

地下连续墙深基坑开挖综合特性研究

徐方京 谭敬慧

(同济大学地下系, 上海, 200092)

文 摘 本文在前人研究成果及笔者近年来工作的基础上, 对软土地基地下连续墙作挡墙的深开挖理论进行了较为详细的研究, 包括基坑周围地层变位机理研究、地表沉降与墙体侧移的预估、稳定性与地表沉降的关系、支撑轴力的预测、改善基坑受力及变形特性的具体施工措施和现场实测结论等等。本成果可供软土地区深基坑开挖的性态分析作参考。

关键词 地下连续墙, 深开挖, 地表沉降, 支撑轴力。

1. 引言

有关基坑开挖方面的研究成果与实测资料十分丰富, 从最初采用的木板支撑发展到钢板桩、混凝土排桩直至现代工程先进的地下连续墙支撑工艺。开挖深度从最初的几米增加到目前的几十米。施工方法除了传统的正作法外, 还开发了逆作法, 并辅以一些加固等特殊施工措施(如水下开挖、预先降水等)。基本上可以保证在开挖过程中不至因地层移动而对周围管线及建筑群产生破坏作用。尽管有这些措施, 事故仍时有发生。因此除了应在理论上对开挖中地层移动、土性变化进行深入研究外, 还应在施工中对新型支挡体系加强原体观测, 取得反馈资料, 作到信息化施工。钢板桩的基坑开挖, 地表变形有二种(如图1(a)(b)), 一般由Peck公式及其修正法确定(如图1(c))。地下连续墙施工自1950年在意大利米兰获得成功, 柔性的挡墙逐步为刚性的连续墙所代替, 且大量应用于深、大软土基坑开挖工程中。人们采取各种方法, 对地下连续墙支撑体系的变形、稳定, 地层的变形、破坏模式以及不同施工方法对地表沉降的影响等进行了一系列研究。采用的方法不外是: ①解析法; ②数值分析法; ③统计方法; ④工程经验法; ⑤离心试验及小型模型试验; ⑥实测方法, 等等。本文在综合前人研究成果基础上, 针对上海软土中深开挖的工程实践, 对墙体与土体行为的综合特性, 如: 变位、沉降、隆起、支撑轴力、系统稳定性以及地层力学特性等进行综合探讨。

2. 深基坑变形机理研究

基坑开挖过程是基坑开挖面及挡墙面水平方向的卸荷过程。由于卸荷作用引起坑底隆起

变形, 地下墙体在两边压力差作用下产生水平侧移, 当墙体入土深度不足, 或挡墙刚度不足时, 会因开挖面内外四周土体产生过大的塑性区而引起基坑局部或整体失稳。且其变形行为是随开挖深度增加而逐步恶化的。影响变形的因素, 一般可归纳为如下六类:

