

第 18 章 支护结构与主体结构相结合及逆作法

18.1 概述

支护结构与主体结构相结合是指采用主体地下结构的一部分构件（如地下室外墙、水平梁板、中间支承柱和桩）或全部构件作为基坑开挖阶段的支护结构，不设置或仅设置部分临时支护结构的一种设计和施工方法。而逆作法一般是先沿建筑物地下室轴线施工地下连续墙或沿基坑的周围施工其它临时围护墙，同时在建筑物内部的有关位置浇筑或打下中间支承桩和柱，作为施工期间于底板封底之前承受上部结构自重和施工荷载的支承；然后施工地面一层的梁板结构，作为地下连续墙或其它围护墙的水平支撑，随后逐层向下开挖土方和浇筑各层地下结构，直至底板封底；同时，由于地面一层的楼面结构已经完成，为上部结构的施工创造了条件，因此可以同时向上逐层进行地上结构的施工；如此地面上、下同时进行施工，直至工程结束。逆作法可以分为全逆作法、半逆作法及部分逆作法。逆作法必然是采用支护结构与主体结构相结合，对施工地下结构而言，逆作法仅仅是一种自上而下的施工方法。相对而言，支护结构与主体结构相结合的范畴更广，它包括周边地下连续墙两墙合一结合坑内临时支撑系统采用顺作法施工、周边临时围护体结合坑内水平梁板体系替代支撑采用逆作法施工及支护结构与主体结构全面相结合采用逆作法施工，即支护结构与主体结构相结合既有可能采用顺作法施工也有可能采用逆作法施工。

18.1.1 发展状况

1933 年日本首次提出了逆作法的概念，并于 1935 年应用于东京都千代田区第一生命保险相互会社本社大厦的建设，该工程成为第一个采用支护结构与主体结构相结合的工程。1950 年代意大利开发了地下连续墙技术，随后其应用范围便逐渐扩大，1954 年欧洲其它各国，1956 年南非，1957 年加拿大，1959 年日本，1962 年美国相继采用了地下连续墙技术。地下连续墙技术的应用及工程施工机械化程度的提高有力地推动了支护结构与主体结构相结合在更大范围内的应用，并在日本、美国、英国等国家取得了较大的发展。支护结构与主体结构相结合除了在高层建筑地下室的建筑中采用以外，还较多地应用于地铁车站的建设。上世纪 50 年代末意大利米兰地铁首次采用逆作法以来^[1]，欧洲、美国、日本等许多国家的地铁车站都用该方法建造。

在国内，1955 年哈尔滨地下人防工程中首次应用了逆作法的施工工艺^[1]，随后在上世纪 70~80 年代对逆作法进行了研究和探索。1989 年建设的上海特种基础工程研究所办公楼，地下 2 层，采用支护结构与主体结构全面相结合的方式，是上海也是全国第一个采用封闭式逆作法的工程。虽然该工程建筑规模不大，但对支护结构与主体结构相结合的施工方法做了可贵的探讨，使主体结构与支护结构相结合的设计和施工方法的推广应用有了良好的开端。上世纪九十年代初上海地铁一号线的常熟路站、陕西南路站和黄陂南路站三个地铁车站成功实践了支护结构与主体结构相结合的方式，进一步推动了其在上海地区更多基坑工程中的应用。与此同时，国内其它地区如北京、广州、杭州、天津、深圳等地也均开始应用支护结构与主体结构相结合的方式。本世纪以来，随着大城市的基坑向“大、深、紧、近”^[2]的方向发展和环境保护要求的提高，支护结构与主体结构相结合在国内迅速发展，成为软土地区 and 环境保护要求严格条件下基坑支护的重要方法。其中在广州、杭州、深圳、天津地区应用较多，尤以上海地区应用最多。我国的台湾地区和香港地区也有很多基坑工程尝试采用了支护

结构与主体工程相结合的方法。

支护结构与主体结构相结合应用于 2 层以上的地下室甚至是 8 层的地下室,其深度也从几米到三十几米。并且应用范围也从高层建筑地下室拓展到地铁车站、市政、人防工程等领域。该支护方法在这些工程的成功应用取得了较好的经济效益和社会效益,得到了工程界越来越多的重视,并成为一项很有发展前途和推广价值的深基坑支护技术。

18.1.2 优点与适用范围

与常规的临时支护方法相比,采用支护结构与主体结构相结合施工高层和超高层建筑的深基坑和地下结构具有诸多的优点,如由于可同时向地上和地下施工因而可以缩短工程的施工工期;水平梁板支撑刚度大,挡土安全性高,围护结构和土体的变形小,对周围的环境影响小;采用封闭逆作施工,施工现场文明;已完成之地面层可充分利用,地面层先行完成,无需架设栈桥,可作为材料堆置场或施工作业场;避免了采用临时支撑的浪费现象,工程的经济效益显著,有利于实现基坑工程的可持续发展等。

支护结构与主体结构相结合适用于如下基坑工程:

- (1) 大面积的地下工程,一般边长大于 100 m 的大基坑更为合适;
- (2) 大深度的地下工程,一般大于或等于 2 层的地下室工程更为合理;
- (3) 复杂形状的地下工程;
- (4) 周边状况苛刻,对环境要求很高的地下工程;
- (5) 作业空间较小和上部结构工期要求紧迫的地下工程。

18.2 支护结构与主体结构相结合的设计

基坑工程中的支护结构包括围护结构、水平支撑体系和竖向支承系统。从构件相结合的角度而言,支护结构与主体结构相结合包括三种类型,即地下室外墙与围护墙体相结合、结构水平梁板构件与水平支撑体系相结合、结构竖向构件与支护结构竖向支承系统相结合。根据支护结构与主体结构相结合的程度,可以分为三大类型,即周边地下连续墙两墙合一结合坑内临时支撑系统采用顺作法施工、周边临时围护体结合坑内水平梁板体系替代支撑采用逆作法施工、支护结构与主体结构全面相结合采用逆作法施工。本节简要说明支护结构与主体结构相结合的有关类型和设计原则,关于其设计的更详细的内容可参考文献[3]。

18.2.1 支护结构与主体结构的构件相结合设计

一、墙体相结合的设计

通常采用地下连续墙作为主体地下室外墙与围护墙的结合,即两墙合一。两墙合一地下连续墙施工噪音和震动低、刚度大、整体性好、抗渗能力良好;在使用阶段可直接承受使用阶段主体结构的垂直荷载,充分发挥其垂直承载能力,减小基础底面地基附加应力;可节省常规地下室外墙的工程量;可减少直接土方开挖量,且无需再施工换撑板带和进行回填土工作,经济效益明显。两墙合一的墙体通常采用现浇地下连续墙,由于采用现场浇筑,墙体的深度以及槽段的分幅灵活、适用性强,除槽段分缝外,在竖向无水平施工缝。

1. “两墙合一”结合方式

当采用地下连续墙与主体地下结构外墙相结合时,其设计方法因地下连续墙布置方式,即与主体结构的结合方式不同而有差别。地下连续墙与主体结构地下室外墙的结合方式主要有四种:单一墙、分离墙、重合墙和复合墙,如图 18-1 所示。

(1) 单一墙。单一墙即将地下连续墙直接用作主体结构地下室外边墙,如图 18-1 (a) 所示。此种结合形式墙体构造简单,地下室内部不需要另做受力结构层。但此种方式主体结

构与地下连续墙连接的节点需满足结构受力要求，地下连续墙槽段接头要有较好的防渗性能。在许多土建工程中常在地下连续墙内侧做一道建筑内墙（砖衬墙），两墙之间设排水沟，以解决渗漏问题。一般情况下，通过采取一定的构造措施，单一墙可以满足常规地下工程的需要。

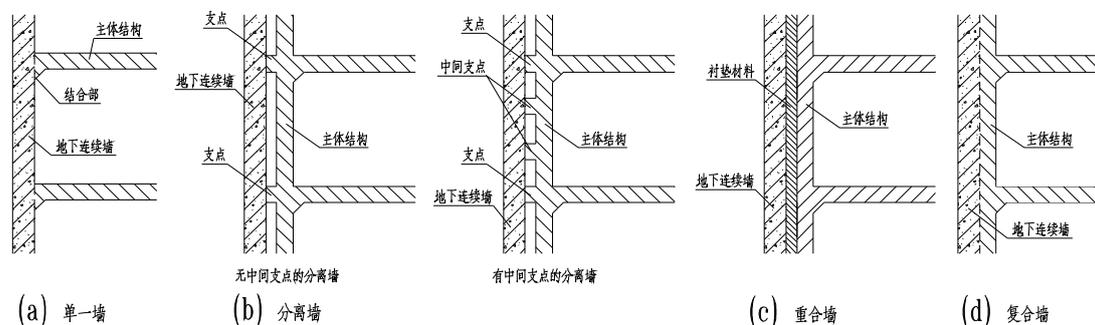


图 18-1 地下连续墙的结合方式

(2) 分离墙。分离墙是在主体结构物的水平构件上设置支点，即将主体结构物作为地下连续墙的支点，起着水平支撑作用，如图 18-1 (b) 所示。这种布置形式的特点是地下连续墙与主体结构结合简单，且各自受力明确。地下连续墙的功用在施工和使用时期都起着挡土和防渗的作用，而主体结构的外墙或柱子只承受垂直荷载。当起着支撑地下连续墙水平横撑作用的主体结构各层楼板间距较大时，地下连续墙可能强度不足，可在水平构件之间设几个中间支点，并将主体结构的边墙加强。此时，可根据主体结构的刚度近似地计算中间支点的弹簧系数，进而计算出地下连续墙的内力。分离墙形式，除温度变化、干燥等引起横梁伸缩而产生的作用力外，主体结构承受的其它荷载对地下连续墙的影响均不予考虑。

(3) 重合墙。重合墙是把主体结构的外墙重合在地下连续墙的内侧，在两者之间填充隔热材料，使之成为仅传递水平力不传递剪力的结构形式，如图 18-1 (c) 所示。这种形式的地下连续墙与主体结构地下室外墙所产生的垂直方向变形不相互影响，但水平方向的变形则相同。从受力条件看，这种形式较单一墙和分离墙均为有利。这种结构还可以随着地下结构物深度的增大而增大主体结构外边墙的厚度，即使地下连续墙厚度受到限制时，也能承受较大应力。但是由于地下连续墙表面凹凸不平，于施工不利、衬垫材料厚薄不等，使应力传递不均匀。

(4) 复合墙。复合墙（如图 18-1 (d) 所示）是将地下连续墙与主体结构地下室外墙做成一个整体，即通过把地下连续墙内侧凿毛或用剪力块将地下连续墙与主体结构外墙连接起来，使之在结合部位能够传递剪力。复合墙结构形式的墙体刚度大，防渗性能较单一墙好，且框架节点处（内墙与结构楼板或框架梁）构造简单。该种结构形式地下连续墙与主体结构边墙的结合比较重要，一般在浇捣主体结构边墙混凝土前，需将地下连续墙内侧凿毛，清理干净并用剪力块将地下连续墙与主体结构连成整体。此外新老混凝土之间因干燥收缩不同而产生的应变差会使复合墙产生较大的内力，有时也需考虑。

2. 设计计算原则

(1) 两墙合一地下连续墙的设计与计算需考虑地下连续墙在施工期、竣工期和使用期不同的荷载作用状况和结构状态，应同时满足各种情况下承载能力极限状态和正常使用极限状态的设计要求。应验算三种应力状态：在施工阶段由作用在地下连续墙上的侧向主动土压力、水压力产生的应力；主体结构竣工后，作用在墙体上的侧向主动土压力、水压力以及作用在主体结构上的垂直、水平荷载产生的应力；主体结构建成若干年后，侧向土压力、水压力已从施工阶段回复到稳定状态，土压力由主动土压力变为静止土压力，水位回复到静止水位，此时只计算荷载增量引起的内力。

(2) 施工阶段, 在水平力的作用下, 两墙合一地下连续墙可采用竖向弹性地基梁法进行分析。墙体内力计算应按照主体工程地下结构的梁板布置以及施工条件等因素, 合理确定支撑标高和基坑分层开挖深度等计算工况, 并按基坑内外实际状态选择计算模式, 考虑基坑分层开挖与支撑进行分层设置及换撑拆除等在时间上的顺序先后和空间上的位置不同, 进行各种工况下的连续完整的设计计算。

(3) 正常使用阶段, 由于主体地下结构梁板以及基础底板已经形成, 通过结构环梁和结构壁柱等构件与墙体形成了整体框架, 因而墙体的约束条件发生了变化, 应根据结构梁板与墙体的连接节点的实际约束条件及侧向的水土压力, 取单位宽度地下连续墙作为连续梁进行设计计算, 尤其是结构梁板存在错层和局部缺失的区域应进行重点设计。正常使用阶段设计主要以裂缝控制为主, 计算裂缝应满足相关规范规定的裂缝宽度要求。

(4) 墙体承受竖向荷载时, 应分别按承载能力极限状态和正常使用极限状态验算地下连续墙的竖向承载力和沉降量。有条件时, 地下连续墙竖向承载力应由现场静荷载试验确定; 无试验条件时, 可参照确定钻孔灌注桩竖向承载力的方法选用。地下连续墙墙底持力层应选择压缩性较低的土层, 且采取墙底注浆加固措施。

(5) 人防区域的地下连续墙, 应采用防爆荷载对地下连续墙进行设计计算。有关构造应满足相关人防规范要求。

(6) 两墙合一地下连续墙的钢筋和混凝土的设计和施工及相关结构构造应满足正常使用阶段防渗和耐久性要求。

(7) 现浇地下连续墙验算正截面承载力和节点构造设计时, 应对混凝土强度设计值和钢筋锚固强度设计值乘以折减系数 0.85~0.90。

(8) 墙顶承受竖向偏心荷载, 或地下结构内设有边柱与托梁时, 应考虑其对墙体和边柱的偏心作用。墙顶圈梁(或压顶梁)与墙体及上部结构的连接处应验算截面受剪承载力。

(9) 地下连续墙内侧设置内衬墙时, 对结合面能承受剪力作用的复合墙, 和结合面不能承受剪力作用的重合墙, 应根据地下结构施工期和使用期的不同情况, 按内外墙实际受载过程进行墙体内力与变形计算。复合墙的内力与变形计算, 以及截面承载力设计时, 墙体计算厚度可取内外墙厚之和, 并按整体墙计算。重合墙的内外墙内力可按刚度分配计算。

(10) 两墙合一地下连续墙与地下结构内部梁板等构件的连接, 应满足主体工程地下结构受力与设计的要求, 一般按整体连接刚性构造考虑。接头处钢筋采用焊接或机械连接。

(11) 两墙合一地下连续墙的倾斜度和墙面平整度, 以及预埋件位置, 均应满足主体工程地下结构设计的要求。一般墙面倾斜度不宜大于 1/300。

(12) 由于两墙合一地下连续墙在正常使用阶段作为永久地下室外墙, 因此涉及到与主体结构构件连接、墙体在正常使用阶段的整体性能、与主体结构的沉降协调、后浇带与沉降缝位置的构造处理、连续墙与后连接通道的连接、连续墙墙顶落低的处理等一系列问题, 因此需要采用一整套的设计构造措施, 以满足正常使用阶段的受力和构造要求。此外, 由于地下连续墙自身施工工艺的特点决定了其与现浇墙体存在一定的差异, 因此连续墙尚需采取可靠的抗渗和止水措施, 包括墙身防水、槽段接缝防水、墙顶与压顶圈梁接缝防水及与基础底板接缝的防水等。

二、水平构件相结合的设计

水平结构构件与支护结构相结合, 系利用地下结构的梁板等内部水平构件兼作为基坑工程施工阶段的水平支撑系统的方法。

1. 结构体系

在地下结构梁板与基坑内支撑系统相结合时, 结构楼板可采用多种结构体系, 工程中采用较多的为梁板结构体系和无梁楼盖结构体系。

(1) 梁板结构。肋梁楼盖由主梁、次梁和楼板组成, 主梁和次梁将楼板划分为多个区

格,根据板区格的平面长宽比,还可分为单向板肋梁楼板和双向板肋梁楼盖。地下结构采用肋梁楼盖作为水平支撑比较适于逆作法施工,其结构受力明确,可根据施工需要在梁间开设孔洞,并在梁周边预留止水片,在逆作法结束后再浇筑封闭。此外也可采用结构楼板后作的梁格体系,在开挖阶段仅浇筑框架梁作为内支撑,基础底板浇筑后再封闭楼板结构。该思路可减少施工阶段竖向支承的竖向荷载,同时也便于土方的开挖,不足之处在于梁板二次浇筑,存在止水和连接的整体性问题。

(2) 无梁楼盖。无梁楼盖结构体系相对于梁板结构体系而言又称板柱结构体系,其结构体系由楼板和柱组成。由于楼板直接支承在柱上,其荷载传力体系也相应的由板直接传递至柱或墙竖向支承,因此楼板厚度较相同柱网尺寸的梁板体系要大。无梁楼盖体系一般视柱网尺寸和荷载大小情况进行设计,当柱网尺寸和荷载较大时,如平板的弯距过大,或不能满足柱顶处的冲切荷载要求,一般可在柱顶处设置柱帽,反之则可不设柱帽。在主体结构与支护结构相结合的设计中可采用无梁楼盖作为水平支撑,其整体性好、支撑刚度大,并便于结构模板体系的施工。在无梁楼盖上设置施工孔洞时,一般需设置边梁并附加止水构造。

2. 设计计算原则

水平结构与支护结构相结合的设计计算原则如下:

(1) 利用地下结构的梁板等内部结构兼作基坑内支撑和围檩时,地下结构外墙的侧向土压力宜采用静止土压力计算。地下结构梁板等构件应分别按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计计算。

(2) 结构水平构件除应满足地下结构使用期设计要求外,尚应进行各种施工工况条件下的内力、变形等计算。分析中可采用简化计算方法或平面有限元方法。当采用梁板体系且结构开口较多时,可简化为仅考虑梁系的作用,进行在一定边界条件下,在周边水平荷载作用下的封闭框架的内力和变形计算。当梁板体系需考虑板的共同作用,或结构为无梁楼盖时,应采用平面有限元的方法进行整体计算分析。

(3) 地下结构的设计与施工中,应验算混凝土温度应力、干缩变形、临时立柱以及立柱桩与地下结构外墙之间差异沉降等引起的结构次应力影响,并采取必要措施,防止有害裂缝的产生。

(4) 地下主体结构的梁板兼作施工平台或栈桥时,其构件的强度和刚度应按水平向和竖向两种不同工况受荷的联合作用进行设计。

(5) 地下结构同层楼板面标高有高差时,应设置临时支撑或可靠的水平向转换结构。转换结构应有足够的刚度和稳定性,并满足抗剪和抗扭承载能力的要求。当结构楼板存在大面积缺失或在车道位置时,均需在结构楼板缺失处架设临时水平支撑。

(6) 地下结构的顶层结构应采取措施处理好结构标高和现场地面标高的衔接,确保支撑受力的可靠性。

(7) 地下各层结构梁板留设通长结构分缝的位置应通过计算设置水平传力构件。

(8) 逆作施工阶段应在适当部位(楼梯间、电梯井或无楼板处等)预留从地面直通地下室底层的施工孔洞,以便土方、设备、材料等的垂直运输。孔洞尺寸应满足垂直运输能力和进出材料、设备及构件的尺寸要求,预留施工孔洞之间应通过计算保持一定的距离,以保证水平力的传递。

(9) 地下结构楼板上的预留孔(包括设备预留孔,立柱预留孔,施工预留孔等)应验算开口处的应力和变形。必要时宜设置孔口边梁或临时支撑等传力构件。立柱预留孔尚应考虑替换结构及主体结构的施工要求。

(10) 施工阶段预留孔在逆作施工结束如根据结构要求需进行封闭,其孔洞周边应预先留设钢筋或抗剪埋件等结构连接措施,以及膨胀止水条、刚性止水板或预埋注浆管等止水措施,以确保二次浇筑结构的连接整体性及防水可靠性。

3. 水平结构与外部围护体结构的连接

水平结构与支护结构相结合设计方法中，周边的围护体根据工程特点，一般可采用“两墙合一”地下连续墙或其它临时围护结构如 SMW 工法、钻孔灌注桩结合止水帷幕等。围护体采用“两墙合一”地下连续墙或临时围护体，其与内部结构之间的连接方式迥异。

(1) 水平结构与两墙合一地下连续墙的连接

在设计地下连续墙和结构梁板连接接头时，可根据结构的实际情况，采用刚性接头、铰接接头和不完全刚接头等形式，以满足不同结构情况的要求。

若地下连续墙与结构板在接头处共同承受较大的弯矩，且两种构件抗弯刚度相近，同时板厚足以允许配置确保刚性连接的钢筋时，地下连续墙与结构板的连接宜采用刚性接头。一般情况下结构底板和地下连续墙的连接均采用刚性连接。常用连接方式主要有预埋钢筋接驳器连接（锥螺纹接头、直螺纹接头）和预埋钢筋连接等型式。

若结构板相对于地下连续墙厚度来说较小（如地下室楼板），接头处板所承受的弯矩较小，可以认为该节点不承受弯矩，仅起竖向支座作用，此时可采用铰接接头。常用连接方式主要有预埋钢筋连接和预埋剪力连接件等型式。

