

逆作开挖深基坑控制卸载变形的方法与实践

贾 坚

(同济大学建筑设计研究院, 上海 200092)

摘 要: 结合工程实例来探讨逆作开挖条件下控制深基坑卸载变形的的方法、原理和技术。在工程实践的基础上提出结合坑内土体加固采用时空效应法的开挖技术是逆作开挖条件下控制深基坑卸载变形, 保护周边环境和设施的有效方法。

关键词: 深基坑; 逆作开挖; 变形控制

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)02-304-05

作者简介: 贾 坚(1963-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事软土基坑卸载变形控制的设计咨询研究工作。E-mail: service@tjadmb.com。

Deflection controlling measures and practices of deep foundation pits by use of top-down excavation method

JIA Jian

(Architectural Design & Research Institute of Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By analyzing the case of deep excavation of Shanghai Urban Planning Exhibition Center, some deflection controlling measures and principles were illustrated by use of the top-down excavation method. Base on the practices, it was concluded that the "Time-space effects" excavation method combining with the ground reinforcement could be employed to control the deflection in deep foundation pits under the top-down construction condition, and consequently to protect the neighboring facilities.

Key words: deep foundation pit; top-down excavation; deflection control

0 引 言

在软土地区城市中心区域的深基坑工程中, 采用地下连续墙二墙合一, 逆作开挖, 地下室顶板和楼板作支撑, 具有以下特点: ①支撑刚度大, 有利于深基坑开挖的稳定; ②土建结构上下同时施工, 加之无回筑阶段的支撑拆除, 可省却临时支撑的施工及拆除工期, 施工总工期短; ③地下连续墙二墙合一, 既作基坑开挖阶段的围护结构, 又作使用阶段的地下室外墙(或外墙一部分), 可省却基坑临时围护结构和外墙支模的施工操作空间, 在满足规划条件下, 可使地下室空间外放 2~3 m。既提高了土地的利用率, 相应地也增加了一定的经济效益。

在大城市密集中心地区用地日益宝贵, 深基坑周边设施保护要求愈加严格的今天, 基坑工程的设计施工已不仅仅是要满足基坑本身的安全稳定, 还需满足变形控制的要求。因此, 逆作施工开挖深基坑特别适合应用于大城市中心密集地区地价昂贵、施工场地狭小、施工工期紧、周边保护设施众多、控制基坑变形要求高的深基坑工程。

但对于控制变形要求为一级^[1] ($\delta_h \leq 0.14\%H$) 的

软土地区深基坑工程, 尽管采用了逆作开挖的施工方法, 但往往由于地下室各楼板间层高或楼板与坑底间的距离过大 ($>5\text{ m}$), 从而导致开挖施工中, 基坑卸载变形仍难以满足一级基坑的变形控制要求。而在两楼板间架设临时支撑的施工措施又会使得施工挖土不便, 降低施工效率。因此, 对于控制变形要求为一级的深基坑工程, 在采用逆作法施工时, 必须有一套行之有效的方法来控制逆作开挖条件下深基坑卸载的变形, 保护周边设施。

1 逆作开挖基坑控制卸载变形的原理及方法

1.1 基坑正逆作开挖的适用条件及比选

正作明挖是传统的深基坑开挖施工方法, 目前深基坑的施工通常仍采用此方法。对开挖超过 15 m 以上的深基坑, 其围护结构通常采用地下连续墙, 即使选择二墙合一, 为方便施工仍常采用正作明挖。采用正作明挖可为施工操作提供良好的自然采光和通风等

自然环境条件,便于土方开挖和外运,也便于支撑的浇筑(或架设),可较大地提高开挖施工的效率。

近20年来,国内的科研、设计和施工单位在地下连续墙的二墙合一及逆作开挖方面做了大量的理论研究和工程实践,并已取得了一定的成果,也形成了较成熟的工法。研究和实践的内容主要有以下6个方面:①地连墙刚柔性接头形式的研究;②二墙合一地连墙的止水及耐久性研究;③地连墙的承载力及垂直荷载下沉变形研究;④逆作法施工中永久性结构柱与临时立柱的布置和结合以及垂直度控制技术;⑤逆作楼板、梁与柱接头的混凝土后浇筑工艺;⑥地连墙—临时立柱—楼板的差异沉降和裂缝的控制。

