深度和地质条件，如图 33-42。

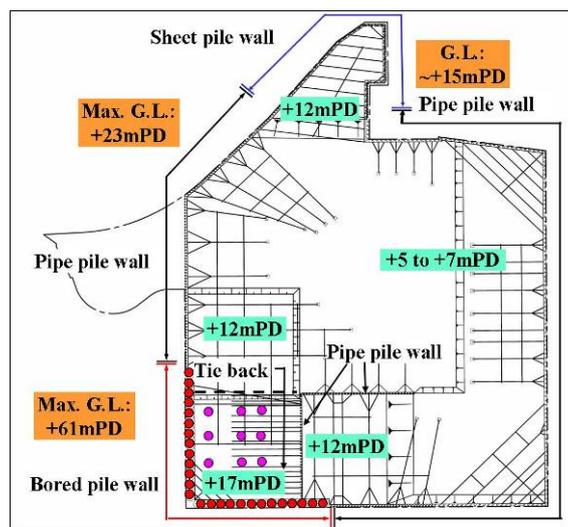


图 33-42 围护平面布置图

塔楼 1 地下室采用逆作法，为进行最大深度的开挖以及避免西南角地层突变处支撑布置拥挤的问题，完成塔楼 1 地下室后开始施工塔楼 2 和 3 的裙房以取得坚固的支撑系统。图

33-43 和图 33-44 说明了此关键位置的施工顺序。

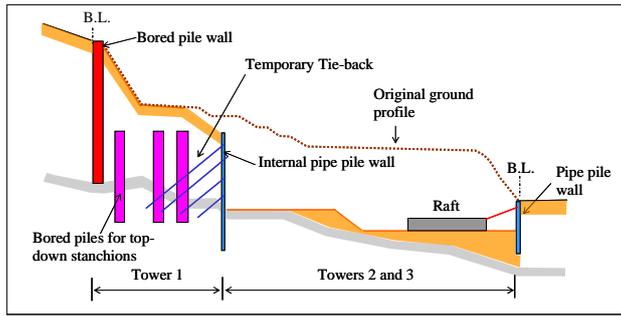


图33-43 顺作法施工塔楼2和3

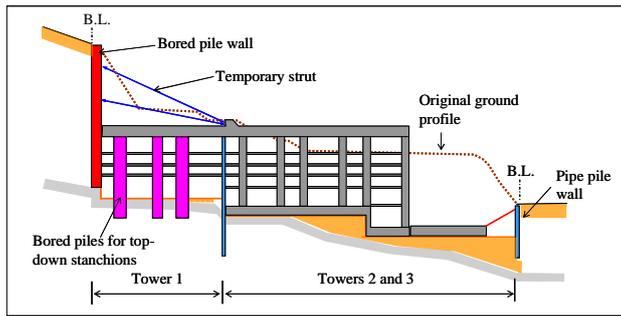


图33-44 逆作法施工塔楼1

大直径钻孔灌注桩采用机械开挖。灌注桩直径 3m，间距 3.6m。土壤层采用机械抓斗开挖，坚硬层采用流水冲洗反向循环钻入法。钻孔由临时钢套管支护，管靴处有钢牙。该法的优点是可以穿透岩心并且减少桩孔塌方的几率。图 33-45 为场地山腰处的灌注桩施工，图 33-46 是塔楼 1 逆作法施工前的墙体。



图 33-45 钻孔灌注桩施工



图 33-46 钻孔灌注桩前开挖

为减少岩体开挖量，灌注桩在岩层顶面封端，然后用预留管在桩下钻孔嵌入剪切销钉，以保证墙趾稳定性。灌注桩间的空隙由现场浇筑混凝土填充。

对于其他区域，采用顺作法施工地下室，因为施工需开挖 400,000m³ 土方，其中 20% 是坚硬的岩石，这对于上部结构很关键。另外一个主要原因是裙楼下的筏板基础位于中度风化的岩层之上，逆作法中的支撑柱会消耗更多的金钱和时间。