若结构板与地下连续墙厚度相差较小，可在板内布置一定数量的钢筋，以承受一定的弯矩，但在板筋不能配置很多以形成刚性连接时，宜采用不完全刚接形式。

(2) 水平结构与临时围护体的连接

水平结构与支护结构相结合的设计中，当围护体采用临时围护结构时，围护墙和结构外墙两墙分开，此时逆作的施工工艺要求结构外墙只能顺作施工。从结构受力、构造要求以及防水的角度出发，结构外墙与相邻结构梁板须整体连接，二者一次浇筑施工，这就要求逆作施工地下各层结构的边跨位置须内退结构外墙一定的距离，逆作施工结束后，结构外墙和相邻的结构梁板一道浇筑。这将对地下各层水平结构带来两个方面的技术问题，一是临时围护体与内部结构之间的水平传力体系应如何设置，二是边跨结构二次浇筑的接缝止水和支撑穿外墙处止水如何处理。

水平传力体系的一般要求如下：在内部结构方面，内部结构周边一般应设置通长闭合的边环梁，边环梁的设置可提高逆作阶段内部结构的整体刚度、改善边跨结构楼板的支承条件，而且还可为支撑体系提供较为有利的支撑作用面；在水平支撑方面，其型式和间距可根据变形控制要求进行计算确定，但应尽量遵循水平支撑中心对应内部结构梁中心的原则。如不能满足该原则，支撑作用点也可作用在内部结构周边设置的边环梁上，但需验算边环梁的弯、剪、扭截面承载力。临时围护体与首层及地下一层主体结构的连接的平面图分别如图 18-2 和图 18-3 所示。临时围护体与首层及地下一层主体结构的连接的平面图分别如图 18-4 和图 18-5 所示。

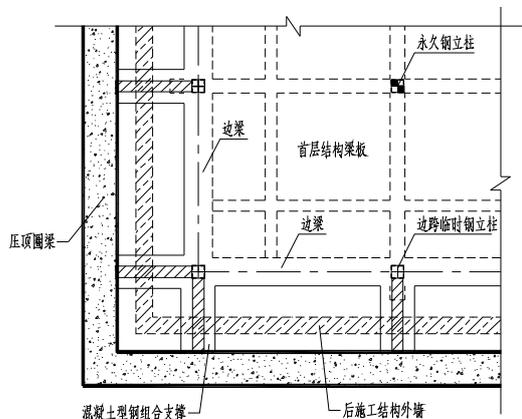


图 18-2 临时围护体与顶层结构连接平面

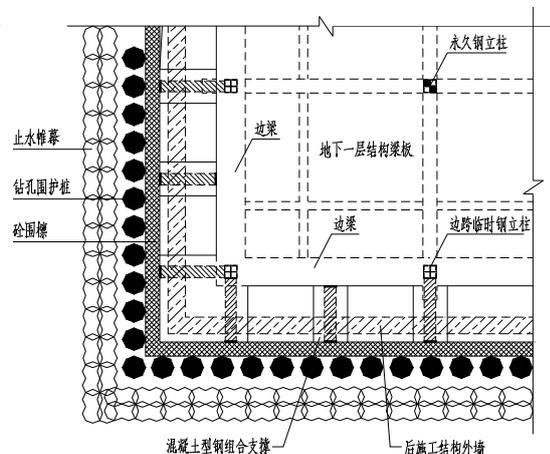


图 18-3 临时围护体与地下一层结构连接

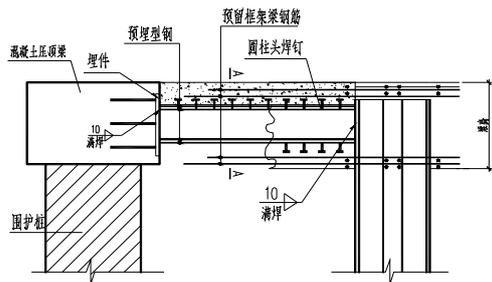


图 18-4 围护体与顶层结构连接剖面

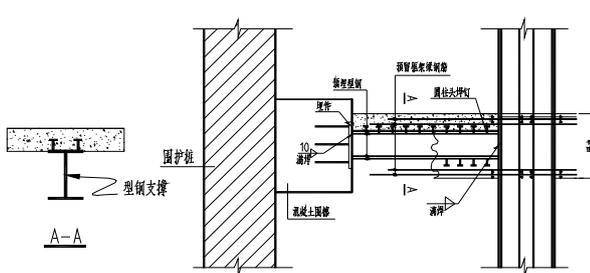


图 18-5 围护体与地下一层结构连接剖面

边跨结构存在二次浇筑的工序要求，二次浇筑随之带来接缝位置的止水问题，主要体现在逆作阶段先施工的边梁与后浇筑的边跨结构接缝处止水。接缝防水技术目前已经比较成熟，而且也在实际工程中也得到大量的应用。一般情况下，可先凿毛边梁与后浇筑顶板的接缝面，然后嵌固一条通长布置的遇水膨胀止水条。如结构防水要求较高时，还可在接缝位置增设注浆管，待结构达到强度后进行注浆充填接缝处的微小缝隙，可达到很好的防水效果。

周边设置的支撑系统待临时围护体与结构外墙之间密实回填后方可进行割除，由此将存在支撑穿结构外墙的止水问题。不同的支撑材料其穿结构外墙的止水处理方式也不尽相同，当支撑为 H 型钢支撑时，可在 H 型钢穿外墙板位置焊接一圈一定高度的止水钢板，止水钢板的作用是隔断地下水沿型钢渗入结构内部的渗透路径；当支撑为钢管支撑时，可将穿外墙板段钢管支撑代替为 H 型钢，以满足止水节点处理要求；当支撑为混凝土支撑时，可在混凝土支撑穿外墙板位置设置一圈遇水膨胀止水条，或可在结构外墙上留洞，洞口四周设置刚性止水片，待混凝土支撑凿除后再封闭该部分的结构外墙。

4. 逆作阶段梁柱节点的处理

逆作阶段往往需要在框架柱位置设置立柱作为竖向支承，因此需解决水平结构梁钢筋穿越不同形式立柱（包括角钢格构柱、钢管混凝土柱、灌注桩立柱）的构造问题，同时要处理好利用作为施工平台的水平结构与立柱的连接节点。此外，后浇带以及结构缝位置的水平传力与竖向支承以及局部高差、错层时的处理措施也是水平构件设计中需考虑的构造问题。

三、竖向构件相结合的设计

竖向构件的结合即地下结构的竖向承重构件（立柱及柱下桩）作为逆作法施工过程中结构水平构件的竖向支承构件。其作用是在逆作法施工期间，在地下室底板未浇筑之前承受地下和地上各层的结构自重和施工荷载；在地下室底板浇筑后，与底板连成整体，作为地下室结构的一部分将上部结构及承受的荷载传递给地基。

1. 竖向支承系统的分类

支护结构与主体结构相结合的工程中竖向支承系统设计的最关键问题就是如何将主体结构柱位置设置的钢立柱和立柱桩与主体结构的柱子和工程桩有机地进行结合，使其能够同时满足基坑逆作实施阶段和永久使用阶段的要求。当然，支护结构与主体结构相结合的工程中也不可避免地需要设置一部分临时钢立柱和立柱桩，其布置原则与顺作法实施的工程中钢立柱和立柱桩的布置原则是一致的。对于一般承受结构梁板荷载及施工超载的竖向支承系统，结构水平构件的竖向支承立柱和立柱桩可采用临时立柱和与主体结构工程桩相结合的立柱桩（一柱多桩）的形式，也可以采用与主体地下结构柱及工程桩相结合的立柱和立柱桩（一柱一桩的形式）。除此之外，还有在基坑开挖阶段承受上部结构剪力墙荷载的竖向支承系统等立柱和立柱桩型式。

（1）一柱一桩

一柱一桩指逆作阶段在每根结构柱位置仅设置一根钢立柱和立柱桩，以承受相应区域的

荷载。当采用一柱一桩时，钢立柱设置在地下室的结构柱位置，待逆作施工至基底并浇筑基础底板后再逐层在钢立柱的外围浇筑外包混凝土，与钢立柱一起形成永久性的组合柱。一般情况下若逆作阶段立柱所需承受的荷载不大或者主体结构框架柱下是大直径钻孔灌注桩、钢管桩等具有较高竖向承载能力的工程桩，应优先采用“一柱一桩”。根据工程经验，一般对于仅承受 2~3 层结构荷载及相应施工超载的基坑工程，可采用常规角钢拼接格构柱与立柱桩所组成的竖向支承系统；若承受的结构荷载不大于 6~8 层，可采用钢管混凝土柱等具备较高承载力钢立柱所组成的“一柱一桩”型式。

“一柱一桩”工程在逆作阶段施工过程中，需在梁柱节点位置上预留浇筑孔，基坑开挖完毕后通过浇筑孔在钢立柱外包混凝土，使钢立柱在正常使用阶段可作为劲性构件与混凝土共同作用。

主体结构与支护结构相结合的工程中，“一柱一桩”是最为基本的竖向支承系统型式。它构造型式简单、施工相对比较便捷。“一柱一桩”系统在基坑开挖施工结束后可以全部作为永久结构构件使用，经济性也相当好。

(2) 一柱多桩

在相应结构柱周边设置多组“一柱一桩”则形成“一柱多桩”。一柱多桩可采用一柱（结构柱）两桩、一柱三桩（如图 18-6 所示）等型式。当采用“一柱多桩”时，可在地下室结构施工完成后，拆除临时立柱，完成主体结构柱的托换。

“一柱多桩”的主要缺点是：钢立柱为临时立柱，逆作阶段结束后需割除；节点构造相比“一柱一桩”更为复杂；主体结构柱托换施工复杂。由于“一柱多桩”的设计需要设置多根临时钢立柱，钢立柱大多需要在结构柱浇筑完毕并达到设计强度要求后割除，而不能外包混凝土形成“一柱一桩”设计中的结构柱构件，加大了临时围护体系的工程量和资源消耗。一般而言，“一柱多桩”多用于工程中局部荷载较大的区域，因而应尽量避免大面积采用。利用“一柱多桩”设计全面提高竖向支承系统的承载能力，盲目增加逆作法基坑工程中同时施工的上部结构层数，以图加快施工进度，是不可取的。基坑开挖阶段主要竖向支承系统承受的最大荷载，应控制在“一柱一桩”系统的最大允许承载能力范围之内。

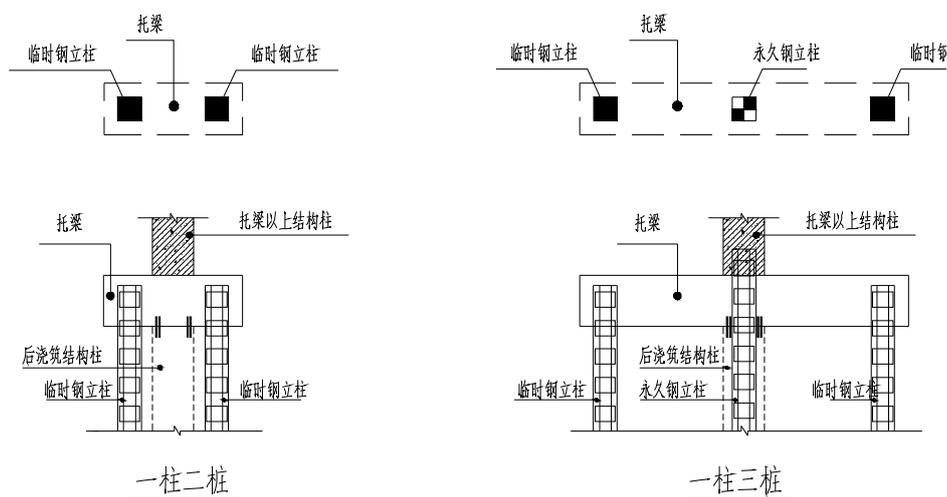


图 18-6 一柱多桩布置示意图

(3) 承受上部墙体荷载的竖向支承系统

承受上部墙体荷载的竖向支承系统是一种特殊的“一柱多桩”应用方法，用于在那些必须在基坑开挖阶段同时施工剪力墙构件的工程中，通过在墙下设置密集的立柱与立柱桩，以提供足够的承载能力。承受上部墙体荷载的竖向支承系统与常规“一柱多桩”的区别在于，它在

基坑工程完成后钢立柱不能够拆除，必须浇筑于相应的墙体之内，因此必须预先考虑好合适的钢立柱构件的尺寸与位置，以尽量利于墙体钢筋的穿越。

2. 设计与计算原则

采用竖向构件结合时，应考虑如下设计原则：

(1) 支承地下结构的竖向立柱的设计和布置，应按照主体地下结构的布置，以及地下结构施工时地上结构的建设要求和受荷大小等综合考虑。当立柱和立柱桩结合地下结构柱（或墙）和工程桩布置时，立柱和立柱桩的定位与承载能力应与主体地下结构的柱和工程桩的定位与承载能力相一致。主体工程中柱下桩应采取类似承台桩的布置型式，其中在柱下必须设置一根工程桩，同时该根桩的竖向承载能力应大于基坑开挖阶段的荷载要求。主体结构框架柱可采用钢筋混凝土柱或其它劲性混凝土柱型式，若采用劲性混凝土柱，其劲性钢构件应构造简单，适于用作基坑围护结构的钢立柱，而不得采用一些断面型式过于复杂的构件型式。

(2) 一般宜采用一根结构柱位置布置一根立柱和立柱桩型式（“一柱一桩”），考虑到一般单根钢立柱及软土地区的立柱桩的承载能力，要求在基坑工程实施过程中最大可能施工的结构层数不超过 6~8 层。当“一柱一桩”设计在局部位置无法满足基坑施工阶段的承载能力与沉降要求时，也可采用一根结构柱位置布置多根临时立柱和立柱桩型式（“一柱多桩”），考虑到工程的经济性要求，“一柱多桩”设计中的立柱桩应尽量利用主体工程桩，但立柱多需在基坑工程结束后割除。

(3) 钢立柱通常采用型钢格构柱或钢管混凝土立柱等截面构造简单、施工便捷、承载能力高的构造型式。型钢格构立柱是最常采用的钢立柱型式，在逆作阶段荷载较大并且主体结构允许的情况下也可采用钢管混凝土立柱。立柱桩宜采用灌注桩，并应尽量利用主体工程桩。钢管桩等其它桩型由于与钢立柱底部的连接施工不方便、钢立柱施工精度难以保证，因此应尽量少采用。

(4) 当钢立柱需外包混凝土形成主体结构框架柱时，钢立柱的型式与截面设计应与地下结构梁板、柱的断面和钢筋配置相协调，设计中应采取构造措施以保证结构整体受力与节点连接的可靠性。立柱的断面尺寸不宜过大，若承载能力不能满足要求，可选用 Q345B 等具有较高承载能力的钢材牌号。

(5) 框架柱位置钢立柱待地下结构底板混凝土浇筑完成后，可逐层在立柱外侧浇筑混凝土，形成地下结构的永久框架柱。地下结构墙或结构柱一般在底板完成并达到设计要求后方可施工。临时立柱应在结构柱完成并达到设计要求后拆除。

进行竖向构件结合的设计时，应考虑如下计算原则：

(1) 与主体结构相结合的竖向支承系统，应根据基坑逆作施工阶段和主体结构永久使用阶段的不同荷载状况与结构状态，进行设计计算，满足两个阶段的承载能力极限状态和正常使用极限状态的设计要求。逆作施工阶段应根据钢立柱的最不利工况荷载，对其竖向承载力、整体稳定性以及局部稳定性等进行计算；立柱桩的承载能力和沉降均需要进行计算。主体结构永久使用阶段，应根据该阶段的最不利荷载，对钢立柱外包混凝土后形成的劲性构件进行计算；兼做立柱桩的主体结构工程桩应满足相应的承载能力和沉降计算要求。

(2) 钢立柱应根据施工精度要求，按双向偏心受力劲性构件计算。立柱桩的竖向承载能力计算方法与工程桩相同。基坑开挖施工阶段由于底板尚未形成，立柱桩之间的刚度联系较差，实际尚未形成一定的沉降协调关系，可按单桩沉降计算方法近似估算最大可能沉降值，通过控制最大沉降的方法以避免桩间出现较大的不均匀沉降。

(3) 由于水平支撑系统荷载是由上至下逐步施加于立柱之上，立柱承受的荷载逐渐加大，但跨度逐渐缩小，因此应按实际工况分布对立柱的承载能力及稳定性进行验算，以满足其在不不利工况下的承载能力要求。

(4) 逆作施工阶段立柱和立柱桩承受的竖向荷载包括结构梁板自重、板面活荷载以及结构梁板施工平台上的施工超载等, 计算中应根据荷载规范要求考虑动、静荷载的分项系数及车辆荷载的动力系数。一般可按如下考虑进行设计:

在围护结构方案设计阶段: 结构构件自重荷载应根据主体结构设计方案进行计算; 不直接作用施工车辆荷载的各层结构梁板面的板面施工活荷载可按 $2\sim 2.5\text{kPa}$ 估算; 直接作用施工机械的结构区域可以按每台挖机自重 $40\sim 60\text{t}$ 、运土机械 $30\sim 40\text{t}$ 、混凝土泵车 $30\sim 35\text{t}$ 进行估算。

施工图设计阶段: 应根据结构施工图进行结构荷载计算, 施工超载的计算要求施工单位提供详细的施工机械参数表、施工机械运行布置方案图以及包含材料堆放、钢筋加工和设备堆放等内容的场地布置图。

永久使用阶段: 荷载的计算应根据常规主体结构的设计要求进行。

18.2.2 支护结构与主体结构相结合的类型

一、周边地下连续墙“两墙合一”结合坑内临时支撑系统采用顺作法施工

周边地下连续墙“两墙合一”结合坑内临时支撑系统是高层和超高层建筑深基础或多层地下室的传统施工方法, 在深基坑工程中得到了广泛的应用。其一般流程是: 先沿建筑物地下室边线施工地下连续墙, 作为地下室的外墙和基坑的围护结构。同时在建筑物内部的有关位置浇筑或打下临时支承立柱及立柱桩, 一般立柱桩应尽量利用工程桩, 当不能利用工程桩时需另外加设。施工中采用自上而下分层开挖, 并依次设置临时水平支撑系统。开挖至坑底后, 再由下而上施工主体地下结构的基础底板、竖向墙、柱构件及水平楼板构件, 并依次自下而上拆除临时水平支撑系统, 进而完成地下结构的施工。周边地下连续墙“两墙合一”结合坑内临时支撑系统采用顺作施工方法, 主体结构的梁板与地下连续墙直接连接并不再另外设置地下室外墙。图 18-7 为周边地下连续墙两墙合一结合坑内临时支撑系统的基坑在开挖到坑底和地下室施工完成时的情形。

周边地下连续墙“两墙合一”结合坑内临时支撑系统的结构体系包括三部分, 即采用“两墙合一”连续墙的围护结构、采用杆系结构的临时水平支撑体系和竖向支承系统。“两墙合一”地下连续墙刚度大、强度高、整体性好、止水效果好、目前的施工工艺已非常成熟、且其经济效益显著。两墙合一的地下连续墙设计需根据工程的具体情况选择合适的结构形式及与主体结构外墙的结合方式, 在构造上选择合适的接头形式, 并妥善地解决与主体结构的连接、后浇带、沉降缝和有关防渗构造措施。

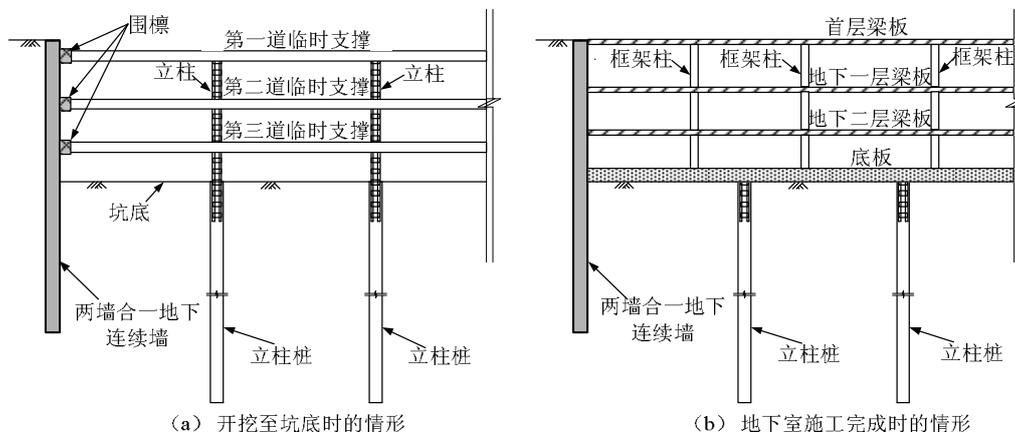


图 18-7 周边地下连续墙两墙合一结合坑内临时支撑系统的基坑在开挖到坑底和地下室施工完成时的情形

临时水平支撑体系一般采用钢筋混凝土支撑或钢支撑。钢支撑一般适合于形状简单、受

力明确的基坑，而钢筋混凝土支撑适合于形状复杂或有特殊要求的基坑。相对而言，钢支撑由于可以回收利用因而造价较低，在施加预应力的条件下其控制变形的能力不低于钢筋混凝土支撑；但钢筋混凝土支撑的整体性和稳定性高于钢支撑。连续墙上一般设置圈梁和围檩，并与水平支撑系统建立可靠的连接，通过圈梁和围檩均匀地将连续墙上传来的水土压力传给水平支撑。