以上这些研究和实践取得的成果及日益成熟的工法技术,为软土地区开展和推广深基坑逆作法施工提供了技术基础。因此,对于周边设施保护要求高、施工场地狭小的深基坑工程,如地下室楼板基本平整和完整,梁板传力体系较规律,开挖阶段作支撑传力的楼板间层高基本为4 m左右的深基坑,则较适用于逆作开挖。

逆作开挖施工有半逆作和全逆作两种方式。由于上海软土地区为饱和软弱土地层,为控制地连墙与临时立柱桩在上部荷载作用下产生的差异沉降过大($>20\text{ mm}$),避免已浇筑的地下室顶板、楼板开裂。目前,上海地区在全逆作工法施工条件下,上部结构为混凝土的通常建至2~4层,为钢结构的建至6层。对上海地区实施逆作工程的工程统计,逆作法工程中30%为全逆作施工,其余70%仍为半逆作施工。

1.2 逆作开挖条件下控制基坑变形的原理和方法

在软土基坑开挖中,适当减小每步开挖土方的空间尺寸,并缩短每步开挖所暴露的基坑挡墙在未支撑前的暴露时间,从而减小土体的流变变形,这是软土基坑工程“时空效应法”施工开挖控制基坑卸载变形的基本原理^[2]。应用时空效应原理实施开挖施工可以减缓变形的增长速率和控制变形的绝对值。

由于上海饱和软土地区深基坑所处地层的淤泥质黏土处于软塑或流塑状态,因此,在开挖基坑上部土方时,基坑开挖面下的围护结构已发生一定的变形,并且随开挖的不断加深,此变形也不断叠加增长,并具有不可逆性。这就需要我们在开挖深基坑上部土方时就需要控制深基坑开挖面下的变形发展。

国内外深基坑工程的大量理论研究和实践表明:应用坑内土体加固工艺可以较大地改善其土性,提高被动区土体抗力。对软土基坑坑内土体进行加固处理的工艺技术,目前主要有双液注浆、深层搅拌(双头或三轴SMW工法)及高压旋喷(二重管、三重管及双高压大直径)水泥土加固工艺。根据加固工艺和加

固设计形式的不同,通过坑内地基改良或“先行地中梁”的作用可有效控制和减缓基坑开挖面以下的土体变形。再结合时空效应法开挖施工技术可有效地控制每层土体开挖后的基坑侧向变形和基坑的总变形,从而减小坑周土体和地表的沉降变形。这是采用时空效应法开挖施工并结合坑内土体加固控制变形的设计原理。

对于逆作开挖条件下变形控制要求严格的一级基坑,结合坑内裙边式抽条加固并采用时空效应法开挖施工是控制基坑变形,保护周围环境的有效方法。具体的施工方法就是分层、分块。先盆式开挖基坑中部土体,浇筑基坑中部逆作楼板时用作地模的临时混凝土垫层,坑边四周留土堤挡墙,留土坡顶宽度 $>3h$ (h 为开挖一层土体的高度),再分块开挖盆边土。对于坑边留土挡墙的土堤结合裙边式抽条加固,采用分块开挖。通过边坡土体的分块开挖、分次卸载,加固土体与垫层支撑作用的交叉互换,既减少了围护结构无支撑的空间,也缩短了基坑无支撑的暴露时间,从而抑制了土体的变形发展,有效地控制了基坑的卸载变形。

2 逆作开挖基坑控制变形的实践

以下结合“上海城市规划展示馆”的工程实践来阐述逆作法施工条件下结合坑内加固采用时空效应法开挖控制基坑变形的设计、施工方法。

2.1 工程的特点及变形控制要求

“上海城市规划展示馆”位于上海人民广场,地上6层、地下2层,基坑开挖11.5 m,与地铁一号线人民广场车站及区间隧道相邻,是上海市1998年第10号重大工程。该工程的基坑变形要求小,地铁保护要求高,施工工期要求短,工程质量要求严,图1为上海城市规划展示馆建筑示意图。