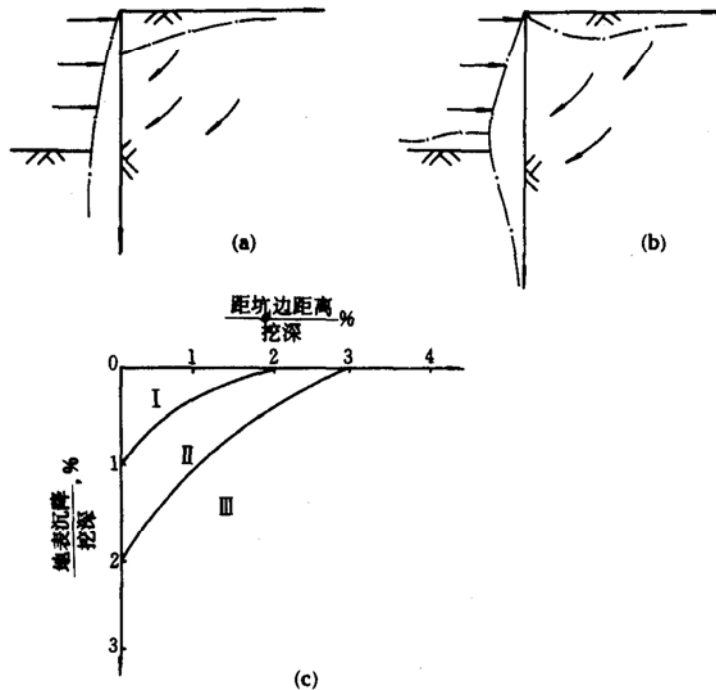


图1 地表沉降类型及估算

- (1) 基坑的几何尺寸: 挖深 h , 开挖宽度 B , 挡墙深度 H 及宽度 D , 开挖形状与开挖过程。
- (2) 土体及地下水条件: 土体强度与刚度, 地下水位。
- (3) 挡墙的性能: 刚度及挡墙建造方法。
- (4) 支撑性能: 支撑种类, 预应力大小, 支撑道数与位置。
- (5) 荷载条件: 超载, 交通荷载, 周围建筑群与管线荷载。
- (6) 施工工艺: 分段开挖, 加支撑滞后时间, 基坑暴露时间、地下连续墙接缝漏水情况。

基坑开挖中有三种宏观表现: 基坑隆起、墙体侧移、地表沉降。由于土的流变特性造成这三类变形。基坑开挖的直接结果产生土体隆起并造成坑内外土体作用于连续墙的压力不平衡, 迫使墙体发生向坑内的侧移来建立新的平衡。从而使坑内侧土体作用于墙体的土压力趋向于被动土压力, 而墙外侧土体作用于墙体的土压力趋向于主被土压力。由于墙体侧移并不均等, 故土压力的分布并不是按线性关系分布的。同时因土拱效应, 墙外侧土压力会趋于均匀。墙体侧移的结果是坑外土体也发生变形, 并产生墙体侧移位移协调(在接触界面)变形。形成附加应力, 产生塑性区。变形的效果逐步传至地面, 形成地表沉降。如果连续墙与土体接触的界面间还存有浇捣水下混凝土时未被置换出来的一层泥皮, 连续墙在开挖中会因泥皮不能提供足够托力(摩擦力)而产生沉降, 并与土体发生错动。基坑隆起的原因除了卸载外, 还由于坑内侧开挖面以下土体受到挡墙的挤压作用的结果。通常情况下, 隆起的量级介于墙体侧移与地面沉降之间, 并且是地层移动的直接诱导因素。只有通过增加连续墙入土深度,

才能提高抗隆起稳定性,改善基坑的受力特性。一般的地铁车站深开挖工程,入土深度取开挖深度的0.6~0.8倍,如附近有建筑物,可适当增加入土深度。

坑外地层移动影响的范围,一般认为水平及垂直方向是开挖深度的2.0~3.0倍。这块见方范围内土体(平面应变),其性能随开挖深度而变化。根据我们在上海地铁站台建设(开挖)中的实测,发现土体中的侧移要小于挡墙的水平位移,土层中深度沉降要小于地表沉降,且距基坑边及地表越远,趋势越减小,说明在这块范围内,各点应力水平及路径是不相同的,具体分析各点变位时,应该采用具有典型意义的应力路径,确定土性参数。此外,根据我们对超孔隙水压力实测的结果^[1],发现在同一垂直截面上不同深度的超孔压,在开挖结束后,开挖面以上的已消散完毕,开挖面以下的超孔压要维持很长一段时间的负值才能消散为零,即坑内出现回弹现象,并伴随有坑外地表沉降。所有这些现象要求根据具体情况,采用不同应力路径及试验排水条件来确定土性指标。

3. 地表沉降及墙体侧移的估算

软土中深开挖坑外地表沉降的分布有两种类型,见图1(a)(b)(对连续墙而言也如此),其中(a)表明墙体发生大变形,其施工状况不及(b)类小变形。对这二类沉降的估算,长期以来一直采用经验法,并根据施工状况,乘以某一系数。本文提出采用统计法对(b)种变形情况下的地表沉降以Rayleigh分布来描写并计算。经过大量的实测发现:此类地表变形在距坑边某点达极大值,故地表沉降可表示为Rayleigh分布函数