竖向支承系统承受水平支撑体系的自重和有关的竖向施工荷载，一般采用临时钢立柱及其下的立柱桩。立柱桩的布置应尽量利用主体工程的工程桩，当不能利用工程桩时需设施临时立柱桩。立柱的布置需避开主体结构的梁、柱及承重墙的位置。临时立柱和立柱桩根据竖向荷载的大小选择合适的结构形式和间距。在拆除第一道临时支撑后方可割除临时立柱。

二、周边临时围护体结合坑内水平梁板体系替代支撑采用逆作法施工

周边临时围护体结合坑内水平梁板体系替代支撑总体而言采用逆作法施工，适用于面积较大、地下室为两层、挖深为十米左右的超高层建筑的深基坑工程，且采用地下连续墙围护方案相对于采用临时围护并另设地下室外墙的方案在经济上并不具有优势。以盆式开挖为例，其一般流程是：首先施工主体工程桩和立柱桩，期间可同时施工周边的临时围护体；然后周边留土、基坑中部开挖第一层土，之后进行地下首层结构的施工，并在首层水平支撑梁板与临时围护体之间设置型钢换撑；然后进行地下二层土的开挖，进而施工地下一层结构，并在地下一层水平支撑梁板与临时围护体之间设置型钢换撑，期间可根据工程工期的需要同时施工地上一层结构；开挖基坑中部土体至坑底并浇筑基坑中部的底板；开挖基坑周边的留土并浇筑周边底板，期间可同时施工地上的二层结构；最后施工地下室周边的外墙，并填实地下室外墙与临时围护体之间的空隙，同时完成地下室范围内的外包混凝土施工，至此即完成了地下室工程的施工。图 18-8 为周边临时围护体结合坑内水平梁板体系替代支撑的基坑在开挖到坑底和地下室施工完成时的情形。

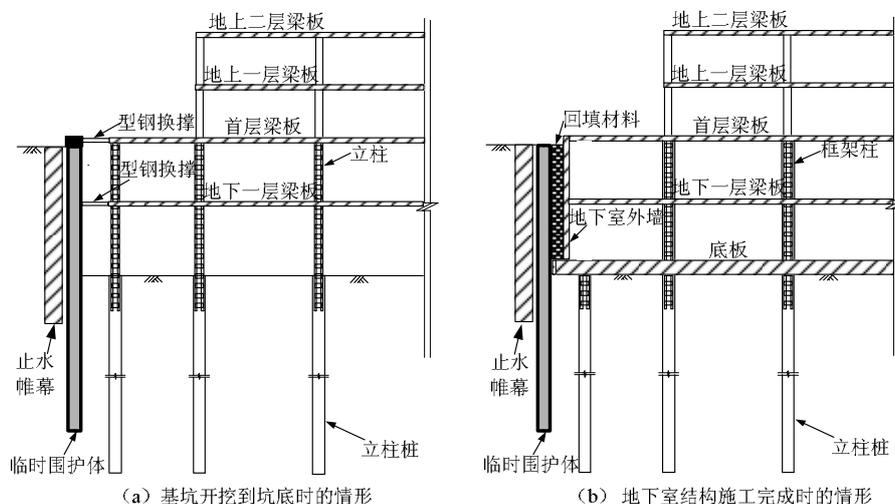


图 18-8 周边临时围护体结合坑内水平梁板体系替代支撑的基坑在开挖到坑底和地下室施工完成时的情况

周边临时围护体结合坑内水平梁板体系替代支撑的结构体系包括临时围护体、水平梁板支撑和竖向支承系统。临时围护体可以采用钢筋混凝土钻孔灌注桩、SMW 工法和钻孔咬合桩等方式。作为周边的临时围护结构，需满足变形、强度和良好的止水性能要求。具体采用何种临时围护体，需根据基坑的开挖深度、基坑的形状、施工条件、周边环境变形控制要求等多个因素确定。

该类型的水平支撑与主体地下结构的水平梁板相结合。由于采用了临时围护体，需考虑主体水平梁板结构与临时围护体之间的传力问题。需指出的是，围护桩与内部水平梁板结构

之间设置的临时支撑主要作为传递水平力的用途，因此，在支撑设计中，在确保水平力传递可靠性的基础上，弱化水平支撑与结构的竖向连接刚度，可缓解由于围护桩与立柱桩之间差异沉降过大，引发的边跨结构次应力、严重还将导致结构开裂等不利后果。

该类型的竖向支承系统与主体结构相结合。立柱和立柱桩的位置和数量根据地下室的结构布置和制定的施工方案经计算确定。由于边跨结构需从结构外墙朝内退一定距离，该距离的控制可根据具体情况调整，但尽量退至于结构外墙相邻柱跨，以便利用一柱一桩作为边跨结构的竖向支承结构；当局部位置需内退距离过大时，可选择增设边跨临时立柱的处理方案。

三、支护结构与主体结构全面相结合采用做法施工

支护结构与主体结构全面相结合，即围护结构采用“两墙合一”的地下连续墙，既作为基坑的围护结构又作为地下室的外墙；地下结构的水平梁板体系替代水平支撑；结构的立柱和立柱桩作为竖向支承系统。支护结构与主体结构全面相结合的总体设计方案一般采用逆作法施工，以盆式开挖为例，其一般流程为：首先施工地下连续墙、立柱和工程桩；然后周边留土、基坑中部开挖第一层土；之后进行地下首层结构的施工；开挖第二层土，并施工地下一层结构的梁板，同时可根据工期上的安排接高柱子和墙板施工地上一层结构；开挖第三层土，并施工地下二层结构，同时施工地上二层结构；基坑中部开挖到底并浇筑底板，基坑周边开挖到底并施工底板，同时施工地上三层结构；施工立柱的外包混凝土及其它地下结构，完成地下结构的施工。图 18-9 为支护结构与主体结构全面相结合的基坑在开挖到坑底和地下室施工完成时的情形。

支护结构与主体结构全面相结合适合于大面积的基坑工程、开挖深度大的基坑工程、复杂形状的基坑工程、上部结构施工工期要求紧迫的基坑工程，尤其是周边建筑物和地下管线较多、环境保护极其严格的基坑工程。

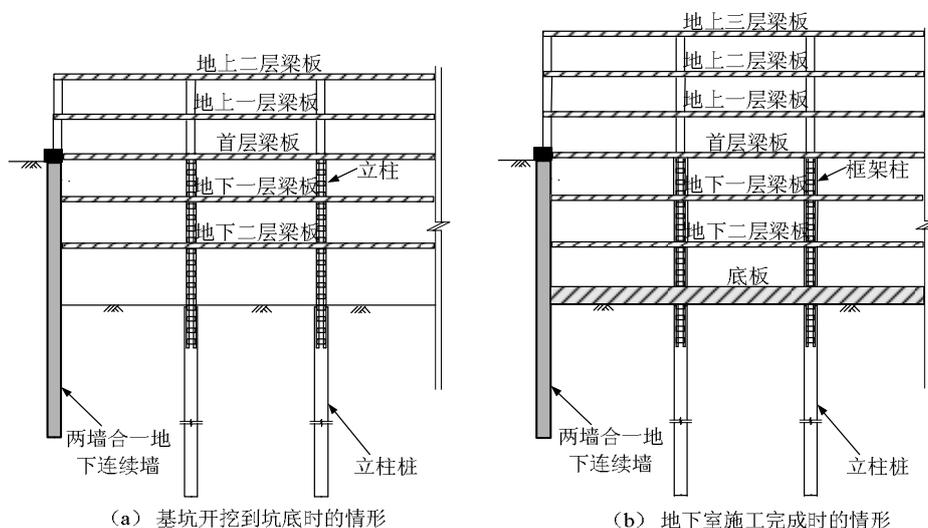


图 18-9 支护结构与主体结构全面相结合的基坑在开挖到坑底和地下室施工完成时的情形

18.3 支护结构与主体结构相结构的施工

支护结构与主体结构相结合的施工方式常用的主要有两种，一种是将主体工程的外围竖向结构与支护结构相结合，施工时与通常主体地下结构施工的顺序相同，即完成主体地下结构底板后，再对主体工程的地下结构由下而上施工。另一种是将主体工程的水平和竖向结构既作为基坑施工期间的支护结构，又作为主体工程的永久结构，且采用逆作法施工，即先施工围护结构、防渗结构、竖向支承立柱及基坑降水，达到设计要求后，再自地面向下分层开

挖,对主体地下结构分层施工,直至主体地下结构底板。本节主要介绍支护结构与主体结构相结合的基坑施工过程中的相关施工技术。

18.3.1 “两墙合一”地下连续墙施工

地下连续墙作为基坑的临时围护体系在我国已经有了近五十年的历史,施工工艺已经较为成熟,但地下连续墙作为基坑施工阶段主要承受水平向荷载为主的围护结构,当其同时要作为承受竖向荷载的永久主体竖向结构时,“两墙合一”地下连续墙相比临时围护地下连续墙的施工,在垂直度控制、平整度控制、墙底注浆及接头防渗等几个方面有更高的要求,其中垂直度控制、平整度控制、接头防渗等几个方面比临时围护地下连续墙要求更高,而墙底注浆则是“两墙合一”地下连续墙控制竖向沉降和提高竖向承载力的关键措施。

1. 垂直度控制

临时围护地下连续墙垂直度一般要求控制在 1/150,而“两墙合一”地下连续墙由于其在基坑工程完成后作为主体工程的一部分而承受永久荷载的作用,成槽垂直度的好坏,不仅关系到钢筋笼吊装,预埋装置安装及整个地下连续墙工程的质量,更关系到“两墙合一”地下连续墙的受力性能,因此成槽垂直度要求比普通临时围护地下连续墙要求更高。一般作为“两墙合一”的地下连续墙垂直度需达到 1/300,而超深地下连续墙对成槽垂直度要求达到 1/600,因此施工中需采取相应的措施来保证超深地下连续墙的垂直度。

根据施工经验,作为“两墙合一”的地下连续墙,在制作时宜适当外放 10cm~15cm,以保证将来地下连续墙开挖后内衬的厚度。导墙在地下连续墙转角处需外突 200mm 或 500mm,以保证成槽机抓斗能够起抓。

地下连续墙垂直度控制除了与成槽机械有关外,还与成槽人员的意识、成槽工艺及施工组织设计、垂直度监测及纠偏等几方面有关。“两墙合一”地下连续墙成槽前,应加强对成槽机械操作人员的技术交底并提高相关人员的质量意识。成槽所采用的成槽机和铣槽机均需具有自动纠偏装置,以便在成槽过程中根据监测偏斜情况,进行自动调整。根据各个槽段的宽度尺寸,决定挖槽的抓数和次序,当槽段三抓成槽时,采用先两侧后中间的方法,抓斗入槽、出槽应慢速、稳定,并根据成槽机的仪表及实测的垂直度情况及时进行纠偏,以满足成槽精度要求。成槽必须在现场质检员的监督下,由机组负责人指挥,严格按照设计槽孔偏差控制斗体和液压铣铣头下放位置,将斗体和液压铣铣头中心线对正槽孔中心线,缓慢下放斗体和液压铣铣头进行施工。单元槽段成槽挖土过程中,抓斗中心应每次对准放在导墙上的孔位标志物,保证挖土位置准确。抓斗闭斗下放,开挖时再张开,每斗进尺深度控制在 0.3m 左右,上、下抓斗时要缓慢进行,避免形成涡流冲刷槽壁,引起坍方,同时在槽孔混凝土未灌注之前严禁重型机械在槽孔附近行走。成槽过程须随时注意槽壁垂直度情况,每一抓到底后,用超声波测井仪监测成槽情况,发现倾斜指针超出规定范围,应立即启动纠偏系统调整垂直度,确保垂直精度达到规定的要求。

2. 平整度控制

“两墙合一”地下连续墙对墙面的平整度要求也比常规地下连续墙要高,现浇地下连续墙的墙面通常较粗糙,若施工不当可能出现槽壁坍塌或相邻墙段不能对齐等问题。一般说来,越难开挖的地层,连续墙的施工精度越低,墙面平整度也越差。

对“两墙合一”地下连续墙墙面平整度影响的首要因素是泥浆护壁效果,因此可根据实际试成槽的施工情况,调节泥浆比重,一般控制在 1.18 左右,并对每一批新制的泥浆进行主要性能测试。另外可根据现场场地实际情况,采用以下辅助措施:

(1) 暗浜加固。对于暗浜区,可采用水泥搅拌桩将地下连续墙两侧的土体进行加固,以保证在该地层范围内的槽壁稳定性。可采用直径 700mm 的双轴水泥土搅拌桩进行加固,搅拌桩之间搭接长度为 200mm。水泥掺量控制在 8%,水灰比 0.5~0.6。

(2) 施工道路侧水泥土搅拌桩加固。为保证施工时基坑边的道路稳定，在道路施工前对道路下部分土体进行加固，在地下连续墙施工时也可起到隔水和土体加固作用。

(3) 控制成槽、铣槽速度。成槽机掘进速度应控制在 15m/h 左右，液压抓斗不宜快速掘进，以防槽壁失稳。同样，也应控制铣槽机进尺速度，特别是在软硬层交接处，以防止出现偏移、被卡等现象。

(4) 其它措施。施工过程中大型机械不得在槽段边缘频繁走动、泥浆应随着出土及时补入，保证泥浆液面在规定高度上，以防槽壁失稳。

3. 地下连续墙墙底注浆

地下连续墙两墙合一工程中，地下连续墙和主体结构变形协调至关重要。一般情况下主体结构工程桩较深，而地下连续墙作为围护结构其深度较浅，与主体工程桩一般处于不同的持力层；另一方面地下连续墙分布于地下室的周边，工作状态下与桩基的上部荷重的分担不均；而且由于施工工艺的因素，地下连续墙成槽时采用泥浆护壁，地下连续墙槽段为矩形断面，其长度较大，槽底清淤难度较钻孔灌注桩大，沉淤厚度一般较钻孔灌注桩要大，这使得墙底和桩端受力状态存在较大差异。由于以上因素，主体结构沉降过程中地下连续墙和主体结构桩基之间可能会产生差异沉降，尤其地下连续墙作为竖向承重墙体考虑时，地下连续墙与桩基之间可能会产生较大的差异沉降，如果不采取针对性的措施控制差异沉降，地下连续墙与主体结构之间会产生次应力，严重时会导致结构开裂，危及结构的正常使用。为了减少地下连续墙在受荷过程中产生过大的沉降和不均匀沉降，必须采取墙底注浆措施。墙底注浆加固采用在地下连续墙钢筋笼上预埋注浆钢管，在地下连续墙施工完成后直接压注施工。

1) 注浆管的埋设

注浆管常用的有 $\phi 48\text{mm}$ 钢管和内径 25mm 钢管，每幅钢筋笼上埋设 2 根，间距不大于 3m。注浆管长度视钢筋笼长度而定，一般底部插入槽底土内 300mm~500mm，注浆管口用堵头封口，注浆管随钢筋笼一起放入槽段内。

注浆管加工时，留最后一段管节后加工。先加工的管段与钢筋笼底部平齐，成槽结束以后，实测槽段的深度，计算最后一节管段的长度，并据之加工最后一节管段，使注浆管底部埋入槽底，确保后道工序的注浆质量。注浆管固定于钢筋笼时，必须用电焊焊接牢或用 20# 铅丝绑扎固定，防止钢筋笼吊放、入槽时滑落。注浆管固定焊接时不能把管壁焊破，下槽之前应逐段进行检查，发现有破漏及时修补。地下连续墙地下连续墙浇筑之前，应做好注浆管顶部封口工作，并做好保护措施。

注浆器采用单向阀式注浆器，注浆管应均匀布置，注浆器制成花杆形式（如图 18-10 所示），该部分可用封箱带或黑包布包住。



图 18-10 注浆器照片

2) 注浆工艺流程

地下连续墙的混凝土达到一定强度后进行注浆。注浆有效扩散半径为 0.75m，注浆速度应均匀。注浆时应根据有关规定设置专用计量装置。图 18-11 为注浆工艺流程。

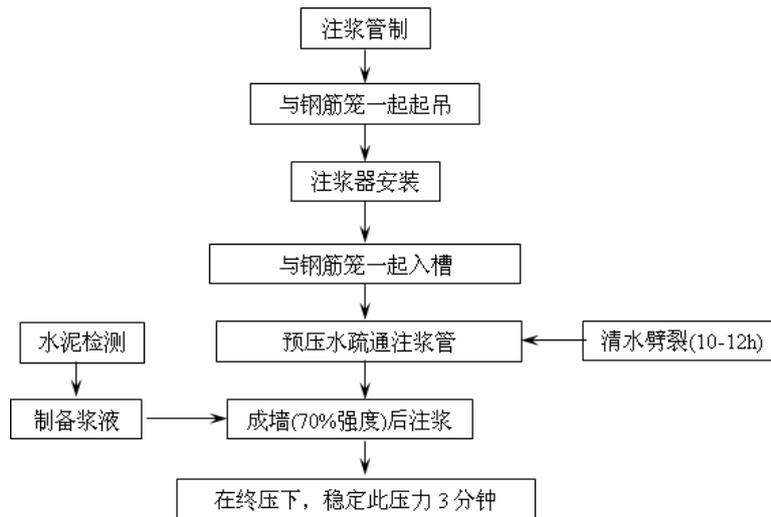


图 18-11 连续墙墙底注浆工艺流程

3) 注浆施工机具选用

注浆施工机具大体可分为地面注浆装置和地下注浆装置两大部分。地面注浆装置由注浆泵、浆液搅拌机、储浆桶、地面管路系统及观测仪表等组成；地下注浆装置由注浆管和墙底注浆装置组成。压浆管采用内径为 1 吋的黑铁管，螺纹连接，注浆器部位用生胶带缠绕，并做注水试验，严防漏水。浆液搅拌机及储浆桶可根据施工条件选配，搅拌机要求低转速大扭矩，故须选用适当的减速器，搅拌叶片要求全断面均匀拌浆，并应分层配置，搅拌机制浆能力和储浆桶容量应与额定注浆流量相匹配，且搅拌机出浆口应设置滤网。地面管路系统必须保证密封性。输送管必须采用能承受 2 倍以上最大注浆压力的高压管。注浆机械采用高压注浆泵，其型号可采用 SGD6-10 型。

4) 注浆施工要点

(1) 注浆时间：在 4~5 幅地下连续墙连成一体后，当地下连续墙混凝土强度大于 70% 的设计强度时即可对地下连续墙进行墙底注浆，并应先对中间幅进行注浆。

(2) 注浆压力：注浆压力必须大于注浆深度处的土层压力，正常情况下一般控制在 0.4~0.6MPa，终止压力可控制在 2MPa 左右。

(3) 注浆流量：15~20L/分钟。

(4) 注浆量：水泥单管用量为 2000kg。

(5) 注浆材料采用 P42.5 普通硅酸盐水泥，水灰比 0.5~0.6。

(6) 拌制注浆浆液时，必须严格按配合比控制材料掺入量；应严格控制浆液搅拌时间，浆液搅拌应均匀。

(7) 压浆管与钢筋笼同时下入，压浆器焊接在压浆管上，同时必须超出钢筋笼底端 0.5m。

(8) 根据经验，应在地下连续墙的混凝土达到初凝的时间内（控制在 6~8 小时）进行清水劈裂，以确保预埋管的畅通。

(9) 墙底注浆终止标准：实行注浆量与注浆压力双控的原则，以注浆量（水泥用量）控制为主，注浆压力控制为辅。当注浆量达到设计要求时，可终止注浆；当注浆压力 $\geq 2\text{MPa}$ 并稳压 3 分钟，且注浆量达到设计注浆量的 80% 时，亦可终止压浆。

(10) 为防止地下连续墙墙体产生隆起变形，注浆时应对地下连续墙及其周边环境进行沉降观察。

4. 接头防渗技术

“两墙合一”地下连续墙既作为基坑施工阶段的挡土挡水结构，也作为结构地下室外墙起着永久的挡土挡水作用，因此其防水防渗要求极高。地下连续墙单元槽段依靠接头连接，这种接头通常要同时满足受力和防渗要求，但通常地下连续墙接头的位置是防渗的薄弱环节。对“两墙合一”地下连续墙接头防渗通常可采用以下措施：

(1) 由于地下连续墙是泥浆护壁成槽，接头混凝土面上必然附着有一定厚度的泥皮（与泥浆指标、制浆材料有关），如不清除，浇筑混凝土时在槽段接头面上就会形成一层夹泥带，基坑开挖后，在水压作用下可能从这些地方渗漏水及冒砂。为了减少这种隐患，保证连续墙的质量，施工中必须采取有效的措施清刷混凝土壁面。