图1 上海城市规划展示馆建筑示意图

Fig. 1 The photo of Shanghai Urban Planning Exhibition Center

上海城市规划展示馆地下室基坑东西向63 m,南北向45 m,基坑基地面积约为 3000 m^2 ,基坑开挖深度11.5 m。尽管基坑工程规模较小,但周边设施众多,变形控制要求严格。基坑南侧为人民大道,西侧为上海市人民政府所在地,北侧为人民公园,四周下有各

种管线。基坑东侧紧邻已运营的地铁一号线区间隧道和人民广场地铁站，与基坑平行相邻的地铁区间隧道长度约为 25 m。基坑距隧道最近处约为 7 m，隧道洞顶埋深为 7 m，距隧道上方 5 m 处还有 11 万伏高压电缆，基坑坑底比隧道洞顶低 4 m。而且基坑东侧中部邻近区间隧道与车站端头井的刚柔结合薄弱接口，此接口要求差异变形小于 5 mm。因此，根据此工程周围环境和地铁保护要求，确定基坑邻地铁侧的围护结构最大侧向变形必须控制在 20 mm 以内，按一级基坑保护等级实施设计和施工。图 2、3 为基坑与运营地铁车站及区间隧道关系的平、剖面图。

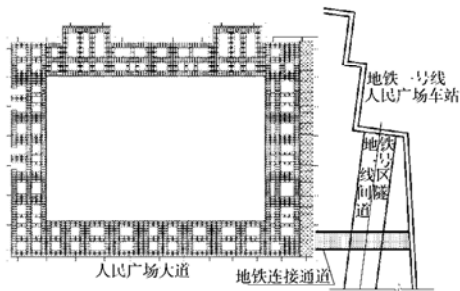


图 2 基坑及坑内加固与地铁设施关系平面图

Fig. 2 The plan of the excavation and the metro structure

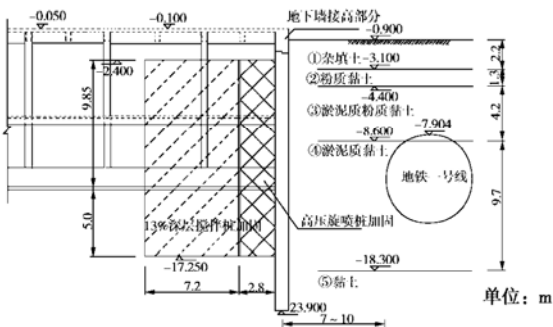


图 3 基坑及坑内加固与地铁运营隧道关系剖面图

Fig. 3 The section of the excavation and the metro tunnel

2.2 基坑逆作开挖的方案总体设计

(1) 施工方式及围护设计

由于该工程为上海市重大工程，要求工程施工工期短，但周边地铁设施保护要求高。为此，经方案总体设计研究比选后，采用了全逆作的施工工法。围护结构采用地下墙二墙合一，根据变形控制要求及主体结构的需求，邻地铁侧的地下墙采用 1 m 厚，深 23 m，其它三侧为 0.8 m 厚，深 23 m。

为控制基坑变形，方案总体设计中，对基坑卸载进行了预测分析。本工程地下室顶板至中楼板层高为 7 m，中楼板至底板垫层竖向间距为 5 m，由于采用逆作法施工，按以上条件进行计算得出的侧向变形预测值不能满足变形控制的要求（见图 4）。而且由于逆作法暗挖施工，与明挖顺作法相比开挖出土时间相对较