钢板桩用于小型场地的临时挡土结构，塔楼 8 附近，最大挡土高度为 8m，土壤相对松散，用振动器贯入板桩。

场地大部分区域开挖深度较深，大致从 15m 至 40m，钢管桩能够穿透密实的全风化花岗岩 CDG 和岩心，它的抗弯承载力也相对较大，因此采用钢管桩。采用的钢管桩，等级 50B，环形中空截面，外径 610mm，厚度 10mm 至 15mm，间距根据挡土高度，约 800mm 至 1500mm。多数钢管桩在岩层顶面封顶，然后在桩端下部嵌入 H 型截面的剪切销钉，防止桩

端踢出。

33.6.5 香港岛渣打道 11 号项目——地下连续墙+逆作法

场地重新开发为 32 层，134m 高的商业建筑，位于香港商业地带中心区。新开发包括 3 层 15m 高的地下室车库。场地大小为 50m x 70m，周边有敏感建筑设施，包括轨道交通站和运行地铁，浅层摩擦桩上的高层建筑以及人行道和人行桥，分别离施工现场 4m、4.5m 和 7m。另外，场地留有以前用过的一层地下室和相应的弗兰克桩。

场地地质条件为 8-10m 的填土，上覆 6-8m 冲积土。在这两层下面是厚度不一、全风化、高分解的花岗岩层。岩顶岩石为 III 级，质量良好，倾向跨越场地，地下由东 30m 至西 70m。地下水位于地表下 2m。图 33-47 为车站、渣打楼地下室、现存的斯怀尔地下室和弗兰克群桩。

为了快速道路施工和限制周边建筑地表移动，尤其是轨道建筑，15m 深地下室采用逆作法施工。基础结构采用大直径钻孔灌注桩联合地下连续墙以支撑上部结构荷载。灌注桩直径 2.5m 至 3.0m，加上扩大头，直径最大可达 4.4m，持力层为良好基岩。每根桩上持有钢立柱，方便逆作法施工。钢立柱嵌入混凝土墙体、柱子，作为地下室永久结构。16m 长的临时钢结构套管贯入每根钻孔桩上，便于贯入钢立柱。基础施工现场如图 33-48。

现场浇注连续墙体作为挡土结构，同时作为地下室永久墙体。墙体厚度 1.0m，靠近 MTRC 中心站的墙体厚度增加至 1.2m。先浇注地表+4.0mPD 处的楼板和-1.7 至-3.0mPD 处的首层楼板，然后再开挖楼板以下的土体。底层楼板浇注完以后，在地层楼板局部贯入 1.5m 深的小型桩，作为抗拔结构。-6.3mPD 处的二层楼板采用顺作法。

场地面积有限，不能同时施工灌注桩和连续墙。灌注桩套管贯入前先用传统的旋转和摇摆设备成孔，抓斗取出土体。凿入法突破浅层障碍，深层障碍和岩心采用反循环钻进法穿透。连续墙大致采用抓斗法。沿着渣打道，采用反循环环刀“水压磨”挖掘墙体渠道以减少对 MTRC 中心站的振动。

反铲挖掘机和液压破碎锤拆除底板下现存的地下室结构，如图 33-49。在基坑外部全面安置监视器以监视邻近建筑并检查预测位移，以防超出。经检测地表最大沉降为 30mm，在预测范围内。

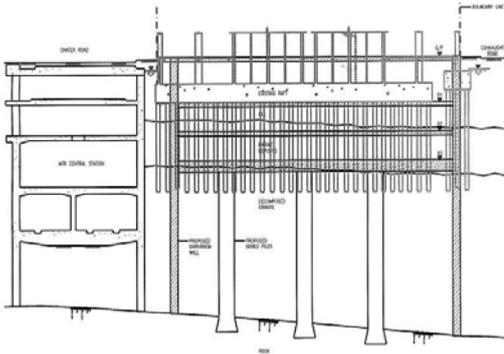


图 33-47 南北剖面



图 33-48 基础施工现场



图 33-49 地下室开挖

33.6.6 国际金融中心—无支撑圆形地下连续墙

国际金融中心高 480m，108 层酒店式办公楼，地下 4 层，位于 MTRCL Kowloon 站综合开发区西南角。东面 3m 有 MTRCL 隧道，MTRCL Kowloon 站离开发区有 15m 远。