(2) 采用合理的接头形式。地下连续墙接头形式按使用接头工具的不同可分为接头管（锁口管）、接头箱、隔板、工字钢、十字钢板以及改进接头-凹凸型预制钢筋混凝土楔形接头桩等几种常用型式。根据其受力性能可分为刚性接头和柔性接头。“两墙合一”地下连续墙采用的接头形式在满足结构受力性能的前提下，应优先选用防水性能更好的刚性接头。

(3) 在接头处设置扶壁柱。通过在地下连续墙连续墙接头处设置扶壁柱来加大地下连续墙外水流的渗流途径，折点多、抗渗性能好。

(4) 在接头处采用旋喷桩加固。地下连续墙施工结束后，在基坑开挖前对槽段接头缝进行三重管旋喷桩加固。旋喷桩孔位的确定通常以接缝桩中心为对称轴，距连续墙边缘不宜超过 1m，钻孔深度宜达基坑开挖面以下 1m。

18.3.2 “一柱一桩”施工

支护结构的竖向支承系统与主体结构的桩、柱相结合，竖向支承系统一般采用钢立柱插入底板以下的立柱桩的型式。钢立柱通常为角钢格构柱、钢管混凝土柱或 H 型钢柱，立柱桩可以采用钻孔灌注桩或钢管桩等形式。对于逆作法的工程，在施工时中间支承柱承受上部结构自重和施工荷载等竖向荷载，而在施工结束后，中间支承柱一般外包混凝土后作为正式地下室结构柱的一部分，永久承受上部荷载。因此中间支承柱的定位和垂直度必须严格满足要求。一般规定，中间支承柱轴线偏差控制在 $\pm 10\text{mm}$ 内，标高控制在 $\pm 10\text{mm}$ 内，垂直度控制在 $1/300 \sim 1/600$ 以内。此外，一柱一桩在逆作施工时承受的竖向荷载较大，需通过桩端后注浆来提高一柱一桩的承载力并减少沉降。

1. 一柱一桩调垂施工

工程桩施工时，应特别注意提高精度。立柱桩根据不同的种类，需要采用专门的定位措施或定位器械，钻孔灌注桩必要时应当适当扩大桩孔。钢立柱的施工必须采用专门的定位调垂设备对其进行定位和调垂。目前，钢立柱的调垂方法基本分为气囊法、机械调垂架法和导向套筒法三类。

(1) 气囊法

角钢格构柱一般可采用气囊法进行纠正，在格构柱上端 X 和 Y 方向上分别安装一个传感器，并在下端四边外侧各安放一个气囊，气囊随格构柱一起下放到地面以下，并固定于受力较好的土层中。每个气囊通过进气管与电脑控制室相连，传感器的终端同样与电脑相连，形成监测和调垂全过程的智能化施工监控体系。系统运行时，首先由垂直传感器将格构柱的偏斜信息输送给电脑，由电脑程序进行分析，然后打开倾斜方向的气囊进行充气并推动格构柱下部向其垂直方向运动，当格构柱进入规定的垂直度范围后，即指令关闭气阀停止充气，同时停止推动格构柱。格构柱两个方向上的垂直度调整可同时进行控制。待混凝土浇灌至离气囊下方 1m 左右时，即可拆除气囊，并继续浇灌混凝土至设计标高。图 18-12 为气囊法平面布置图，图 18-13 为气囊法施工实例图。

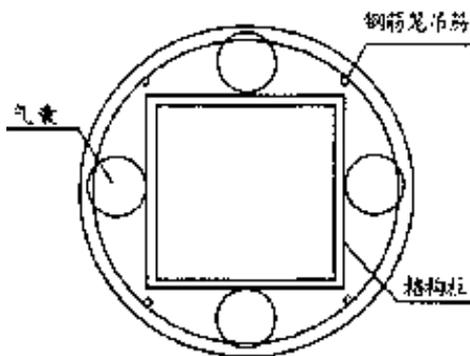


图 18-12 气囊平面布置图



图 18-13 气囊施工实例图

在工程实践中，成孔总是往一个方向偏斜的，因此只要在偏斜的方向上放置 2 个气囊即可进行充气推动，同样能达到纠偏的目的，这样当格构柱校直并被混凝土固定后其格构柱与孔壁之间的空隙反而增大，因此气囊回收就较容易。实践证明，用此法不但减少了气囊的使用数量，而且回收率也普遍提高了。图 18-14 为改良后气囊平面布置图。

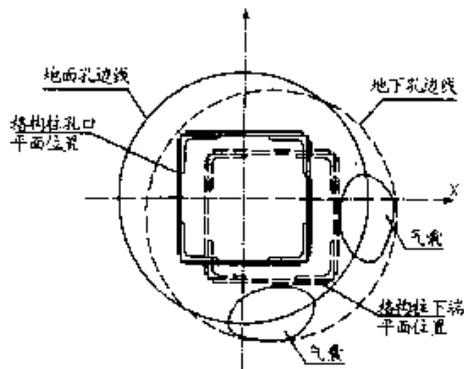


图 18-14 改良后的气囊平面布置图

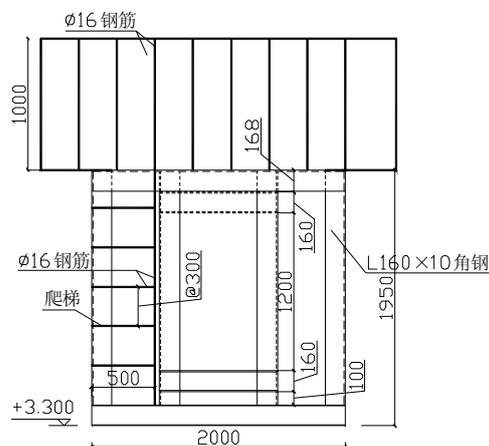


图 18-15 钢管立柱定位器

(2) 机械调垂法

机械调垂系统主要由传感器、纠正架、调节螺栓等组成。在支承柱上端 X 和 Y 方向上分别安装一个传感器，支承柱固定在纠正架上，支承柱上设置 2 组调节螺栓，每组共四个，两两对称，两组调节螺栓有一定的高差，以便形成扭矩。测斜传感器和上下调节螺栓在东西、南北方向各设置一组。若支承柱下端向 X 正方向偏移，X 方向的两个上调节螺栓一松一紧，使支承柱绕下调节螺栓旋转，当支承柱进入规定的垂直度范围后，即停止调节螺栓；同理 Y 方向通过 Y 方向的调节螺栓进行调节。图 18-15 为钢管立柱定位器示意图，图 18-16 为钢管纠正架图，图 18-17 为“一柱一桩”纠正架图。

(3) 导向套筒法

导向套筒法是把校正支承柱转化为导向套筒。导向套筒的调垂可采用气囊法和机械调垂法。待导向套筒调垂结束并固定后，从导向套筒中间插入支承柱，导向套筒内设置滑轮以利于支承柱的插入，然后浇筑立柱桩混凝土，直至混凝土能固定支承柱后拔出导向套筒。

(4) 三种方法的适用性和局限性

气囊法适用于各种类型支承柱（宽翼缘 H 型钢、钢管、格构柱等）的调垂，且调垂效果好，有利于控制支承柱的垂直度。但气囊有一定的行程，若支承柱与孔壁间距离过大，支承柱就无法调垂至设计要求，因此成孔时孔垂直度控制在 1/200 内，支承柱的垂直度才能达

到 1/300 的要求。由于采用帆布气囊，实际使用中常被钩破而无法使用，气囊亦经常被埋入混凝土中而难以回收。



图 18-16 钢管纠正架图



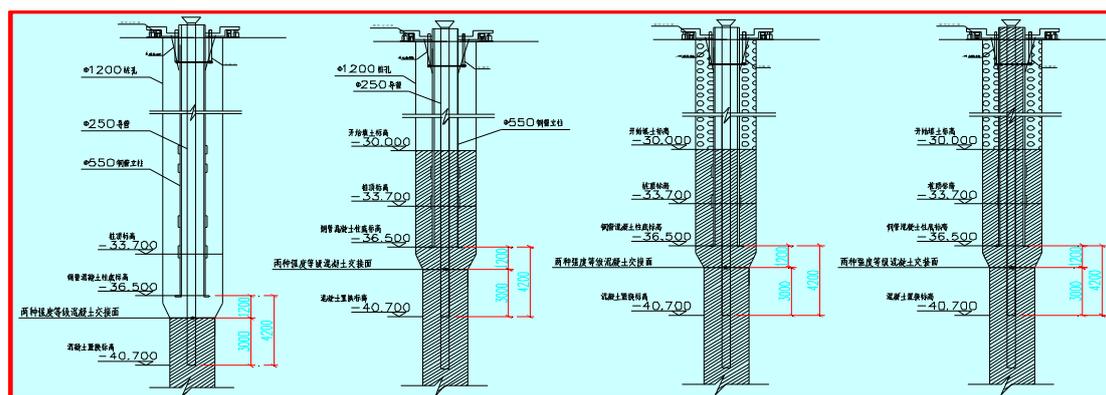
图 18-17 “一柱一桩”纠正架图

机械调垂法是几种调垂方法中最经济实用的，但只能用于刚度较大的支承柱（钢管支承柱等）的调垂，若支承柱刚度较小（如格构柱等），在上部施加扭矩时支承柱的弯曲变形将过大，不利于支承柱的调垂。

导向套筒法由于套筒比支承柱短故调垂较易，调垂效果较好，但由于导向套筒在支承柱外，势必使孔径变大。导向套筒法适用于各种支承柱的调垂，包括宽翼缘 H 型钢、钢管、格构柱等。

2. 采用钢管混凝土柱时一柱一桩不同标号混凝土施工

竖向支承采用钢管立柱时，一般钢管内混凝土标号高于工程桩的混凝土，此时在一柱一桩混凝土施工时应严格控制不同标号的混凝土施工界面，确保混凝土浇捣施工。水下混凝土浇灌至钢管底标高时，即更换高标号混凝土，在高标号混凝土浇注的同时，在钢管立柱外侧回填碎石、黄砂等，阻止管外混凝土上升。图 18-17 为不同标号混凝土浇注示意图。



(a) 高标号混凝土置换开始 (b) 高标号混凝土置换至回填 (c) 碎石回填 (d) 高标号混凝土浇注至顶

图 18-18 不同标号混凝土浇注示意图

3. 桩端后注浆施工

桩端后注浆施工技术是近年来发展起来的一种新型的施工技术，通过桩端后注浆施工，可大大提高一柱一桩的承载力，有效解决一柱一桩的沉降问题，为逆作法施工提供有效的保障。由于注浆量、控制压力等技术参数对桩端后注浆承载力影响的机理尚不明确，承载力理

论计算还不完善，因此在正式施工前必须通过现场试成桩来确保成桩工艺的可靠性，并通过现场承载力试验来掌握桩端后注浆灌注桩的实际承载力。

桩端后注浆钻孔灌注桩施工工艺流程如图 18-19 所示。

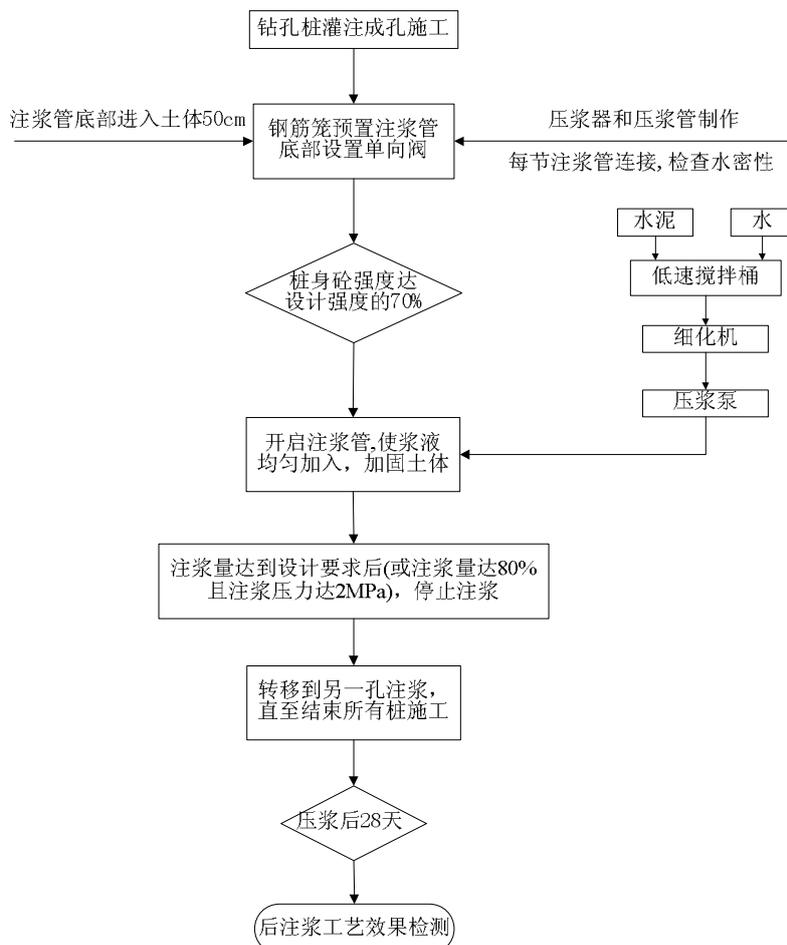


图 18-19 桩端后注浆钻孔灌注桩施工工艺流程图

成桩过程中，在桩侧预设注浆管，待钻孔桩桩身混凝土浇注完后，采用高压注浆泵，通过注浆管路向桩及桩侧注入水泥浆液，使桩底桩侧土强度能得到一定程度的提高。桩端后注浆施工将设计浆液一次性完全注入孔底，即可终止注浆。遇设计浆液不能完全注入，在注浆量达 80%以上，且泵压值达到 2MPa 时亦可视为注浆合格，可以终止注浆。

桩端注浆装置是整个桩端压力注浆施工工艺的核心部件，设有单向阀，注浆时，浆液由桩身注浆导管经单向阀直接注入土层。注浆器有如下要求：

- (1) 注浆孔设置必须有利于浆液的流出，注浆器总出浆孔面积大于注浆器内孔截面积；
- (2) 注浆器须为单向阀式，以保证下入时及下入后混凝土灌注过程中浆液不进入管内以及注入后地层中水泥浆液不得回流；
- (3) 注浆器上必须设置注浆孔保护装置；
- (4) 注浆器与注浆管的连接必须牢固、密封、连接简便；
- (5) 注浆器的构造必须利于进入较硬的桩端持力层。

图 18-20 和图 18-21 为两种注浆器的构造示意图。

后注浆施工中如果预置的注浆管全部不通，从而导致设计的浆液不能注入的情况，或管路虽通但注入的浆液达不到设计注浆量的 80%且同时注浆压力达不到终止压力，则视注浆为失败。在注浆失败时可采取如下补救措施：在注浆失败的桩侧采用地质钻机对称地钻取两

直径为 90mm 左右的小孔，深度越过桩端 500mm 为宜，然后在所成孔中重新下放两套注浆管并在距桩底端 2m 处用托盘封堵，并用水泥浆液封孔，待封孔 5 天后即进行重新注浆，补入设计浆量即完成施工。

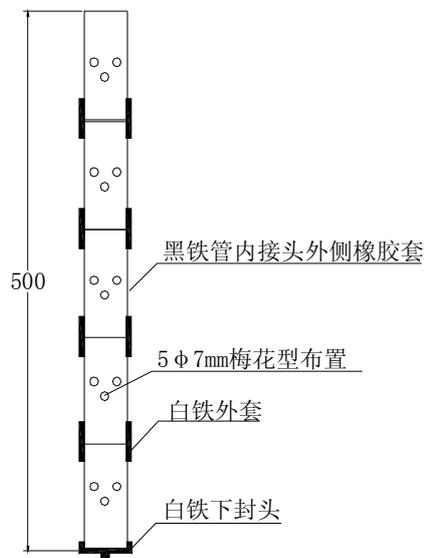


图 18-20 注浆器形式之一

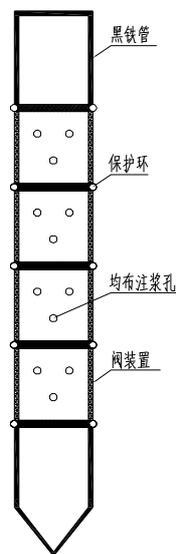


图 18-21 注浆器形式之二

18.3.3 逆作结构施工

1. 逆作水平结构施工技术

由于逆作法施工，其地下室的结构节点形式与常规施工法就有着较大的区别。根据逆作法的施工特点，地下室结构不论是哪种结构型式都是由上往下分层浇筑的。地下室结构的浇筑方法有三种：

(1) 利用土模浇筑梁板

对于首层结构梁板及地下各层梁板，开挖至其设计标高后，将土面整平夯实，浇筑一层厚约 50mm 的素混凝土（如果土质好则抹一层砂浆亦可），然后刷一层隔离层，即成楼板的模板。对于梁模板，如土质好可用土胎模，按梁断面挖出沟槽即可；如土质较差，可用模板搭设梁模板。图 18-22 为逆作施工时土模的示意图。

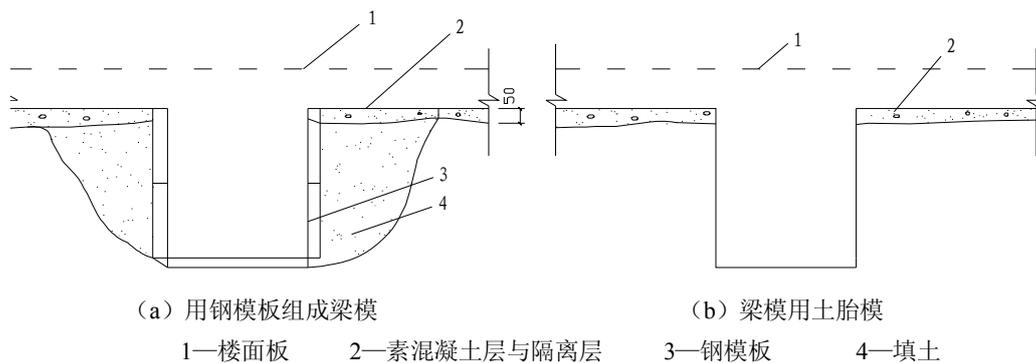


图 18-22 逆作施工时的梁、板模板

至于柱头模板，施工时先把柱头处的土挖出至梁底以下 500mm 处，设置柱子的施工缝模板，为使下部柱子易于浇筑，该模板宜呈斜面安装，柱子钢筋通穿模板向下伸出接头长度，在施工缝模板上面组立柱头模板与梁板连接。如土质好柱头可用土胎模，否则就用模板搭设。柱头下部的柱子在挖出后再搭设模板进行浇筑，如图 18-23 所示。

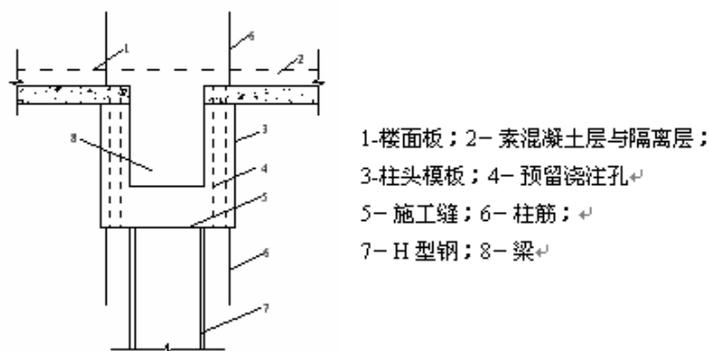


图 18-23 柱头模板与施工缝

柱子施工缝处的浇筑方法，常用的方法有三种，即直接法、充填法和注浆法，如图 18-24 所示。直接法即在施工缝下部继续浇筑混凝土时，仍然浇筑相同的混凝土，有时添加一些铝粉以减少收缩。为浇筑密实可做出一个假牛腿，混凝土硬化后可凿去。充填法即在施工缝处留出充填接缝，待混凝土面处理后，再于接缝处充填膨胀混凝土或无浮浆混凝土。注浆法即在施工缝处留出缝隙，待后浇混凝土硬化后用压力压入水泥浆充填。在上述三种方法中，直接法施工最简单，成本亦最低。施工时可对接缝处混凝土进行二次振捣，以进一步排除混凝土中的气泡，确保混凝土密实和减少收缩。