长，为满足围护墙的侧向变形控制要求，设计中采用了坑内土体加固技术。

(2) 坑内土体加固设计

本工程的坑内土体加固工艺采用了深层搅拌与三重管高压旋喷相结合的加固技术。并针对基坑四周不同的变形控制要求，采取了不同的坑内加固形式。首先在坑内四周进行了坑底裙边式格栅状 5 m 厚搅拌桩加固，加固宽度为 7.2 m，水泥土搅拌桩设计强度指标 $q_{u28} \geq 1.0$ MPa；靠地铁侧加固宽度为 10 m，增加了 2.8 m 宽高压旋喷加固咬合地连墙和搅拌桩，高压旋喷桩设计强度为 $q_{u28} \geq 1.5$ MPa，黏接咬合强度为 0.15 MPa。由于地下室楼板间层高较高，为防止一次开挖导致围护结构变形过大，结合时空效应开挖，坑底以上采用裙边式抽条加固至地面，这部分的加固宽 3 m，间隔 3 m，长分别为 7.2 m 和 10 m。坑内土体加固设计的形式及布置见图 2、3。采用以上加固后的基坑邻地铁侧的地连墙最大侧向变形计算预测值为 16.86 mm，见图 4，可满足基坑变形控制要求。

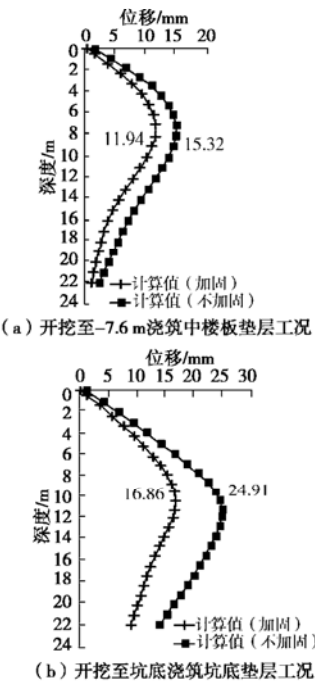


图 4 加固与不加固侧向变形计算预测值比较

Fig. 4 The calculated deflections with and without the ground reinforcement

(3) 时空效应法开挖施工参数设计

“分层、分块、对称、平衡、限时开挖和浇筑垫层”是逆作条件下时空效应法开挖的施工原则。根据文中提出的逆作开挖条件下采用控制基坑变形的原理方法，结合坑内加固布置，开挖采取先盆式开挖浇筑中部垫层（C 区垫层）；将土堤分成 A、B 块，先快速掏挖未加固的 A 块，并限时浇筑垫层至地连墙，同时

与基坑中部（C 区）已形成的垫层对接受力，作底撑及时控制基房地连墙的侧向变形。在掏挖分块土体（A 块）的同时，经过土体加固的 B 块暂不挖除，用以支挡地连墙，减缓基坑卸载变形的发展。待 A 块垫层浇筑完发挥支撑作用后，再开挖 B 块，浇筑垫层与先期浇筑的 A 块垫层和 C 区垫层成为整体后共同受力限制基坑变形发展，时空效应法分步、分块开挖及垫层浇筑示意图 5，6。

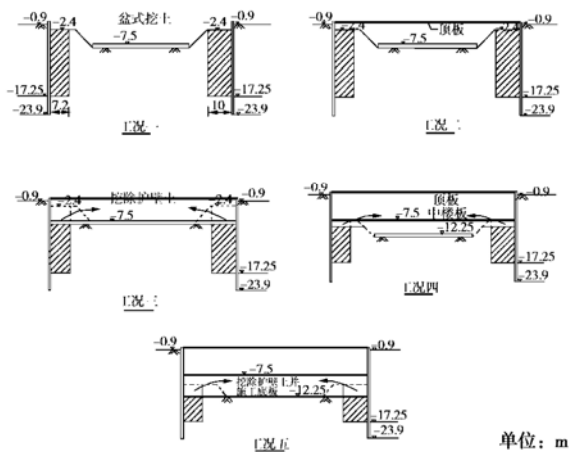


图 5 结合坑内加固布置的时空效应逆作开挖施工顺序示意图
Fig. 5 Steps of top-down excavation construction with time-space effects method combining with the ground reinforcement