$$S(x) = (V_s \cdot x \cdot \exp(-x^2/2i^2))/i^2$$

式中 i 为极大值位置, V_s 为各步开挖引起的坑外地层损失, x 为距坑边的位置坐标。

$S(x)$ 具有良好的性态,可无穷次求导与求积,在 $x=i$ 处, $S(x)$ 达极大值即 $S_{\max} = 0.61 V_s / i$; 在 $x = \sqrt{3} i$ 处,曲线有拐点,为了能求解地表沉降的表达式,必须确定 V_s 及 i 值。当挖深 h 越大, V_s 也越大,开挖宽度 B 值越大, V_s 值也越大; 记 $V_d = B \cdot h$, 那么 $V_s \propto V_d$; 当开挖土层较好时, V_s 与 C_u 成反比, 令 $N_t = \gamma h / 3 C_u$, 经过统计^[1], 我们找到了 N_t 与 V_s / V_d 以及 Zh/H 与 $2i/h'$ 的关系, 如图2(a)、(b)所示。此公式能预估正常施工条件下的地表沉降, 其中 C_u 的选取为各成层土层 C_u 的厚度加权平均值。使用时要注意。

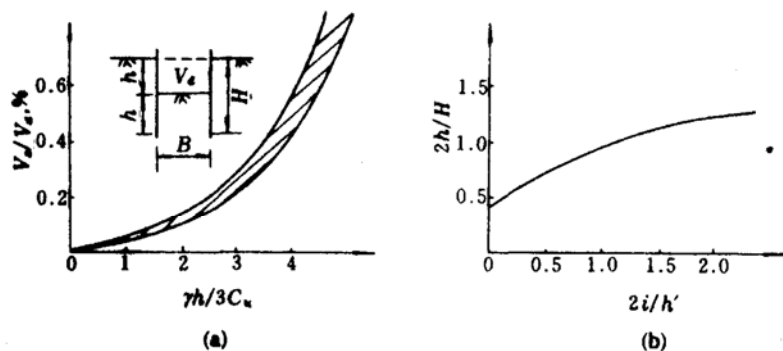


图2 地表沉降的预估

(1) 施工中的因素变化要合理地归入到 C_u 的变化中。

(2) 如果墙与土层间有泥浆存在, 应计入墙体沉降 S_0 中;

$$S_0 = (1.0 \sim 1.5)h/1000$$

(3) 考虑固结效应, 应计入固结因子 $\delta_t = 1 + \exp\left(\frac{-t}{1000}\right)$, t 为开挖完成后的天数。

(4) 该公式中没有考虑墙体厚度及支撑的影响, 计算时根据实际情况酌情考虑影响因子。

为了验证公式的准确性, 考查其相对精度, 我们用该公式分别对上海地铁及德国 Hannover 地铁的站台开挖工程分别进行了预测^[1]。发现结果具有较高的精度。作为实例, 我们给出预估与实测结果。

[例] 衡山路地铁工程: $H=28.0\text{m}$, $B=22.0\text{m}$, $h=15.0\text{m}$, $h'=13.0\text{m}$, $\gamma=1.8\text{t/m}^3$, $C_u=30\text{kPa}$, 当挖到 $h=15.0\text{m}$ 时, $V_d=B \cdot h=330\text{m}^2$, $N_t=3.0$, $2h/H=1.07$, $S_0=1\% \cdot h=0.015\text{m}$ 。

查表: $V_s/V_d(\%)=0.25$; $V_s=0.3\% \cdot V_d=0.83\text{m}^2$; $2i/h'=1.25$, $i=8.13\text{m}$

那么: $S(i)=0.61V_s/i=0.062\text{m}$; $S_{\max}=S(i)+S_0=0.077\text{m}$

实测值 $S(i)$ 为 0.075m , 最大沉降位置在 $8.0 \sim 10.0\text{m}$ 之间。有了地表沉降预估方法, 我们可得墙体侧移表达式, 基本假定如下: ①墙体变形所包裹的体积等于 V_s ; ②墙体侧移在开挖面 h 处, 达到极大值; ③墙体变位可用如下公式表达:

$$w(y) = \begin{cases} l_m(2hy - y^2)/h^2, & y \leq h \\ l_m e^{-2(y-h)/h}, & y > h \end{cases}$$