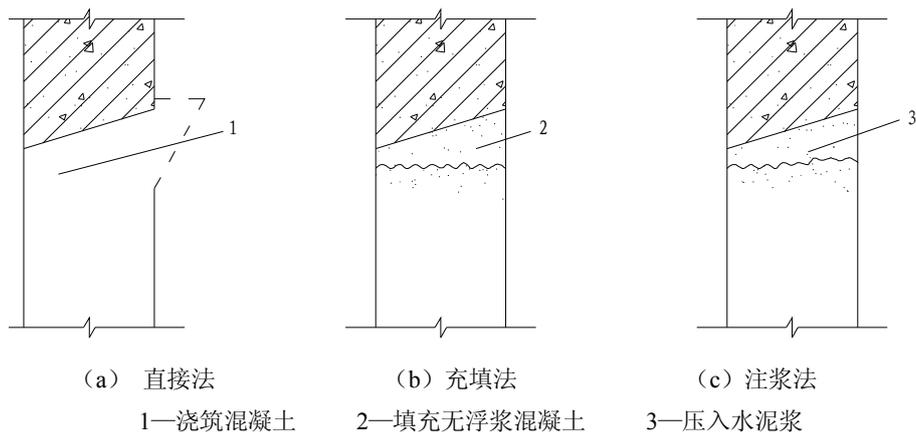


图 18-24 柱子施工缝处混凝土的浇筑方法

(2) 利用支模方式浇筑梁板

用此法施工时，先挖去地下结构一层高的土层，然后按常规方法搭设梁板模板，浇筑梁板混凝土，再向下延伸竖向结构（柱或墙板）。为此，需解决两个问题，一个是设法减少梁板支承的沉降和结构的变形；另一个是解决竖向构件的上、下连接和混凝土浇筑。

为了减少楼板支承的沉降和结构变形，施工时需对土层采取措施进行临时加固。加固的方法有两种：一种方法是浇筑一层素混凝土，以提高土层的承载能力和减少沉降，待墙、梁浇筑完毕，开挖下层土方时随土一同挖除，这就要额外耗费一些混凝土；另一种方法是铺设砂垫层，上铺枕木以扩大支承面积，这样上层柱子或墙板的钢筋可插入砂垫层，以便与下层后浇筑结构的钢筋连接。

有时还可利用吊模板的措施来解决模板的支承问题。在这种方法中，梁、平台板采用木模，排架采用 $\Phi 48$ 钢管。柱、剪力墙、楼梯模板亦可采用木模。由于采用盆式开挖，因此使得模板排架可以周转循环使用。在盆式开挖区域，各层水平楼板施工时，排架立杆在挖土盆顶和盆底均采用一根通长钢管。挖土边坡为台阶式，即排架立杆搭设在台阶上，台阶宽度大于

1000mm，上下级台阶高差 300mm 左右。台阶上的立杆为两根钢管搭接，搭接长度不小于 1000mm。排架沿每 1500mm 高度设置一道水平牵杠，离地 200mm 设置扫地杆（挖土盆顶部只考虑水平牵杠，高度根据盆顶与结构底标高的净空距离而定）。排架每隔四排立杆设置一道纵向剪刀撑，由底至顶连续设置。排架模板支承如图 18-25 所示。

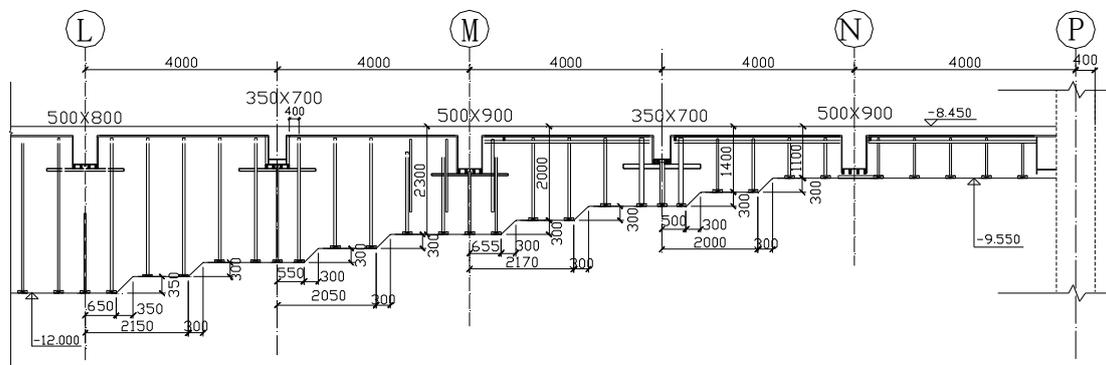


图 18-25 排架模板支承示意图

水平构件施工时，竖向构件采用在板面和板底预留插筋，在竖向构件施工时进行连接。至于逆作法施工时混凝土的浇筑方法，由于混凝土是从顶部的侧面入仓，为便于浇筑和保证连接处的密实性，除对竖向钢筋间距适当调整外，构件顶部的模板需做成喇叭形。

由于上、下层构件的结合面在上层构件的底部，再加上地面上沉降和刚浇筑混凝土的收缩，在结合面处易出现缝隙。为此，宜在结合面处的模板上预留若干注浆孔，以使用压力灌浆消除缝隙，保证构件连接处的密实性。

(3) 无排吊模施工方法

采用无排吊模施工工艺时，挖土深度基本同土模施工。对于地面梁板或地下各层梁板，挖至其设计标高后，将土面整平夯实，浇筑一层厚约 50mm 的素混凝土（若土质好抹一层砂浆亦可），然后在垫层上铺设模板，模板预留吊筋，在下一层土方开挖时用于固定模板。

图 18-26 和图 18-27 分别为无排吊模施工示意图和实景图。

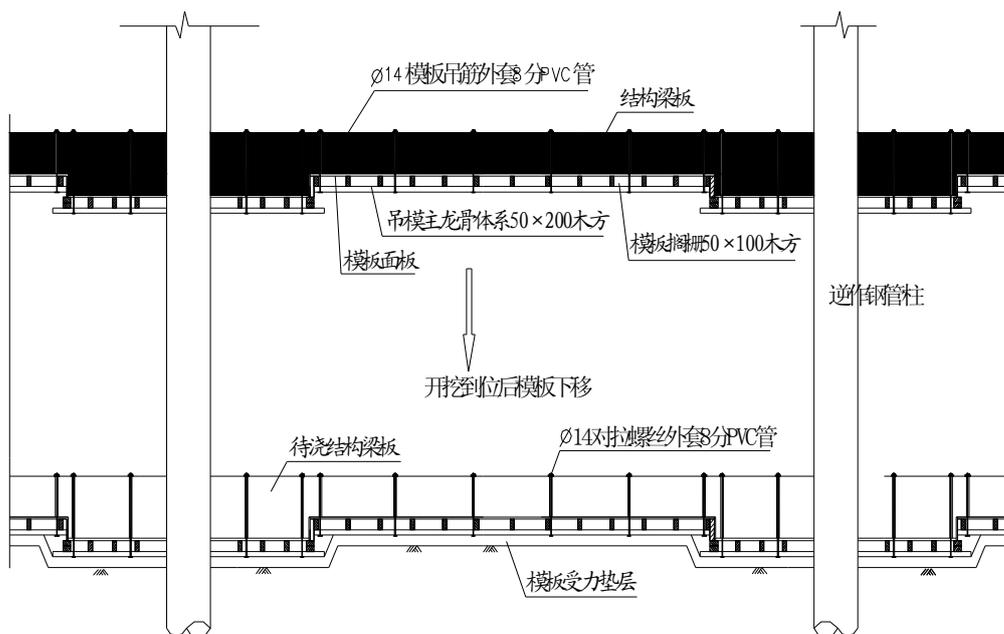


图 18-26 无排吊模施工示意图



图 18-27 无排吊模施工实景图

2) 逆作竖向结构施工

(1) 中间支承柱及剪力墙施工

结构柱和板墙的主筋与水平构件中预留插筋进行连接，板面钢筋接头采用电渣压力焊连接，板底钢筋采用电焊连接。

“一柱一桩”格构柱混凝土逆作施工时，分两次支模，第一次支模高度为柱高减去预留柱帽的高度，主要为方便格构柱振捣混凝土，第二次支模到顶，顶部形成柱帽的形式。应根据图纸要求弹出模板的控制线，施工人员严格按照控制线来进行格构柱模板的安装。模板使用前，涂刷脱模剂，以提高模板的使用寿命，同时也易保证拆模时不损坏混凝土表面。图 18-28 为逆作立柱模板支撑示意图，图 18-29 为逆作立柱模板支撑实景图。

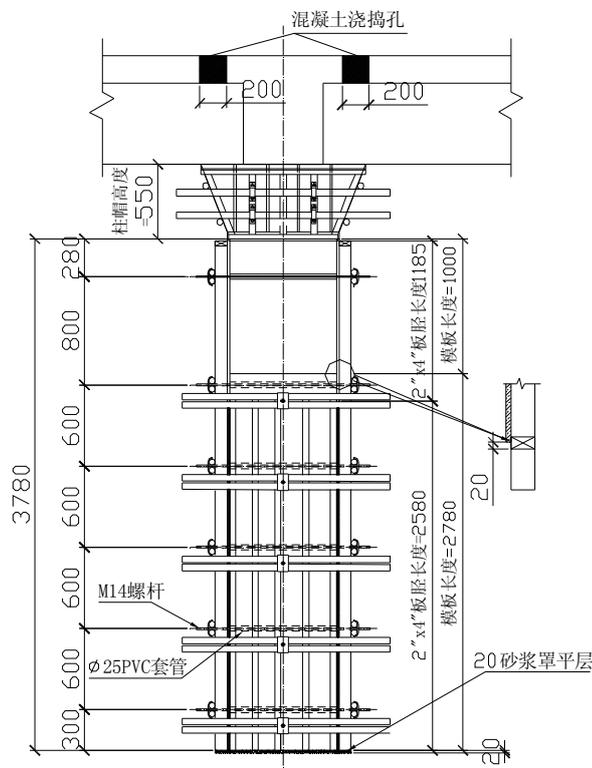


图 2-29 逆作立柱模板支撑示意图

当剪力墙也采用逆作法施工时，施工方法与格构柱相似，顶部也形成开口形的类似柱帽的形式。图 18-30 为剪力墙逆作施工完成后的实景图。



图 18-29 逆作立柱模板支撑实景图



图 18-30 剪力墙逆作施工完成后的实景图

(2) 内衬墙施工

逆作内衬墙的施工流程为：衬墙面分格弹线→凿出地下连续墙立筋→衬墙螺杆焊接→放线→搭设脚手排架→衬墙与地下连续墙的堵漏→衬墙外排钢筋绑扎→衬墙内侧钢筋绑扎→拉杆焊接→衬墙钢筋隐蔽验收→支衬墙模板→支板底模→绑扎板钢筋→板钢筋验收→板、衬墙和梁混凝土浇筑→混凝土养护。

施工内衬墙结构，内部结构施工时采用脚手管搭排架，模板采用九夹板，内部结构施工时要严格控制内衬墙的轴线，保证内衬墙的厚度，并要对地下连续墙墙面进行清洗凿毛处理，地下连续墙接缝有渗漏必须进行修补，验收合格后方可进行结构施工。在衬墙混凝土浇筑前应对纵横向施工缝进行凿毛和接口防水处理。

18.3.4 逆作土方开挖技术

支护结构与主体结构相结合在采用逆作法施工时，土方开挖首先要满足“两墙合一”地下连续墙以及结构楼板的变形及受力要求，其次，在确保已完成结构满足受力要求的情况下尽可能地提高挖土效率。

1. 取土口的设置

在主体工程与支护结构相结合的逆作法施工工艺中，除顶板施工阶段采用明挖法以外，其余地下结构的土方均采用暗挖法施工。逆作法施工中，为了满足结构受力以及有效传递水平力的要求，常规取土口大小一般在 150m^2 左右，布置时需满足以下几个原则：

- (1) 大小满足结构受力要求，特别是在土压力作用下必须能够有效传递水平力。
- (2) 水平间距一是要满足挖土机最多二次翻土的要求，避免多次翻土引起土体过分扰动；二是在暗挖阶段，尽量满足自然通风的要求。
- (3) 取土口数量应满足在底板抽条开挖时的出土要求；
- (4) 地下各层楼板与顶板洞口位置应相对应。

地下自然通风有效距离一般在 15m 左右，挖土机有效半径在 $7\text{m}\sim 8\text{m}$ 左右，土方需要驳运时，一般最多翻驳二次为宜。综合考虑通风和土方翻驳要求，并经过多个工程实践，对于取土口净距的设置可以量化如下指标：一是取土口的之间的净距离，可考虑在 $30\sim 35\text{m}$ ；二是取土口的大小，在满足结构受力情况下，尽可能采用大开口，目前比较成熟的大取土口的面积通常可达到 600m^2 左右。取土口布置时在考虑上述原则时，可充份利用结构原有洞

口，或主楼筒体等部位。

2. 土方开挖形式

对于土方及混凝土结构量大的情况，无论是基坑开挖还是结构施工形成支撑体系，相应工期均较长，无形中增大了基坑风险。为了有效控制基坑变形，基坑土方开挖和结构施工时可通过划分施工块并采取分块开挖与施工的方法。施工块划分的原则是：

- (1) 按照“时空效应”原理，采取“分层、分块、平衡对称、限时支撑”的施工方法；
- (2) 综合考虑基坑立体施工交叉流水的要求；
- (3) 合理设置结构施工缝。

结合上述原则，在土方开挖时，可采取以下有效措施：

(1) 合理划分各层分块的大小

由于一般情况下顶板为明挖法施工，挖土速度比较快，相对应的基坑暴露时间短，故第一层土的开挖可相应划分得大一些；地下各层的挖土是在顶板完成的情况下进行的，属于逆作暗挖，速度比较慢，为减小每块开挖的基坑暴露时间，顶板以下各层土方开挖和结构施工的分块面积可相对小些，这样可以缩短每块的挖土和结构施工时间，从而使围护结构的变形减小，地下结构分块时需考虑每个分块挖土时能够有较为方便的出土口。

(2) 采用盆式开挖方式

通常情况下，逆作区顶板施工前，先大面积开挖土方至板底下约 150mm 处，然后利用土模进行顶板结构施工。采用土模施工明挖土方量很少，大量的土方将在后期进行逆作暗挖，挖土效率将大大降低；同时由于顶板下的模板体系无法在挖土前进行拆除，大量的模板将会因为无法实现周转而造成浪费。针对大面积深基坑的首层土开挖，为兼顾基坑变形及土方开挖的效率，可采用盆式开挖的方式，周边留土，明挖中间大部分土方，一方面控制基坑变形，另一方面增加明挖工作量从而增加了出土效率。对于顶板以下各层土方的开挖，也可采用盆式开挖的方式，起到控制基坑变形的作用。

(3) 采用抽条开挖方式

逆作底板土方开挖时，一般来说底板厚度较大，支撑到挖土面的净空较大，这对控制基坑的变形不利。此时可采取中心岛施工的方式，即基坑中部底板达到一定强度后，按一定间距抽条开挖周边土方，并分块浇捣基础底板，每块底板土方开挖至混凝土浇捣完毕，必须控制在 72 小时以内。

(4) 楼板结构局部加强代替挖土栈桥

支护结构与主体结构相结合的基坑，由于顶板先于大量土方开挖施工，因此可以将栈桥的设计和水平梁板的永久结构设计结合起来，并充分利用永久结构的工程桩，对楼板局部节点进行加强，作为逆作挖土的施工栈桥，满足工程挖土施工的需要。

3. 土方开挖设备

采用逆作法施工工艺时，需在结构楼板下进行大量土方的暗挖作业，开挖时通风照明条件较差，施工作业环境较差，因此选择有效的施工作业机械对于提高挖土工效具有重要意义。目前逆作挖土施工一般在坑内采用小挖机进行作业（如图 18-31 所示），地面采用长臂挖机（如图 18-32 所示）、滑臂挖机、吊机、取土架（如图 18-33 所示）等设备进行作业。

根据各种挖机设备的施工性能，其挖土作业深度亦有所不同，一般长臂挖机作业深度为 7m~14m，滑臂挖机一般 7m~19m，吊机及取土架作业深度则可达 30 余米。

18.3.5 逆作通风照明

通风、照明和用电安全是逆作法施工措施中的重要组成部分。这些方面稍有不慎，就有可能酿成事故。可以采取预留通风口、专用防水动力照明电路等手段并辅以安全措施确保安全。



图 18-31 小型挖机在坑内暗挖作业



图 18-32 吊机在吊运土方



图 18-33 长臂挖机在进行施工作业



图 18-34 取土架在进行施工作业

在浇筑地下室各层楼板时，按挖土行进路线应预先留设通风口。随着地下挖土工作面的推进，当露出通风口后即应及时安装大功率涡流风机，并启动风机向地下施工操作面送风，清新空气由各风口流入，经地下施工操作面再从取土孔中流出，形成空气流通循环，以保证施工作业面的安全。在风机的选择时，应综合考虑如下因素：（1）风机的安装空间和传动装置；（2）输送介质、环境要求、风机串并联；（3）首次成本和运行成本；（4）风机类型和噪声；（5）风机运行的调节；（6）传动装置的可靠性；（7）风机使用年限。图 18-35 为某工程的通风设备实景。



图 18-35 通风设备实景

地下施工动力、照明线路需设置专用的防水线路，并埋设在楼板、梁、柱等结构中，专

用的防水电箱应设置在柱上，不得随意挪动。随着地下工作面的推进，自电箱至各电器设备的线路均需采用双层绝缘电线，并架空铺设在楼板底。施工完毕应及时收拢架空线，并切断电箱电源。在整个土方开挖施工过程中，各施工操作面上均需专职安全巡视员监护各类安全措施和检查落实。

通常情况下，照明线路水平向可通过在楼板中的预设管路（如图 18-36 所示），竖向利用固定在格构柱上的预设管，照明灯具应置于预先制作的标准灯架上（如图 18-37 所示），灯架固定在格构柱或结构楼板上。

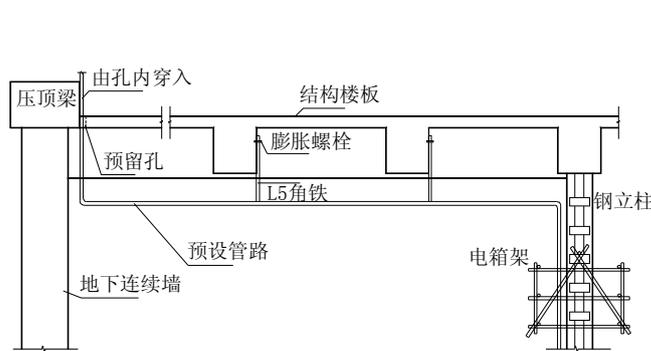


图 2-36 照明线路布设示意图

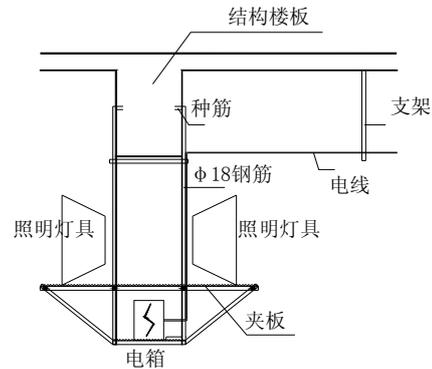


图 18-37 标准灯架搭设示意图

为了防止突发停电事故，在各层板的应急通道上应设置一路应急照明系统，应急照明需采用一路单独的线路，以便于施工人员在发生意外事故导致停电的时候安全从现场撤离，避免人员伤亡事故的发生。应急通道上大约每隔 20m 设置一盏应急照明灯具，应急照明灯具在停电后应有充分的照明时间，以确保现场施工人员能安全撤离。

18.4 工程实例

18.4.1 南京紫峰大厦

一、工程概况

紫峰大厦位于南京市鼓楼区，主体建筑由二幢塔楼（塔楼和附楼）及 7 层的裙房组成，塔楼地上 69 层，附楼地上 22 层。紫峰大厦塔楼落成后将作为南京市与江苏省第一高楼。工程主体结构设置 4 层地下室，塔楼区域底板厚度为 3.4 米，附楼区域和裙楼区域底板厚度为 1.5 米。基坑总面积约 13800 平方米，塔楼区普遍开挖深度 23.50 米，附楼区和裙楼区普遍开挖深度 21.00 米。

紫峰大厦工程场地周边环境相当复杂，基地周边道路下分布有电缆、通信、上下水等大量市政管线，还与众多变形敏感建（构）筑物相邻，其中包括基地东侧中央路下设地铁一号线鼓楼站至玄武门站区间地铁隧道。地铁隧道采用矿山法施工，邻近基坑侧隧道为地铁停车线段。地铁隧道主体衬砌结构距离基坑约 5.0 米，周边超前支护锚杆外端距离基坑约 2.0 米。地铁隧道底部埋深最深约 20 米。隧道衬砌断面穿越强风化安山岩和残积土。地铁主管部门要求，紫峰大厦基坑工程施工对地铁结构造成的附加变形影响不得大于 15 毫米。紫峰大厦的工程总平面如图 18-38 所示。

紫峰大厦工程场地浅层为①₁层杂填土和①₂层淤泥质填土，厚度不均，普遍埋深约 4 米。大部分区域分布至基底依次为②层粉质黏土、③层粉质黏土和④残积土，粉质黏土为可塑~硬塑，残积土坚硬，土层在开挖过程中的自立性比较好。基底上下分布主要为⑤_{1a}全风化安山岩和⑤_{1b}强风化安山岩，已分别强烈风化为砂土状和砂土夹碎块状。⑤₂中风化安山岩埋深