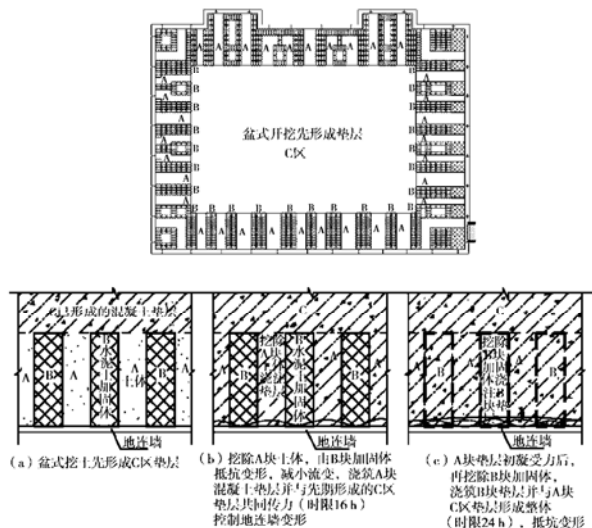


图 6 结合坑内加固布置的时空效应分块开挖原理
Fig. 6 Time-space effects in block excavation combined with the ground reinforcement

时空效应开挖施工设置的施工参数为：A 块开挖宽度 $B_1=3\text{ m}$ ，从开挖至垫层浇筑完成的时限 $T_{\text{H}}=16\text{ h}$ ；然后再限时开挖加固体（B 块），浇筑垫层，相应的施工参数为开挖宽度 $B_1=3\text{ m}$ ，时限 $T_{\text{H}}=24\text{ h}$ 。

（4）基坑开挖变形的计算预测分析

根据以上方案总体设计和具体的地连墙、坑内加固以及时空效应法开挖步序和施工参数，对本工程逆

作开挖条件下基坑各分步开挖工况下的卸载变形进行了计算预测分析，计算中对采用坑内加固和不采用坑内加固分别进行了计算分析对比。

基坑侧向变形计算预测采用弹性杆系有限元进行分析，计算中土体加固后的侧向基床系数 K_b 取值考虑了时空效应开挖的作用以及加固后土体力学指标的提高并参考了相似工程实测变形数据反分析的结果。因此，计算中的 K_b 值是结合坑内土体加固采用时空效应法开挖作用的综合等效侧向抗力系数。

图 4 为邻近地铁运营隧道的“上海城市规划展示馆”深基坑各分步开挖工况下采用坑内加固和不采用坑内加固的地连墙侧向变形计算预测曲线对比。通过图 6 计算预测变形对比可见：当基坑开挖至 -7.6 m 中楼板垫层形成时采用加固的地连墙侧向变形预测值为 11.94 mm ，不加固的为 15.32 mm 。基坑开挖完成时采用坑内加固的地连墙侧向变形计算预测最大值为 16.86 mm ，而不采用坑内加固相应的变形最大值为 24.91 mm 。采用坑内加固工艺并结合时空效应法开挖施工，地表 4 m 以下基坑围护结构侧向变形计算值比坑内不加固的减少了 $30\%\sim 50\%$ 左右，从而满足了基坑变形控制要求。

（5）分级控制变形的动态设计和信息化施工

基坑开挖施工中实施信息化施工的监测、监控。并对每步开挖的变形值、变形速率根据每步开挖的变形计算预测值（见图 4）设置变形和变形速率警戒值，通过分级定量控制基坑开挖各阶段的侧向变形，及时调整下一步序的施工参数，从而达到变形控制的目标。图 7 为地铁相邻的基坑及地铁设施的有关变形监测点布置图。W1~W5 为埋设于地连墙内的测斜管。D1~D12 为地铁下行线水平位移监测点，U1~U12 为地铁上行线水平位移监测点，均设于区间隧道内的管片上。