首先对场地进行全面处理。先开挖原始海床下面的海洋粘土，然后填入 26m 厚砂土，下卧大约 10m 后的冲积土，冲击土下面是分化的花岗岩。基岩面位置-30mPD。采用地球物理地质勘探法确定基岩面。

由于邻近 MTRC 隧道，所以采用内径 76m 无支撑圆形地下连续墙作为围护结构进行 26m 深基坑开挖。开挖不会对邻近建筑产生显著影响。围墙也作为地下结构的一部分。该工程详细的基础设计参考 Chan et al (2004)。

主、副连续墙体厚 1.5m，交错施工，副连续墙体可作为主墙体的连接头。与一般的连续墙施工相比，环形连续墙施工对位置、单块墙体的垂直度要求更高，这样才能用方形墙体连接成理想的环形墙体。此时的连续墙开挖更需要渠刀，因为渠刀可以时刻检查垂直度，这样在开挖沟渠时才可以随时调整。

成功的抽水试验表明围护结构内的降水没有对周边建筑造成严重影响后，才进行基坑开挖。浅层土壤通过斜坡装入卡车。抓斗机运出 深层土壤，如图 33-50。如此大规模的土方开挖，对整个工程进度具有深远意义。环梁作为防护措施减少开挖的影响。



图 33-50 塔吊和起重机取土



图 33-51 基坑全开挖

33.7 结论

本章采用几个工程实例介绍了香港地区基坑开挖的常用的贯入式钢结构墙体和支撑系统的主要特点。同时还讨论了一些施工中的关键问题，为香港地区设计施工贯入式钢结构墙

体和支撑系统提供参考。

参考文献

- [1] Buildings Department (2004), “Code of Practice for Structural Use of Concrete”, HKSAR, 180pp.
- [2] Buildings Department (2004), “Practice Note for Authorized Persons and Registered Structural Engineers 294 : Division of Responsibilities between Authorized Person, Registered Structural Engineer and Registered Geotechnical Engineer”, Buildings Department, HKSAR, 13pp.
- [3] Buildings Department (2004), “Code of Practice for Foundations”, HKSAR, 57pp.
- [4] Buildings Department (2005), “Code of Practice for Structural Use of Steel”, HKSAR, 357pp.
- [5] Buildings Department (2005), “Code of Practice for Site Supervision”, HKSAR, 99p.
- [6] Chan, A.K.C. (2003), “Observations from Excavations – A Reflection”. Case Histories in Geotechnical Engineering in Hong Kong. Proceedings of the 22nd Annual Seminar, Geotechnical Division, Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong, pp. 83-101.
- [7] Davies, J.A. (1987), “Groundwater Control in the Design and Excavation of a Deep Excavation”. Proc. of the 9th European Conference on Soil Mechanics & Foundations Engineering, Dublin, pp. 139-144.
- [8] Geotechnical Engineering Office (1993), “Geoguide 1 - Guide to Retaining Wall Design”, HKSAR, 258pp.
- [9] Geotechnical Engineering Office (1999), “Geo Report No. 12 - QRA of Collapses and Excessive Displacements of Deep Excavations” , HKSAR, 109pp.
- [10] Lui, J.Y.H. and Yau, P.K.F. (1995), “The Performance of the Deep Basement for Dragon Centre”. Proc. of the 15th HKIE Geotechnical Seminar on Instrumentation in Geotechnical Engineering.
- [11] Pan, J.K.L., Plumbridge, G., Storry, R.B. & Martin, O. (2006), “Back Analysis of Cut and Cover Tunnels in Close Proximity to an Operating Railway in Hong Kong”. Proceedings of Tunnelling and Underground Space Technology, World Tunnel Congress, AITES-ITA Seoul, South Korea, pp. 453-454.
- [12] Sze, W.C.J. and Young, S.T. (2003), “Design and Construction of a Deep Basement through an existing Basement at Central”, Proc. of the 22nd HKIE Geotechnical Division Annual Seminar, pp. 235-243.