超过 70 米，分为⑤_{2a}较完整的较软岩、软岩、⑤_{2b}较完整的软岩、极软岩、⑤_{2c}较破碎—破碎的软岩和⑤_{2d}较破碎—破碎的极软岩四个相互交错的亚层。岩层在基底东北部区域埋藏较浅，岩层面位于基底以上约 14 米。岩土物理力学指标如表 18-1 所示。

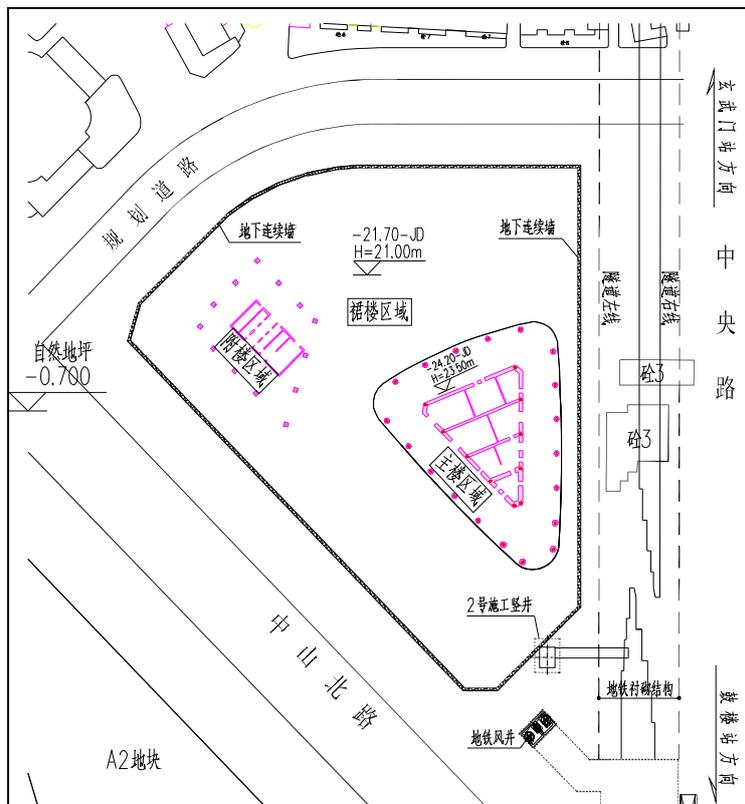


图 18-38 基坑工程总平面图

土、岩层物理力学性质综合成果表 表 18-1

土层	土层名称	重度 γ (kN/m ³)	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c (kPa)	水平基床系数 K_x (MPa/m)
①	填土				
②	粉质黏土	19.9	14.3	35.6	12
③ ₁	粉质黏土	20.1	16.7	50.6	28
③ ₂	粉质黏土	19.7	14.4	42.1	15
③ ₃	粉质黏土	20.2	17.0	47.7	35
④	残积土	20.3	20.6	64.3	36
⑤ _{1a}	全风化安山岩	23.5	35	25	65
⑤ _{1b}	强风化安山岩	24.1	40	60	240
⑤ _{2a}	中风化安山岩	25.2	38	920	2200
⑤ _{2b}		24.6	35	430	1600
⑤ _{2c}		24.7	35	530	1800
⑤ _{2d}		23.8	27	90	310

场地地下水分为两类：一类为上层滞水，赋存于上部①层填土中，水位埋深一般在 1.30~1.40 米。另一类地下水为弱承压水，主要赋存于第⑤层安山岩中，属基岩裂隙水。承压水位埋深 5.50~9.10 米。

二、基坑围护设计方案

经过对顺作法、逆作法方案以及钻孔灌注排桩结合止水帷幕、咬合桩等多种不同方案的综合分析比较,工程最终确定采用两墙合一地下连续墙结合坑内钢筋混凝土临时支撑的顺作法设计方案。

基坑周边设置两墙合一地下连续墙,基坑开挖阶段作为围护结构起到挡土止水的作用,主体结构永久使用阶段作为地下室外墙。地下连续墙墙厚 800mm,墙底普遍插入基底以下 6 米深度,在邻近地铁侧插入基底以下 7 米深度。地下连续墙进入基岩深度普遍超过 6 米。为减小地下连续墙槽段施工过程对地铁可能产生的不利影响,地铁隧道侧槽段按 4.5 米为原则进行划分。地下连续墙接缝处设置有扶壁柱与楼板、梁相连接,可起到封闭接缝、防止渗水和增加地下室整体刚度的目的。基坑围护剖面及基坑与地铁的关系如图 18-39 所示。

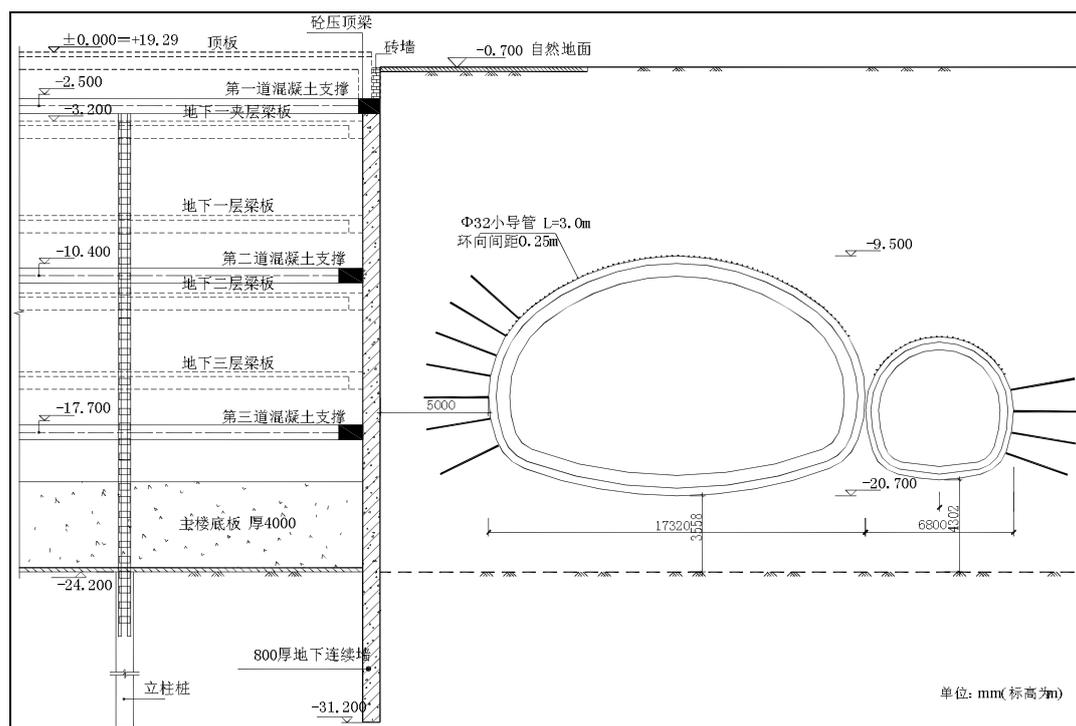


图 18-39 基坑围护剖面及基坑与地铁的关系

坑内架设三道边桁架结合对撑设置的钢筋混凝土支撑系统。支撑系统对撑杆件的平面布置一方面考虑对地铁隧道侧围护体的支撑刚度,另一方面也考虑完全避开塔楼区和附楼区的主要竖向构件、以便在基坑开挖至坑底、支撑不拆的情况下向上施工塔楼与附楼。地下连续墙顶部设置压顶圈梁兼作第一道支撑的围檩,竖向三道混凝土支撑主要杆件截面尺寸及中心标高如表 18-2 所示。第一道钢筋混凝土支撑的对撑桁架可作为施工栈桥,挖土机、运土车、混凝土泵车、运输车等施工设备可在栈桥上运作。栈桥还可作为施工材料的堆放场地,在加快基坑出土速度的同时,加快基坑工程施工工期。图 18-40 为第一道支撑的平面图,图 18-41 为基坑开挖到底时的支撑情况。

水平支撑系统主要构件一览表

表 18-2

项目	围檩 (mm×mm)	主撑 (mm×mm)	八字撑 (mm×mm)	连杆 (mm×mm)	支撑系统中心标高 (m)
第一道	1000×700	900×700	800×700	700×700	-2.500
第二道	1300×800	1200×800	1000×800	800×800	-10.400
第三道	1300×700	1200×700	1000×700	800×700	-17.700

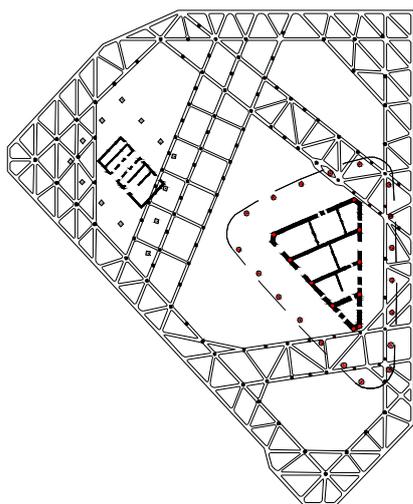


图 18-40 第一道支撑的平面图



图 18-41 基坑开挖到底时的支撑情况

本工程支撑系统临时立柱拟采用 4L160×16 型钢格构柱，其截面为 460×460，格构柱插入作为立柱桩的钻孔灌注桩中。钻孔灌注桩直径根据支撑杆件荷载以及所处基岩承载能力情况分为 $\Phi 800\text{mm}$ 、6m 桩长和 $\Phi 900\text{mm}$ 、8m 桩长两种。将 $\Phi 900\text{mm}$ 立柱桩布置于栈桥区域和支撑杆件密集区域， $\Phi 800\text{mm}$ 立柱桩布置于其它区域。本工程主体结构工程桩为人工挖孔扩底桩，在基坑开挖至坑底以后施工；立柱桩为钻孔灌注桩，基坑开挖前施工。围护结构立柱桩完全避开主体工程桩桩位，立柱桩全部为加打桩。

三、基坑工程实施

本工程地下连续墙进入基岩相当深。地下连续墙嵌岩成槽施工若采用传统的冲击入岩（包括乌卡斯冲岩、吊机配以重锤冲岩、反循环自动冲岩、牙轮钻机钻孔后冲岩等）工艺，由于场地东侧紧邻地铁隧道，冲击钻成槽对地层的冲击和震动大，将对地铁隧道产生不利影响。因此地下连续墙成槽采用“抓铣结合”工艺，即以液压抓斗成槽机和铣槽机相结合进行。浅部粘土成槽施工采用常规液压抓斗成槽机，进入基岩后调换铣槽机以切削方式成槽，施工效率较高，平均每幅槽段成槽时间不超过 1 天半。成槽工艺流程见图 18-42。其中成槽功效较低的槽段是在⑤_a层分布区域，该层基岩中夹杂相当多粘性土，成槽过程中经常粘附于铣轮周围，需要停机人工清理。

钻孔灌注桩立柱桩施工进入岩层，需要避免不适当的成孔方式对地层和隧道产生较大的振动影响。基坑工程施工在远离地铁区域进入基岩后采用冲孔法施工立柱桩，在靠近地铁隧道区域卸除厚度土层后，采用人工挖孔成桩。

本基坑工程由于面积较大、开挖深度深，为控制基坑开挖过程的水平变形及确保地铁隧道的安全，按照时空效应原理，土方开挖和支撑的施工工序根据分区、分块、对称、平衡的原则制定，同时在施工过程中尽可能缩短地下连续墙围护结构的无支撑暴露时间、宽度和深度。此外，在开挖至基底的工况，地铁侧留设 8 米宽、3 米高的墩台，按小于 25 米控制分段、抽条形成垫层与底板。基坑开挖至第⑤层基岩面以下后，采用了镐头机首先破碎岩石，然后采用挖土机械清理的岩体开挖方案。由于本工程基底以上安山岩体量相对不大，岩体较为破碎，因此施工效率尚可。机械施工也未对地铁隧道产生振动影响。

紫峰大厦采用了信息化的施工方法，通过对围护体与地铁隧道全过程监测数据的分析，在施工过程中及时采取了调整挖土顺序、控制坑外超载、实施注浆预案等技术措施，通过不断修正、优化施工组织设计，达到了控制围护体与地铁隧道变形发展的目的。监测结果表明，地下连续墙的最大侧移为 32.14mm；基坑开挖使地下连续墙和坑内钢立柱普遍发生了上抬，

其中立柱最大上抬接近 15mm、地下连续墙上抬最大接近 10mm；支撑的最大轴力基本处于杆件混凝土设计承载能力的 90%左右，监测过程中发现支撑杆件轴力受温度影响波动较明显；基坑周边建筑未发现有明显裂缝出现；地铁左线隧道的最大侧移为 1.1mm，最大上抬量为 8.2mm，右线隧道最大上抬量仅为 1.4mm，隧道的变形小于地铁管理部门提出的 15mm 控制指标，有效地保护了地铁的安全。

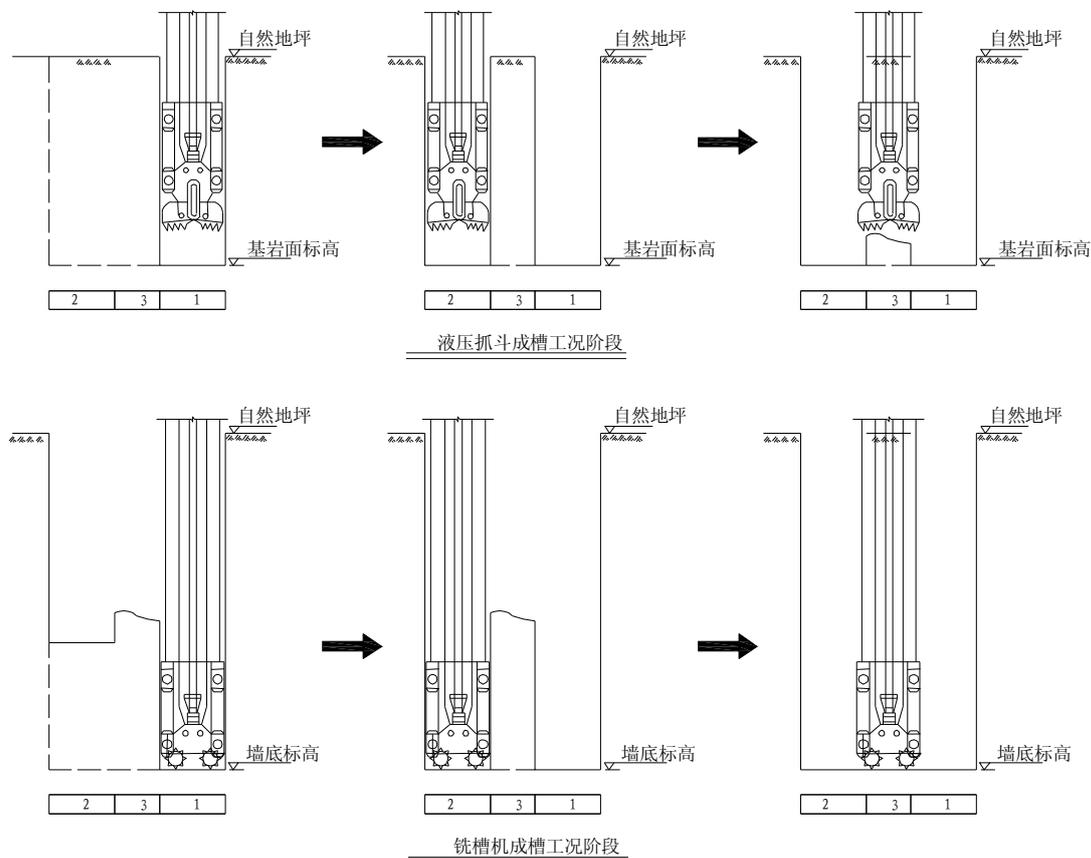


图 18-42 地下连续墙“抓铣结合”施工工艺流程示意图

18.4.2 南昌大学第二附属医院医疗中心大楼

一、工程概况

南昌大学第二附属医院医疗中心大楼工程位于南昌市八一大道与民德路交口。主体结构分为主楼、裙楼和纯地下室三部分：主楼地上26层，采用框架-剪力墙结构。裙楼地上12层，采用框架结构。地下部分均设置二层地下室，基础采用桩筏基础，桩基采用钻孔灌注桩。基坑面积约为6500m²。基坑开挖深度约为11.0~12.55m，属大型深基坑。

本工程位于南昌市闹市区，东邻八一大道、南侧靠近民德路，紧邻多幢多层和高层建筑物，西侧临时病房楼为三层框架结构，基础为柱下钢筋混凝土条形基础，距离基坑约为15.0m。南侧紧邻科研行政楼主体结构为13层框架结构，基础为桩筏基础。桩基为人工挖孔扩底桩，桩径1.0m，桩端扩径为1.6m。桩长约为14m，桩端进入砾砂层。桩基础距离基坑最近为1.5~2.0m。基坑东南侧为地下人行过街地道，距离基坑的最近距离为10.00m。基坑北侧为医院的污水处理站泵房，距离本工程基坑约5.80m。周边环境示意图如图18-43所示。本工程周边环境复杂，基地邻近多条市政干道和其下的市政管线，以及多幢多层和高层建筑物，环境保护要求较高。其中，基地南侧的科研行政楼、地下人行过街地道和污水处理站泵房是本工程重点保护对象。

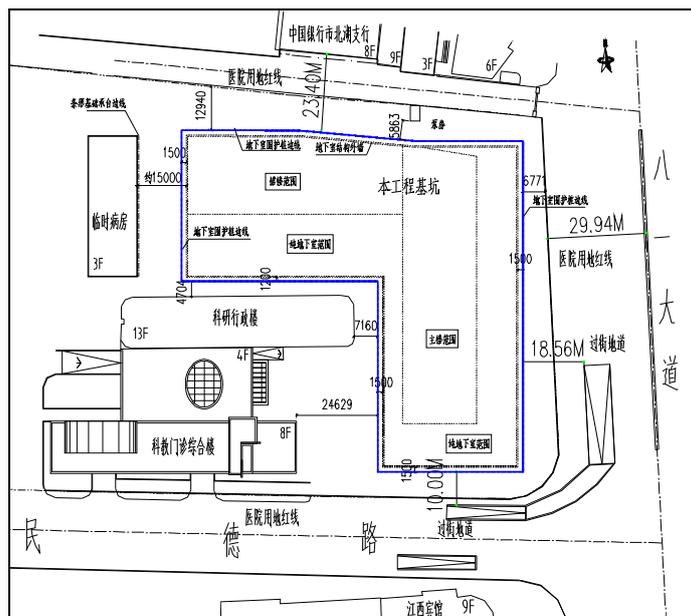


图 18-43 总平面图

场地土层分布情况及物理力学指标见表 18-3。场地内地下水包括上层滞水和潜水。上层滞水赋存于①层杂填土中，水位埋深 1.50~3.90。潜水赋存于④层中砂及其下地层中，水量丰富。①层杂填土为中等透水土层，②层淤泥、③层粉质粘土为弱透土层，其它各砂砾层均为强透土层，基岩透水性根据节理裂隙发育与闭合程度的不同，表现为弱~中等透土层。

土层物理力学指标 表 18-3

编号	土层	层厚 (m)	重度 (kN/m ³)	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c (kPa)
①	杂填土	2.20~6.00	18.1	15	10
②	淤泥	1.10~2.80	18.2	8	5
③	粉质粘土	0.90~2.50	19.0	17.0	25.3
④	中砂	3.50~6.80	19.1	15	0
⑤	砾砂	1.50~4.30	19.3	25	0
⑥	圆砾	2.10~4.50	19.6	30	0
⑦	砾砂	0.50~4.30	19.3	25	0
⑧	圆砾	1.10~2.70	19.6	30	0
⑨	强风化泥质粉砂岩	1.20~2.10	/	/	/

二、基坑围护设计

1. 总体设计方案

本基坑周边环境条件复杂、环境保护要求较高，而且本工程处于闹市区，地下室外墙到红线距离较近，场地条件紧张，此外业主对工程建设周期要求较高。若采用常规的顺作法设计，需要设置大量的临时支撑，主体结构需待基坑开挖完成后方可施工，施工工期较长，难以满足业主进度要求。考虑本工程周边环境的实际情况、建设工期和工程造价等综合因素，确定本基坑工程采用周边临时围护体结合坑内水平梁板体系替代支撑的逆作法方案。

2. 围护结构设计

基坑临时围护结构采用采用 $\phi 800$ 钻孔灌注桩结合外侧 $\phi 1000$ 高压旋喷桩止水帷幕。钻孔灌注桩的插入深度根据基坑的变形、稳定性要求以及周边环境的保护要求确定，桩长约 22m，桩端进入第⑨层强风化泥质粉砂岩不少于 1.0m。本工程场地地下水位较高，且场地地下水

潜水略具承压性，考虑到对承压水的隔断和施工穿越砂层，采用高压旋喷桩作为止水帷幕。高压旋喷桩与钻孔灌注桩搭接 100mm，桩长同围护桩。基坑围护剖面如图 18-44 所示。