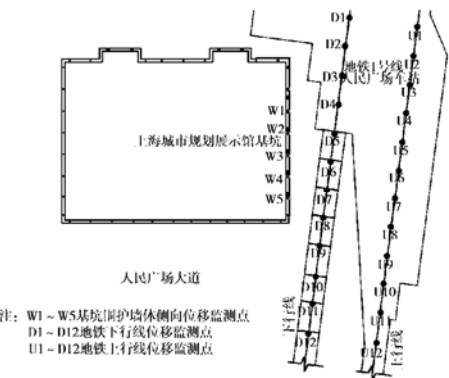


图 7 地铁相邻的基坑及地铁设施的有关变形监测点布置图
Fig. 7 The arrangement of monitoring points

2.3 基坑变形控制的成果

通过时空效应开挖与坑内加固的结合，严格按照

时空效应法设置施工参数进行开挖，施工中实施信息化施工的监测监控，动态设计管理，最终将邻近地铁区间隧道侧的地连墙最大变形控制在 18.7 mm。实测值与计算预测值基本吻合，变形实测与计算预测值的对比见图 8。地铁区间隧道的附加变形影响最大值为 4 mm，车站端头井与区间运营隧道接口处的变形控制在 2 mm 以内（D5 测点），成功地保护了运营地铁的安全。图 9 为地铁下行线隧道水平位移实测曲线。

应用以上的设计施工技术，在满足控制基坑变形保护地铁的同时，也大大缩短了施工总工期，从开挖至结构封顶仅用 6 个月，相比顺作方案节约了近 1 / 3 工期，确保了市重大工程的如期竣工使用。图 10 为施工现场实景。

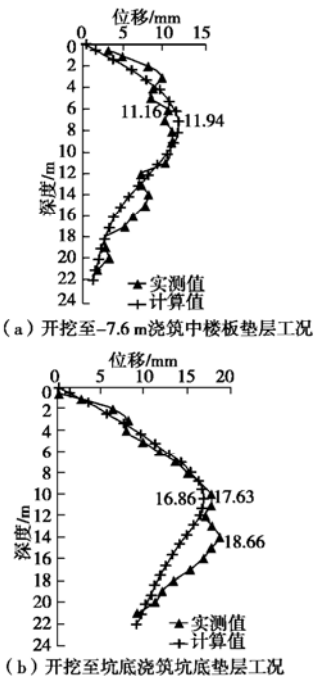


图 8 各分步开挖工况下侧向变形实测值与计算预测值
Fig.8 The calculated and monitored values of deflection

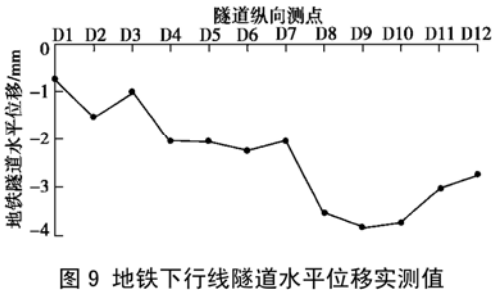


图 9 地铁下行线隧道水平位移实测值
Fig. 9 The monitoring value of lateral deflection of metro tunnel



图 10 施工工况现场实景

Fig. 10 The photos of in-situ construction

通过“上海城市规划展示馆”的基坑工程实践，较完整地形成了逆作施工条件下坑内加固与时空效应法开挖相结合，运用动态设计、信息化施工，有效控制基坑变形的设计施工系列技术。上海其它逆作开挖的基坑工程中，例如“上海城市机场航站楼”、“民德大厦”等基坑工程，也采用了本文提出的控制基坑变形的设计施工方法和技术，保护了周边地铁和设施。由于该系列技术具有较好的社会效益和经济效益以及一定的推广价值，因此，“上海城市规划展示馆”工程被建设部评定为全国新技术应用模范工程，也获得了 1999 年度上海优质建筑工程白玉兰奖，同时在该工程实践应用中形成的逆作施工条件下控制基坑变形的设计方法也获得了 2000 年（部级）优秀设计奖。

3 结 语

本文结合“上海城市规划展示馆”深基坑逆作开挖的工程实践，探讨分析了深基坑正逆作开挖的适用条件和特点以及逆作开挖条件下控制深基坑卸载变形的方法和原理。在深基坑逆作开挖工程实践基础上提出的基于软土时空效应原理并结合坑内土体加固控制基坑卸载变形的开挖方法和技术，可为我国沿海软土地区深基坑工程的设计、施工提供交流和参考。

参考文献:

[1] DGJ08-11-1999 上海市工程建设规范 - 地基基础设计规范 [S]. 1999. (DGJ08-11-1999 Foundation design code of Shanghai[S]. 1999. (in Chinese))

[2] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 35 - 36. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 35 - 36. (in Chinese))