其中, l_m 为发生最大变形的数值, 最后得 $l_m=0.77V_s/h$ 。同样, 用此公式进行了具体预测^[1], 如对 Hannover 地铁工程, 预测 $l_m=24.5\text{mm}$, 而实测为 $22.0 \sim 25.0\text{mm}$ 。若最大沉降危及安全, 必须事先加固。

4. 地表沉降与基坑稳定性关系

工程实践关心的是如何根据实测的坑外地面沉陷来推算基坑稳定程度。即建立起变形与稳定性的关系。从力学上讲, 两者历来都是脱节的, 不仅最终临界点是如此, 在整个过程中也是如此。若采用突变理论, 可以建立它们在临界点处相互联系的代数关系, 但却不能用于正常的稳定性判据中。本文利用前部分所叙述的地表沉降算法及基坑稳定系数的 Prandtl 算法, 分别对 14 个工程进行了统计^[1], 得出它们间的相互关系, 见图 3。

对正常开挖基坑, 要求 $K_s \geq 1.2 \sim 1.3$, 若取 $K_s=1.25$, 查表得, 当 $S_{\max}/h \geq 1.1(\%)$, 即 $S_{\max} \geq 1.1h(\%)$ 时, 说明基坑开挖面土体受力状态恶劣, 可能会产生抗隆起失稳现象, 必须对坑底土体进行加固、或者多加支撑等。仍以

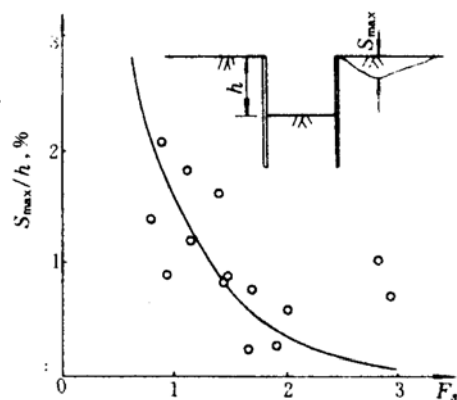


图3 地面沉降与稳定性关系

衡山路地铁开挖工程为例, $S_{\max} \geq 1.1h(\%) = 0.165\text{m}$, 施工中, 最大地面沉降必须控制在此范围; 否则必须事先加固。

5. 支撑轴力的计算

支撑的目的就是为了减小连续墙内外水平向压力差, 使得墙体变形不致于形成过大侧移, 并保证基坑的稳定性。因此, 及时施加支撑是绝对必要的, 它可以大大缓解连续墙与土体的受力情况。支撑轴力分为临界轴力及工作轴力。

5.1 临界轴力 P_{cr}

临界轴力是指基坑变形引起支撑轴向受压直至屈服时的压力, 其计算可采用二端铰支压杆稳定公式

$$P_{cr} = \pi^2 EI / B^2 \quad (E \text{ 为支撑刚度系数})$$

对上海常采用的圆钢管支撑: $I = 8\bar{d}^3 t \pi$ 。当 $t = 0.015\text{m}$, $\bar{d} = 0.6\text{m}$, $B = 22.0\text{m}$ (人民广场工地), 得 $P_{cr} = 520\text{t}$, 取工作安全系数 $n = 2.0 \sim 2.5$, 则 $[P] = 280 \sim 260\text{t}$ 。由于计算中没有考虑临近支撑的影响, 结果偏安全。

5.2 工作轴压力估算

通常采用预估工作轴压力方法都是采用Terzaghi与Peck1967年提出的轴压力包络线算法。以此方法, 取 $m = 1.0$, 分别计算上海地铁人民广场及漕宝路车站深开挖工程的支撑轴力, 如图4(a)、(b)所示。与实测对比, 结果偏低。