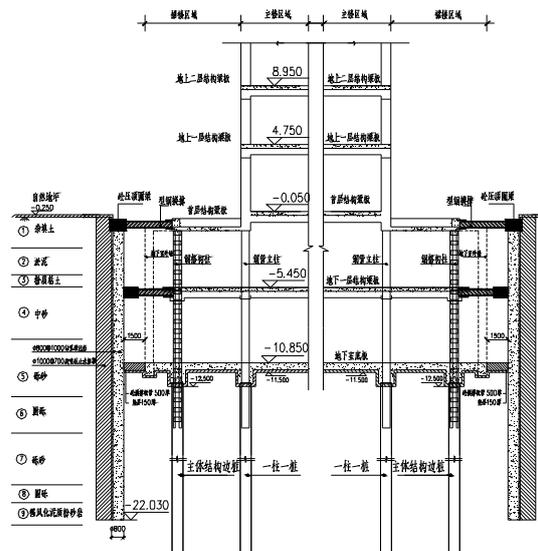


图 18-44 基坑围护典型剖面图

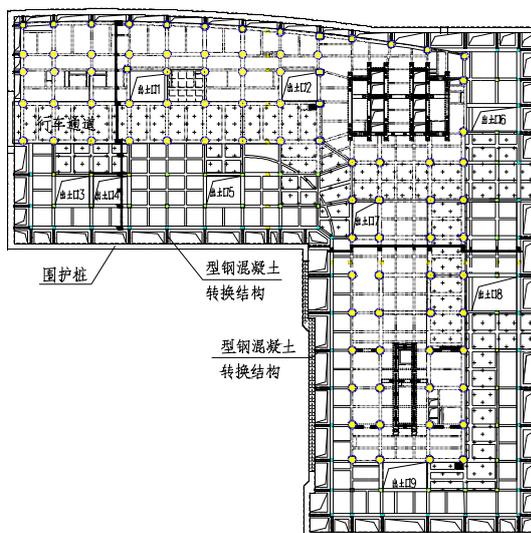


图 18-45 逆作阶段梁板代支撑平面图

3. 结构梁板替代水平支撑设计

主体结构梁板替代临时水平支撑，支撑刚度大，可有效控制基坑的变形。由于逆作阶段土方开挖的需要，需要利用电梯井、楼梯等结构开口位置预留空间较大的出土口。由于建筑功能需要，地下室结构平面存在高差和局部开洞，考虑采取加腋的措施对这些局部区域进行加强，附加的腋角逆作施工结束可根据建筑以及设备等专业要求确定是否保留。临时围护桩与地下结构之间设置可靠的水平支撑传力体系，以利于逆作阶段水平力的传递。根据地下各层计算水平支撑力的大小，采用不同的支撑刚度。逆作阶段首层结构承受的水平力相对较小，采用 H400×400 的型钢支撑，支撑间距同柱距；地下一层结构承受的水平力较大，支撑同样采用 H400×400 型钢支撑，但需加密支撑的间距，支撑间距为柱距的一半。首层和地下一层结构型钢支撑顶部设置一定宽度的现浇混凝土板带，混凝土板带与压顶圈梁(或围檩)以及内部结构一道浇筑以形成整体。逆作阶段梁板代支撑平面如图 18-45 所示。

4. 竖向支承体系设计

逆作结构梁板的竖向支承构件为一柱一桩，对于纯地下室区域的一柱一桩采用钻孔灌注桩内插角钢格构柱形式，钢立柱采用由等边角钢和缀板焊接而成，其截面为 460 mm×460mm，型钢型号为 Q345B。对于上部结构区域的一柱一桩采用钻孔灌注桩内插钢管立柱的形式。由于结构梁板的自重较大，裙楼位置采用 Φ700×16 钢管立柱，主楼位置采用 Φ800×16 的钢管立柱，钢立柱插入钻孔灌注桩中不少于 4m。逆作阶段主体结构位置钢立柱须承受的上部荷载为：以地上施工至地上十层、地下部分逆作开挖至基底位置的工况作为计算的控制工况。地下室逆作施工结束后钢立柱外包混凝土形成框架柱，钢立柱由于作为框架柱的一部分，其垂直度设计要求达到 1/500。立柱桩全部利用主体结构框架柱下工程桩，桩径 Φ1000~2200mm，桩端持力层为稳定的岩层，桩长约为 19m。为控制逆作阶段一柱一桩的差异沉降，立柱桩采用了桩端后注浆措施。

在逆作施工阶段，主楼地下室剪力墙竖向构件暂不施工，通过在梁底留设墙体插筋，待逆作施工结束后再顺作地下部分的剪力墙结构。逆作阶段上部结构剪力墙的荷载通过临时的角钢格构柱和首层结构内设置的托梁进行托换，如图 18-46 所示。角钢格构柱插入增打的钻孔灌注桩形成一柱一桩。考虑剪力墙钢筋的穿越，临时角钢格构柱截面为 460 mm×750 mm，

型钢型号为 Q345B。角钢格构柱在地下室剪力墙施工完成并达到强度后割除。

本工程采用钻孔灌注桩结合止水帷幕的临时围护结构，地下室结构外墙需待地下室逆作施工结束后施工，必须解决逆作阶段边跨结构的竖向支承问题。根据本工程地下各层结构梁板布置，边跨结构的二次浇筑分界线从地下室外墙朝内退 2m 距离，如图 18-47。在边跨新增结构边梁，下设临时角钢格构立柱的竖向支承处理方案，格构柱截面为 460×460，型钢型号为 Q345B。同时将外墙下结构边桩内退至角钢格构柱位置，形成钻孔灌注桩内插角钢格构柱的一柱一桩形式。角钢格构柱在地下室外墙施工完成并达到强度后割除。



图18-46 剪力墙托换节点现场照片



图18-47 边跨结构竖向支承现场照片

5. 梁柱节点钢筋穿越方案

本工程地下各层结构框架梁截面宽度较小，主体结构位置梁宽为 700mm，纯地下室区域梁宽仅为 500mm，而钢管立柱的截面直径为 700~800mm，角钢格构柱截面宽度为 460mm，因此对逆作阶段梁柱节点框架梁主筋穿越施工带来较大的难度。经过多种梁柱节点钢筋穿越方案的比较分析，对于钢管立柱和角钢格构柱选取不同的处理措施。

(1) 钢管立柱：考虑到主体结构位置框架梁钢筋的穿越，钢管混凝土立柱位置和框架梁钢筋连接方法采用钢筋混凝土环梁节点。在首层结构梁的上层钢筋贯通，下层钢筋全部锚入首层钢筋混凝土环梁内；地下一层结构梁上、下层钢筋全部锚入地下一层钢筋混凝土环梁内，钢筋锚入长度应满足抗震锚固长度，环梁节点连接配筋示意图如图 18-48 所示。

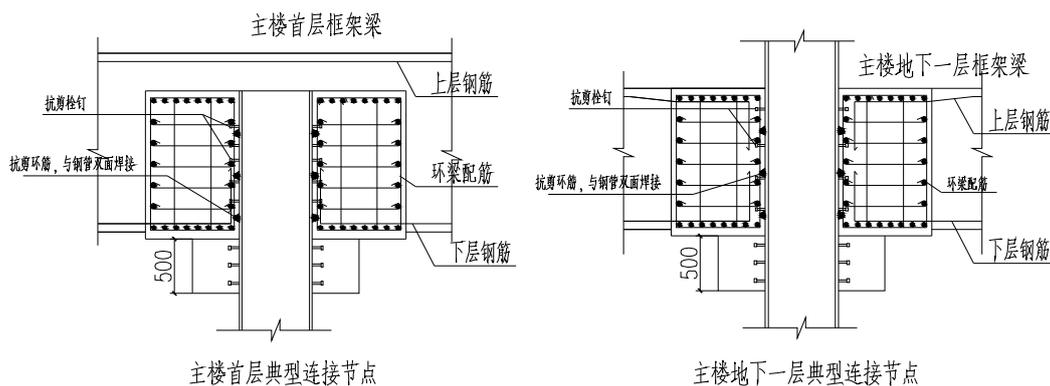


图18-48 环梁节点配筋示意图

(2) 角钢格构柱：采取对角钢格构柱相交节点位置的结构梁进行加腋的处理措施，通过加腋的方式扩大梁柱节点位置梁的宽度，使得梁的主筋得以从侧面绕行贯通，梁中部的主筋从角钢格构柱中部贯通穿过。节点位置绕行的钢筋需要施工现场根据实际情况进行定型加工，梁柱节点位置加腋如图 18-49 所示。

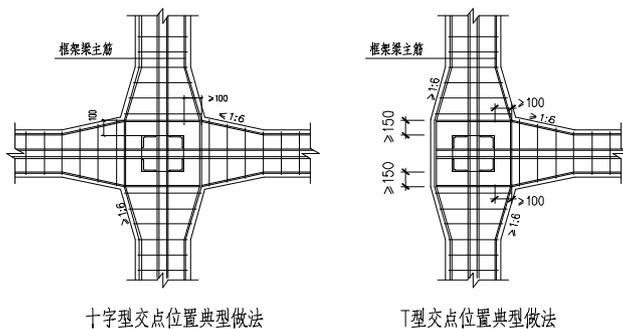


图18-49 梁柱节点位置加腋

三、基坑工程实施

本工程施工总体流程为考虑地上和地下结构同时进行立体交叉施工。首先，施工地下室首层梁板结构，完成后进行上部十层结构的顺作施工，同时利用首层结构梁板作为施工平台，开挖下部土方，由上而下逆作施工地下各层结构。地下室底板施工完成后，对一柱一桩钢立柱外包混凝土形成框架柱，施工内部剪力墙和结构外墙等竖向受力构件，达到强度后进行地面十层以上结构施工。基坑施工的流程如图 18-50 所示。

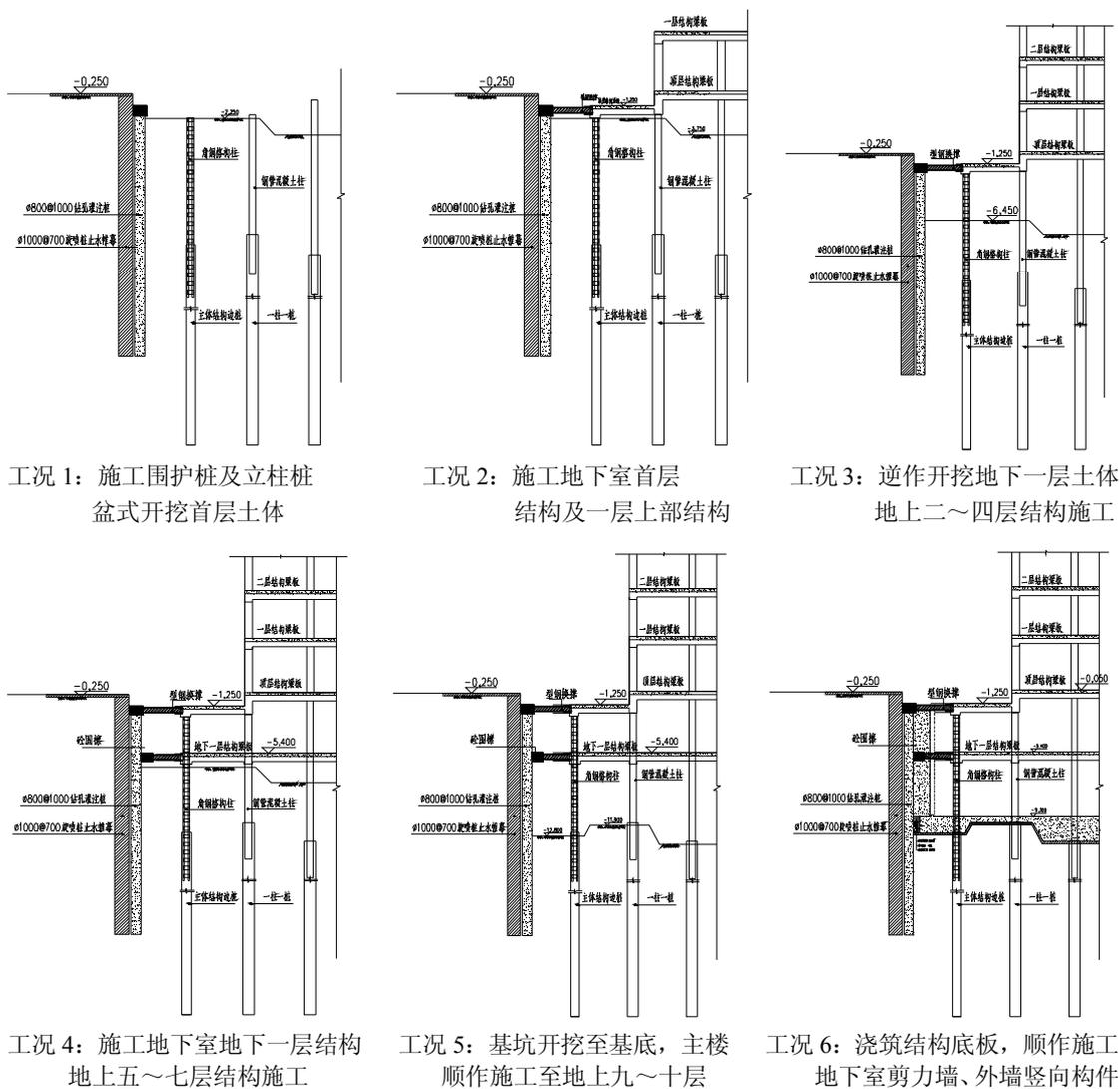


图18-50 基坑施工流程图

本工程于 2007.8~2007.10 完成止水帷幕、围护桩和一柱一桩的施工, 2007.11 开始首层土方开挖, 2008.10 完成地下两层结构及底板施工, 地上完成十层结构施工。基坑实施过程中对基坑进行了全面的监测。主要监测内容包括围护体和土体侧向变形、周边道路、市政管线、建(构)筑物的沉降和水平变形监测、一柱一桩钢立柱竖向沉降和差异沉降、钢筋混凝土组合支撑轴力以及结构梁板内力的监测。监测结果表明: 基坑逆作开挖到基底, 围护桩的最大侧移仅为 12.2mm, 基坑周边的建(构)筑物的最大沉降为 12.4mm, 基坑工程完全处于安全的可控状态, 并且有效地保护了周边复杂的环境。主体结构一柱一桩最大沉降为 10.4mm, 立柱之间的最大差异沉降为 5.3mm, 表明逆作阶段地上十层结构在一柱一桩的竖向支承下沉降均匀稳定。

18.4.3 上海世博 500kV 地下变电站工程

一、工程概况

上海世博 500kV 地下变电站工程位于上海市中心城区, 是世博会的重要配套工程, 用于缓解上海中心城区的供电压力, 确保 2010 年上海世博会的电力供应。该工程为国内首座大容量全地下变电站, 建设规模列亚洲同类工程之首, 建成后将是世界上最大、最先进的全地下变电站之一。变电站为全地下四层筒型结构, 基坑直径为 130m, 开挖深度为 34m, 工程规模大、难度高。工程效果图如图 18-51 所示。



图 18-51 上海世博 500kV 地下变电站效果图

变电站地下一层层高为 9.5m, 主要分布有电气以及冷却装置等设备, 地下二层层高为 5m, 主要为电缆层, 地下三层层高为 10m, 主要为大型大容量变压器设备层, 大型设备直接座在以地下四层底板为基座的专用设备基础上, 地下四层层高为 4.5m, 主要为地下三层大型设备的基础以及设备的事后油池。变电站采用以框架为主、剪力墙为辅的内框外筒的结构型式。外筒即为变电站的结构外墙, 由基坑开挖前从地面施工完成的地下连续墙和逆作阶段分层浇筑形成的内衬墙组成。地下结构内部采用框架结构作为结构竖向受力体系, 地下各层结构采用双向受力的交叉梁结构体系, 满足大容量设备对空间较高的要求。基础采用桩筏基础, 筏板厚 2.5m, 桩基采用桩侧注浆钻孔灌注桩抗拔桩。

工程位于上海市静安区成都北路、北京西路、山海关路和大田路围成的区域之中, 如图 18-52 所示。山海关路与基坑最近距离为 10m; 隔山海关路与本工程相对的是一、二层的老式民房, 基础为天然地基; 山海关路下有供电、煤气、污水、雨水、给水等管线, 管线距基坑的最近距离为 16.6m。成都北路与基坑最近距离 20m; 成都北路中部为南北高架路, 是城市交通主干道之一, 城市高架路下设置了桩基础; 成都北路下有供电、信息、煤气、合流、给水、雨水等管线, 管线距基坑的最近距离为 23m。大田路和北京西路离基坑较远, 其下有

供电、污水、雨水、煤气等多条管线，管线距基坑的最短距离为 58m。

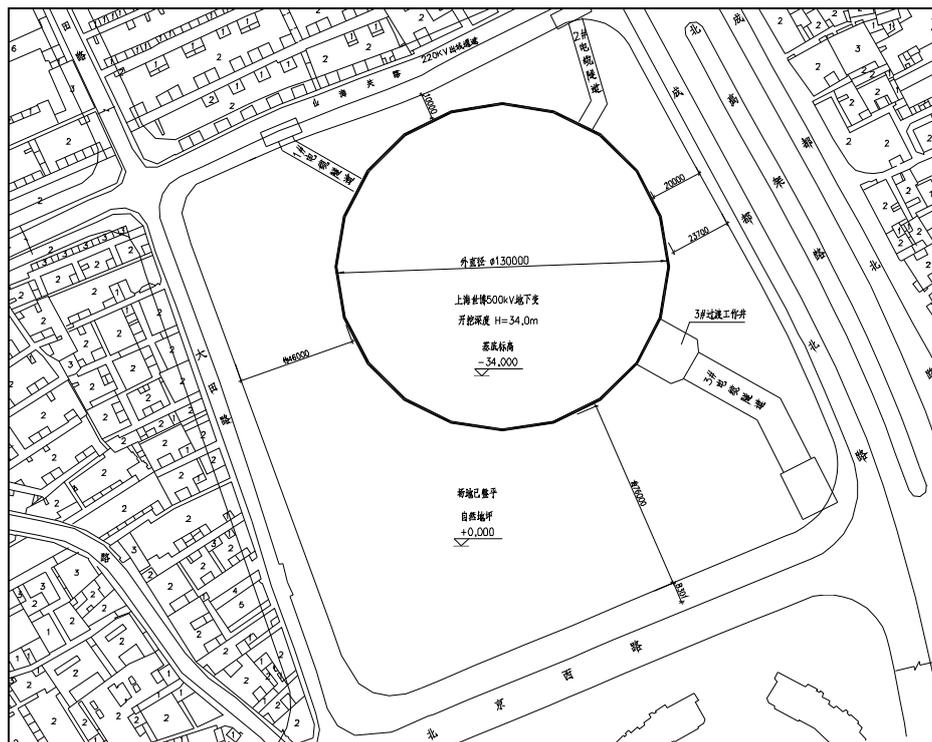


图 18-52 基坑周边环境平面图

本工程场地内 30m 以上分布以粉质粘土为主的多个软土层，具有高含水量、大孔隙比、低强度、高压缩性等特点，第④层淤泥质粘土是上海地区最软弱的土层，其次为第③层淤泥质粉质粘土，以上软土均处于基坑开挖深度范围之内。30m~90m 深度主要分布有工程性质较好的第⑥层暗绿色硬土层、第⑦层粉砂层、俗称“千层饼”的第⑧层粉质粘土与粉砂互层以及第⑨层中粗砂层。场地地基土的分层情况及各土层的物理力学指标如表 18-4 所示。

土层主要物理力学参数

表 18-4

层序	地层名称	层厚 (m)	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	孔隙比 e	含水率 w (%)	标贯击数	静力触探比贯入阻力 P_s (MPa)	静力触探锥尖阻力 q_c (MPa)
②	粉质粘土	1.67	15.7	15.8	0.958	34.4	---	0.72	0.66
③	淤泥质粉质粘土	1.51	7.4	14.7	1.317	46.6	3.4	0.71	0.55
④	淤泥质粘土	7.01	7.2	17.2	1.358	48.1	2.6	0.65	0.53
⑤ ₁₋₁	粘土	6.93	12.3	12.3	1.091	38.3	4.3	0.94	0.72
⑤ ₁₋₂	粉质粘土	4.25	6.8	13.9	1.032	35.4	6.5	1.30	0.98
⑥ ₁	粉质粘土	5.38	30.7	13.5	0.753	26.1	14.6	2.78	1.94
⑦ ₁	砂质粉土	3.94	7.9	29.8	0.852	30.5	28.1	12.19	9.71
⑦ ₂	粉砂	6.51	3.6	31.7	0.772	27.5	50.1	23.23	19.28
⑧ ₁	粉质粘土	8.32	13.9	23.2	1.052	37.2	9.7	2.38	1.41
⑧ ₂	粉质粘土与粉砂互层	14.76	12.3	23.8	0.992	34.6	15.5	3.45	2.35
⑧ ₃	粉质粘土与粉砂互层	13.08	14.1	24.4	0.902	30.7	---	5.98	6.00
⑨ ₁	中砂	3.99	4.5	30.8	0.582	18.6	62.0	---	---
⑨ ₂	粗砂	4.90	5.3	33.0	0.544	16.7	83.4	---	---

本场地浅层地下水属潜水类型，勘探孔静止地下水埋深一般 0.5~1.0m。本场地浅层地下水属潜水类型，补给来源主要为大气降水、地表径流，潜水水位埋深一般为 0.3~1.5m。场地深层埋藏有承压水，主要为第一承压含水层⑦₁砂质粉土（含粉砂）、⑦₂粉砂层，以及第二承压含水层⑧层砂性土层，承压水头埋深随季节呈 3~8m 变化。勘察期间现场对⑦₁和⑦₂层的抽水试验结果揭示，第一承压含水层与第二承压含水层之间存在弱水力联系。由于本工程埋深较深，基坑开挖过程中存在上覆土层厚度不足以抵抗承压水的浮托力，因此基坑工程设计与施工过程中应采取有效措施保证基坑的安全。

二、基坑围护设计

1. 总体设计方案

结合本工程大深度、大面积、圆筒形等特点，采用了支护结构与主体结构全面相结合的逆作法总体设计思路，即基坑围护体采用“两墙合一”圆形地下连续墙，坑内利用四层地下水平结构梁板结合三道临时环撑作为水平支撑系统，采用一柱一桩作为逆作阶段的竖向支承系统，大部分立柱逆作结束外包混凝土作为框架柱。由于充分利用地下工程主体结构作为基坑开挖阶段的临时支护结构，并采用逆作的构筑方式，减少了临时支护结构的设置和拆除带来的资源浪费，同时在圆形空间结构的基础上发挥了主体结构刚度大的优势控制基坑变形。基坑剖面如图 18-53 所示。

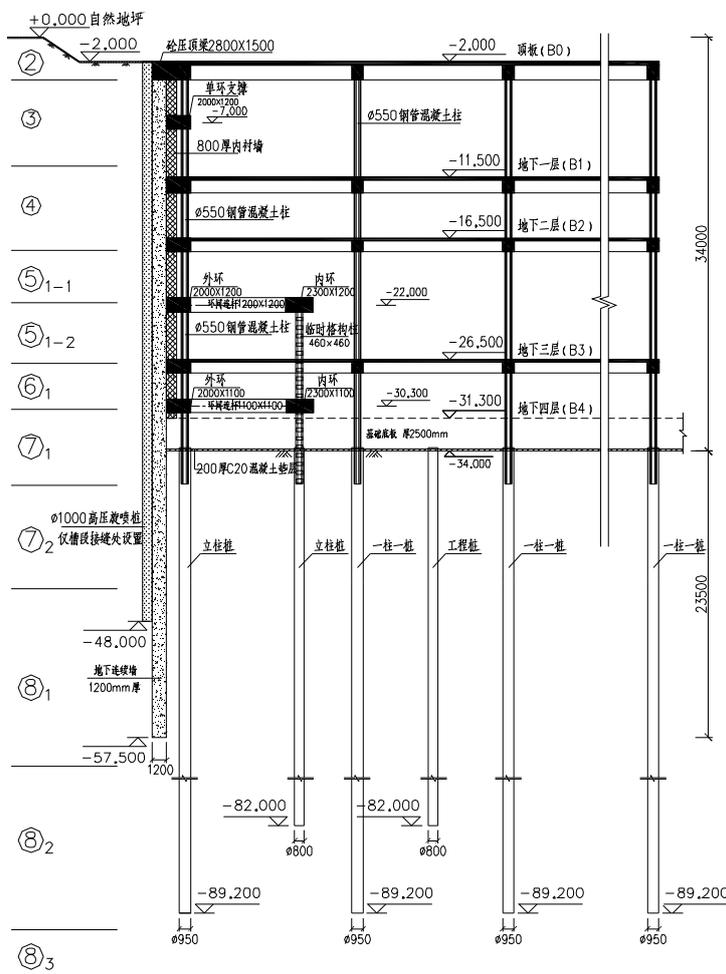


图 18-53 上海世博 500kV 地下变电站工程逆作阶段剖面图

2. 圆形地下连续墙设计

地下连续墙既作为基坑开挖阶段的挡土和止水围护结构，又作为正常使用阶段结构外墙

的一部分。地下连续墙厚度为 1200mm，开挖深度 34m，插入深度 23.8m，插入比为 0.70。墙底深度达到 57.5m，有效长度 54.00m，混凝土设计强度等级为 C35。由于需作为逆作阶段的竖向承重结构，对墙端进行注浆加固。

地下连续墙呈圆筒形布置，水土压力的作用将主要转化为环向压力，三维空间分析结果显示，地下连续墙表现出以环向拱受压的为主，竖向梁受弯为辅的结构受力特点，这与常规非圆形基坑地下连续墙的受力特点不同，因此根据地下连续墙的受力特点，墙体也按环向水平钢筋为主，竖向钢筋为辅的原则进行配筋。

槽段之间选择了工字钢刚性接头，以利于巨大环向压力的传递，该接头型钢与先行槽段钢筋笼焊接，后续槽段钢筋直接伸入型钢内，使得接头不存在无筋区，形成的地下连续墙整体受力性能好，可适应接头区复杂的受力要求。而且该接头还可免除了常规地下连续墙需在接头部位设置和拔出锁口管或接头箱流程，有效地解决了超深地下连续墙锁口管或接头箱难以拔除的困难。图 18-54 为地下连续墙接头的示意图。



图 18-54 地下连续墙接头示意图

3. 水平支撑体系设计

基坑采用逆作法施工，利用四层地下水平结构梁板作为水平支撑系统，四层结构均采用双向受力的交叉梁板结构体系。本工程逆作阶段地下各层水平结构设置九个上下对应的出入口，作为逆作阶段出土和施工设备、材料运输的进出通道，这对逆作施工阶段的出土带来极大的方便。出入口的平面设置以尽量利用电梯井、楼梯口和进、出风井等结构永久开口位置为原则，并根据楼板承受水平力的要求，对开口周边结构进行加固。逆作施工阶段顶层结构梁板需要承受车辆荷载和施工堆载。由于主体结构设计考虑顶层结构梁板在永久使用阶段需要承受 2 米厚的上覆土荷载以及覆土上 20kPa 的活载，主梁、次梁的截面尺寸分别为 1000mm×1500mm（中部跨度大区域为 1400 mm×2000 mm）和 400 mm×1200 mm（中部跨度大区域为 400 mm×1500 mm）、板厚 300 mm，梁、板具有较高的设计承载能力。经计算，逆作施工阶段顶层梁板承载能力已可满足逆作施工阶段常规的施工荷载要求，不需另行加强。

图 18-55 为逆作阶段首层结构的平面图，图 18-56 为地下一层结构楼板的平面图。

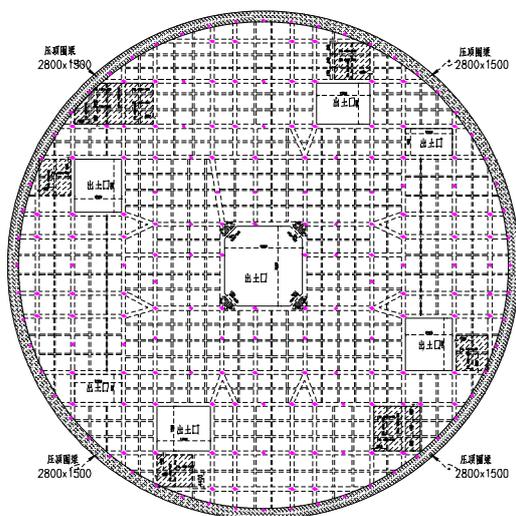


图 18-55 逆作阶段顶层结构平面图

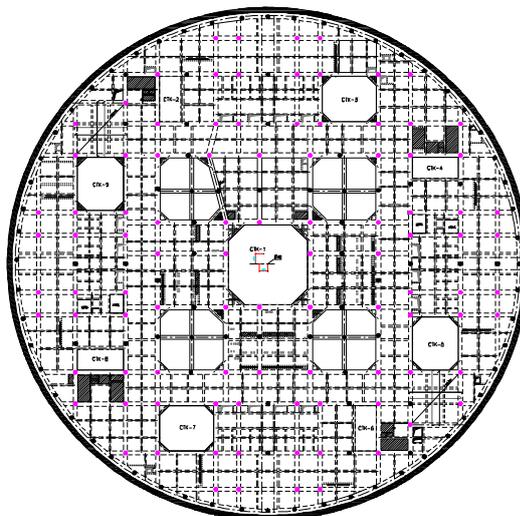


图 18-56 逆作阶段地下一层结构平面图

逆作施工阶段，地下一层、地下二层和地下三层的板跨分别高达 9.5m、10.0m 和 7.2m，为减小地下连续墙的竖向跨度、改善基坑围护体系的整体变形和受力性能，围护结构设计在上述三跨的跨中分别架设了临时环向水平支撑系统。第一道临时支撑为单环支撑，环形截面尺寸 2000mm×1200mm，中心标高-7.000m。第二道和第三道临时支撑均为双环支撑，中心标高分别为-22.000m 和-30.300m，双环间设置水平连杆连接构成桁架系统。第二道双环的外环截面尺寸 2000mm×1200mm，内环截面尺寸 2300mm×1200mm，连杆截面尺寸 1200mm×1200mm。第三道双环的外环截面尺寸 2000mm×1100mm，内环截面尺寸 2300mm×1100mm，连杆截面尺寸 1200mm×1100mm。临时单环支撑的平面如图 18-57 所示，临时双环支撑的平面如图 18-58 所示。

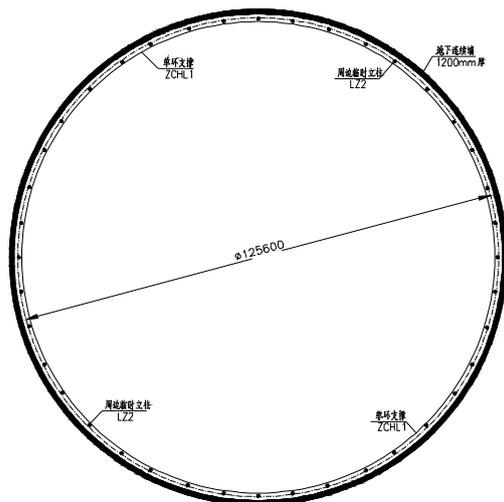


图 18-57 逆作阶段单环支撑平面图

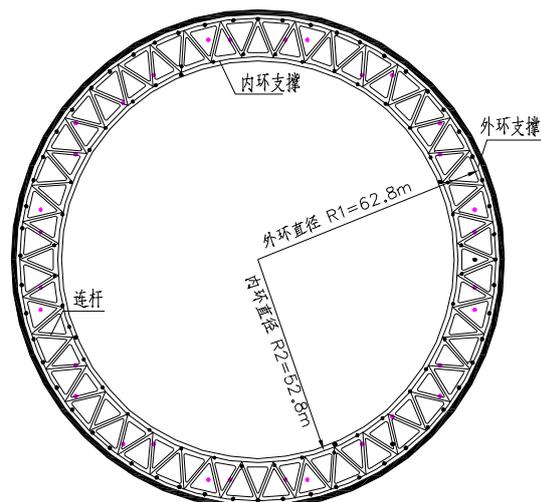


图 18-58 逆作阶段双环支撑平面图

4. 竖向支承体系设计

逆作阶段各层水平结构以及临时支撑的竖向支承系统为一柱一桩，一柱一桩主要由钢立柱和钻孔灌注桩组成。钢立柱根据逆作阶段竖向荷载的大小采用钢管混凝土立柱和角钢格构柱两种类型。钢管混凝土柱采用 $\varnothing 550 \times 16$ 钢管内充填C60高强度混凝土浇筑形成，抗压设计承载力不小于10000kN，垂直度不大于1/600。钢管混凝土柱分为永久和临时两种类型，永久性钢管混凝土柱布置在框架柱的中心位置，逆作结束后外包混凝土形成方形的钢筋混凝土框架柱，框架柱的设计中考虑了钢管混凝土柱的作用。临时性钢管混凝土柱分布在部分跨度大框架梁的跨中位置以及边跨结构位置，逆作结束后进行割除。图10为钢管混凝土柱的现场照片。角钢格构柱分布在荷载相对较小的第二、三道双环支撑位置，为选用4L140×14的角钢与缀板拼接而成460mm×460mm截面的钢格构柱，逆作结束后进行割除。

立柱桩作为逆作阶段的竖向支承基础，在变电站基础底板形成封闭及地下水水位恢复之后，转变为抗拔桩，因此立柱桩的设计需同时满足逆作阶段（承压）和正常使用阶段（抗拔）两个状态的要求。立柱桩均采用桩端后注浆灌注桩，钢管混凝土柱对应的立柱桩桩径 $\varnothing 950$ ，桩顶埋深 33.7m，设计有效桩长 55.8m。桩端穿越深厚的第⑦层砂质粉土、第③层粉质粘土和第⑨₁层中砂，进入⑨₂层粗砂，桩端埋深达 89.2m，抗压设计承载力 9500kN，桩身混凝土设计强度 C35，桩身垂直度要求不大于 1/300，同时为控制逆作阶段立柱桩的总沉降，进而控制差异沉降，要求进行桩端注浆，每根桩注浆水泥用量不小于 2 吨。角钢格构柱对应的立柱桩即为工程的抗拔桩，采用桩侧后注浆灌注桩，桩径 $\varnothing 800$ ，设计有效桩长 48.6m，桩端为第⑨₁中砂层，沿桩长设置五道注浆断面，每道注浆断面注浆孔数量不少于 4 个，且应沿桩周均匀分布。桩侧压浆水泥用量为每道 500kg，单桩水泥用量为 2.5 吨。

三、基坑工程实施

1. 地下连续墙施工

本工程地下连续墙深度达 57.5m，穿透的第⑦层粉细砂层的比贯入阻力为 12~23MPa，标准贯入击数为 28~50 击，为上海有名的铁板砂层。如果仍采用常规的抓斗成槽工艺，效率将非常低，势必影响成槽工期和质量，上海类似深度地下连续墙采用钻抓结合（先在槽段位置进行预钻孔，之后采用抓斗进行成槽施工）的施工工艺，平均一幅槽段需用时约 6 天。本工程从设计角度，第一次在上海地区提出了抓斗式成槽和铣削式成槽相结合的工艺，对第⑦层以上相对软的土体采用常规的抓斗成槽，⑦层及以下相对较硬的深层土体则采用铣削式成槽，其设备如图 18-59 所示。该组合成槽方式效率高，平均一幅槽段施工用时约 2.5 天；精度高，所有槽幅垂直度均满足 1/600 的设计要求，其中约 6 幅槽段垂直度更是达到 1/1000。铣削式成槽工艺在上海为首次成功采用。



图 18-59 铣槽机成槽设备



图 18-60 钢管混凝土柱实景

2. 一柱一桩施工

钢管混凝土柱所对应的立柱桩桩径为 $\varnothing 950$ ，桩端埋深 89.5m，属超深细长钻孔灌注桩，且需穿越深厚的⑦层粉砂和⑨层中粗砂两层砂层。由于立柱桩在逆作施工阶段需承受巨大的竖向荷载，且对其沉降量的控制严格，因此对其施工的垂直度和沉渣厚度提出超规范的要求，其垂直度需不大于 1/300，沉渣厚度需小于 50mm，施工方面存在极大的难度。为解决上述问题，通过了多组试成孔试验，针对超深细长钻孔灌注桩的垂直度问题采用钻杆加装置配重块，既保证钻头压力，又提高钻头工作稳定性和钻孔的垂直精度；针对沉渣厚度方面则采用泵吸反循环清孔工艺，同时配置除砂机来降低泥浆含砂量，以达到控制沉渣的目的。此外，立柱桩顶部需内插钢管混凝土柱，钢管混凝土柱内充填混凝土设计强度为 C60，而钻孔灌注桩设计强度为 C35，针对不同标号混凝土界面的控制进行了专题研究并得到妥善解决。钢管混凝土柱实景如图 18-60 所示。

由于本工程地下各层层高较大，承载力要求高，且使用期需外包混凝土柱的截面尺寸有严格限制，对钢管混凝土柱的垂直度提出了不大于 1/600 的要求，另外在大面积施工钢管混凝土柱之前进行了三组试充填试验，以检验钢管混凝土柱内充填混凝土的质量和强度、混凝土与钢管内壁的结合情况，以及优化施工参数和为大面积施工积累施工经验，钢管混凝土柱施工完成之后还采用敲击法、超声波和钻孔取芯等检验手段抽检。

3. 土方开挖

土方工程施工流程的合理设计与基坑的变形密切相关，本工程严格按照“时空效应”和“先撑后挖”原则指导基坑土方开挖和加撑，在开挖过程中做到“分层、分块、对称、平衡、限时”，在每层土方盆式加抽条开挖时，做到所留置的盆边土体宽度均大于 20m。根据土方开挖的总体指导原则，本基坑工程的土方按照“竖向分层，平面分区”进行施工，沿基坑竖

向（深度方向）共分成了八层，每一层平面分了七个区，挖土和结构施工均按该分区进行，每一层土方的开挖的总体原则为周边盆式留土，先开挖当中区域 A 区的土方，并进行 A 区的结构施工，其后对称、交替开挖和施工 B~F 区的土方和结构。平面分区如图 18-61 所示。图 18-62 为逆作阶段顶层结构实景。

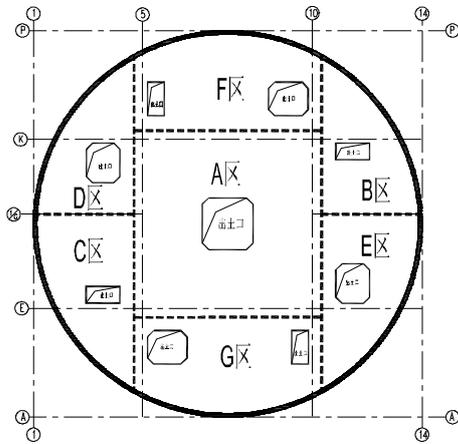


图 18-61 结构施工和土方开挖分区平面图



图 18-62 逆作阶段顶层结构实景

4. 降水施工

针对浅层潜水的疏干井和第一承压含水层的降压井在基坑开挖之前全部施工完成。为了满足土方的开挖要求，提前开展潜水的预抽水，疏干井降水的深度根据分层土方的开挖深度动态确定，原则上在每一层土方开挖之前，需将潜水水头降至该层土方层底以下 0.5~1m。疏干井随开挖深度的加深逐步割除上部井管，开挖至第⑥层时，可拔除所有的疏干井。

针对第⑦层第一承压水层，共设置了 14 口降压井，其中有 2 口作为备用井兼坑内观测井。承压井井管随各层水平结构的施工锚入结构梁板内而不逐层割除井管。承压井在基坑开挖至 19m 深度时开始启动工作，降水的水头根据承压水稳定性计算，随着开挖深度的加深，逐步降低承压水水头。由于地下连续墙进入第⑧层隔水层，坑内第⑦层的承压水成为无源之水，从 2007 年 8 月份开始降承压水至基础底板浇筑完成之间的 10 个月内，仅启动 2~4 口降压井便可将承压水水头降至设计要求的高度，其它井仅作为承压水的降压备用井。监测结果表明，坑外⑦、⑧、⑨层的水位无大的变化。上述情况说明对于浅部土层，地下连续墙起到了良好的止水帷幕的作用；对于第⑦层承压含水层，地下连续墙进入了相对不透水层第⑧层，有效隔断了第⑦层的水平水力联系。

5. 信息化施工

上海世博 500kV 地下变电站工程，基坑工程体量大、难度高，根据监测数据及时准确的掌握现场施工的情况对于保证本工程的顺利实施和工程经验的积累都至关重要。为此对本工程进行了全面的监测，所有监测共计 35 类 3400 多个监测测点，涵盖了基坑施工平面影响范围内（两倍基坑开挖深度）所有重要建（构）筑物、土体、地下水位、围护结构、支撑和支承体系等的变形和受力监测。整个监测从基地内进行场地平整、工程桩施工开始，经历基坑开挖的各个工况并将一直持续到地下结构全部完成投入正常使用阶段，监测数据体现了基坑工程全过程的变化发展情况，为地下工程的顺利实施创造了有利条件。信息化施工监测表明，圆形地下连续墙最大测斜值在 30~47mm 之间，较同等开挖深度常规形状基坑围护结构的变形小得多；由于开挖深度大，一柱一桩的最大隆起量达到 71mm，但相邻立柱的差异位移都在 15mm 以内，满足了立柱和结构楼板的设计要求；建筑物最大沉降为 5.4mm；高架桥墩最大沉降为 3.4mm，管线的最大沉降为 26.1mm。基坑工程施工的全过程都在可控状态下，整个支护体系是安全的，并且完全满足周边环境的保护要求。

参考文献:

- [1] 徐至钧, 赵锡宏. 逆作法设计与施工 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002
- [2] 王卫东, 吴江斌, 黄绍铭. 上海地区建筑基坑工程的新进展与特点 [J]. 地下空间与工程学报. 2005, 1 (4): 547-553
- [3] 王卫东, 王建华, 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例, 北京: 中国建筑工业出版社, 2007

专有名词和术语:

L

两墙合一

N

逆作法

Q

墙体相结合

S

竖向构件相结合

水平构件相结合

Y

一柱一桩

常用符号:

无