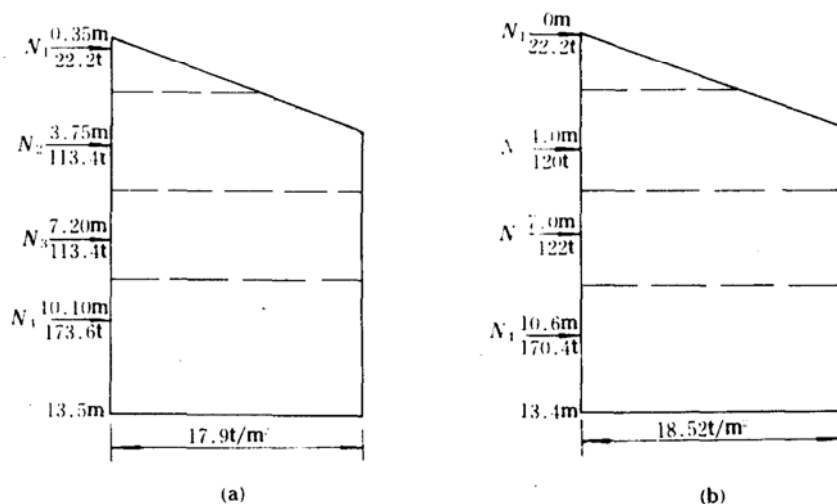


图4 轴力计算法

6. 改善基坑变形及提高稳定性的施工措施

从目前施工水平来看, 改善基坑变形及提高其稳定性的方法主要有如下几种: ①基坑内降水; ②水下开挖; ③坑内侧土体加固, 如化学注浆、石灰桩加固等。在上海地区常采用降水及注浆加固二种方法^[1]。这些辅助工法采用后, 都在不同程度上改善了基坑、墙体的受力

特性。B.Broms曾用FEM分析了这些辅助工法所产生的效果,发现地面沉降减小约30%~60%,尤其以基坑内化学注浆效果最为明显^[2]。

基坑降水深度建议设计至基坑底面下4~6m,墙底上3~4m,当坑底遇到粉砂或有承压水时,降水效果明显。根据上海已有的经验,降水后一个月,坑内土体 C_u 值可提高30%,由此根据前述地面沉降公式,降水后坑外沉降将减小约30%以下。采用水下开挖后,挖去的深度 h 又为高 h_w 的水所回填,这样实际的挖深(净)为 $h_1 = (\gamma_{\pm} - \gamma_w) \cdot h / \gamma_{\pm}$,然后用 $S(x)$ 表达式同样所计算各次开挖后地表沉降。采用坑内土体加固方法的目的也在于提高土体 C_u 值。加固后沉降减小,抗隆起稳定性增加。沉降的大小应根据具体加固效果加权平均选取 C_u 后来计算。

基坑开挖引起的一系列土性、墙体变形的变化,很大程度上依赖于施工技术。文献[3]给出了21条合理开挖和管理保护措施及纵向变形公式,是保证减小地表变形的宝贵经验。

7. 结 论

本文较粗略地论述了地下连续墙为挡墙的基坑开挖引起地层移动、墙体侧移、轴力预估、稳定性验证及辅助工法对开挖的影响,可供施工人员及方案设计人员参考。

参 考 文 献

1. 徐方京, 软土盾构隧道与深基坑开挖的孔隙水压力与地层移动分析[博士论文]. 上海: 同济大学, 1991-08.
2. Broms B B. Design and Construction of Anchored Strutted Sheet Pile Walls in Soft Clay. Nanyang Technological University, Singapore, 1989.
3. 刘建航. 地下墙深基坑周围地层移动的预测和治理之一。地下工程与隧道, 1991, (4): 2~15.

General Behaviours of Deep Excavation with Diaphragm Wall as Retaining Wall in Soft Clay

Xu Fang-jing Tan Jinghui

(Dept. of Geotechnical Engineering, Tong Ji University)

Abstract Results of research on deep excavation with diaphragm wall as retaining wall in soft clay is presented, which include mechanism of ground displacement around pit, prediction of ground settlement and lateral movement of wall relationship between ground settlement and stability, estimation of axial forces in struts and relevant construction methods which can improve the loading condition and deformation of excavation. The results can be used as reference for the analysis of deep excavation in soft clay.

Key words diaphragm wall, deep excavation, ground settlement, strutted force.