

文章编号: 1000-7598-(2007)06-1212-05

顶管矩形工作井复合式后背墙反力分布研究

毛海和

(北京城建设计研究总院有限责任公司, 北京 100037)

摘 要: 顶管工作井在顶进施工过程中受力复杂, 主要表现在: 确定千斤顶推力在内部结构、围护结构和后背墙外侧土体之间的作用力是如何传递, 土体变形对墙背土体抗力发挥的影响以及其对结构内力计算分析的影响。对现有顶管工作井计算方法进行归纳基础上, 通过对工程算例建立数值计算模型, 求证了后背墙各部分反力在宽度和深度方向上的分布规律, 为探求一种合理简化更加接近实际的顶管复合式后背墙结构计算方法提供参照。

关 键 词: 顶管; 土体变形; 复合式后背墙; 反力分布; 平面应变; 结构分析

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Reaction distribution investigation and structural analysis of composite thrust wall of rectangular pipe jacking shaft

MAO Hai-he

(Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: The thrust wall is a very important component of rectangular shaft; its stress and strain are both fairly complex when it suffered the thrust of pipe jacking. How to make certain the thrust force, which is transmitted from internal lining of working shaft to external soil mass, is quite significant; how much will the soil pre-deformation affect, and these results directly affect the calculation accuracy of retaining structure and internal lining of working shaft. By using numerical modeling analysis method, the thrust force transmission pattern is found; and the reaction distribution in the depth and width direction of the thrust wall is calculated; then the internal forces of each components of the thrust wall are ascertained on the basis of known reaction distribution analysis. This paper offers references for calculating pipe jacking thrust wall according to rational simplification and approximate hypothesis.

Key words: pipe jacking; soil deformation; composite thrust wall; reaction distribution; plane strain; structural analysis

1 引 言

顶管工法是一种非开挖技术, 适应能力很强, 大量应用于城市基础设施建设。断面尺寸从小到大, 为适应各种用途, 其形状从圆形发展到矩形(往往用于人行通道工程), 工法自身发展成顶管掘进法(顶管-盾构结合)^[1-4]。

为了满足大断面顶管施工需要, 顶管工作井(始发井, 下同)的平面尺寸也变得越来越大, 工作井后背墙需要承受的千斤顶推力由原来的 $10^2 \sim 10^3$ kN 级增加到 10^4 kN 级^[5], 后背墙是工作井设计的核心内容^[6], 必须确保整个顶进施工过程的安全可靠。现有的工作井设计计算方法主要为后背墙土抗力平衡法, 设计的工作井以沉井为主, 后背墙的

设计主要是考虑井壁与土体之间的直接相互作用, 大致基于以下假定^[6-8]: (1) 不考虑土体变形影响; (2) 不考虑(或考虑)井壁与土体之间摩阻力; (3) 后背墙侧土反力呈线性分布; 这里面有些是控制因素, 有些是次要因素。后背墙的设计必须有可靠的强度、刚度与稳定性, 同时达到经济合理的目标。因此, 有必要对其影响设计的各种因素进行探究。

2 墙背土体变形分析

根据土压力的概念, 其性质与土体位移的方向和大小都是紧密相关的^[9]。对于较大平面尺寸的工作井一般都采用明挖顺序施工, 即先作围护结构, 包括后背墙外侧土体加固; 然后开挖土体架设多道支撑; 接着做内部衬砌结构。经过这些复杂的施工

工序后，后背墙内外侧的土体经历了卸载、加载二次固结的复杂应力-应变过程，见图1。在一定范围内，把土体假想成理想弹性体，其土体水平应力大小变化遵守下面不等式^[10]：

$$p_a \leq p = p_0 + K_h \delta \leq p_e \quad (1)$$

式中： p 为土体水平应力； p_0 为静止土压力； K_h 为土体水平刚度系数； δ_h 为土体水平位移，向坑外为正； p_a 为理论主动土压力； p_e 为理论被动土压力。

根据以往工程经验总结，达到产生主动和被动

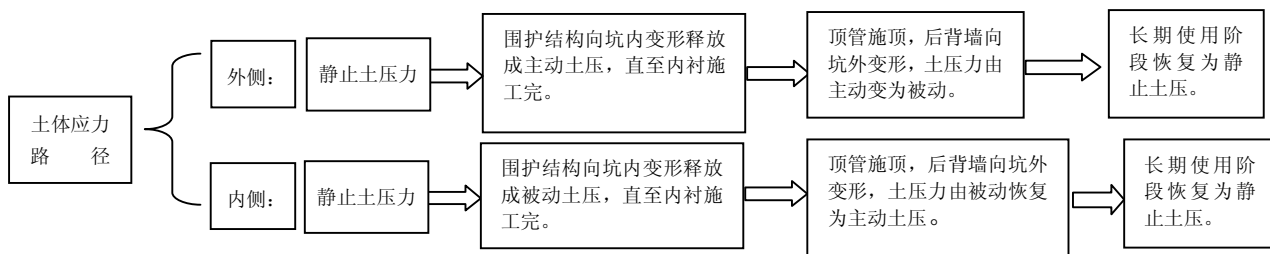


图1 后背墙内外侧土体应力状态路径
Fig.1 Stress path of soil inside or outside thrust wall

土压条件不但与位移有关，还与土的性质有关，见表1。后背墙两侧的土体处于何种应力状态需要结合土的性质和变形刚度要求综合判断。采用土抗力平衡法设计顶管后背墙时，应考虑到土体应力-应变状态对土体抗力发挥水平的影响。因此，假定不考虑土体性质对土体变形的影响来计算后背墙后土体抗力的发挥是不正确的。土体抗力按被动土压设计时考虑土抗力发挥水平的简便方法是：顶管施顶过程，在综合考虑后背墙结构强度、变形刚度与稳定性时，对被动土压力乘以一定折减系数 φ 作为土抗力，一般要按保护环境安全的变形和不影响结构正常使用的变形要求来控制， φ 的取值应该在对大量的实测工程资料和设计经验总结的基础上取值规范化。

表1 产生主动和被动土压所需的墙顶位移^[11]
Table 1 Essential displacement for inducing active or passive soil pressure^[11]

土类	应力状态	位移形式	所需位移
砂土	主动	平移或绕基地转动	0.001 H
	被动	平移	0.05 H
	被动	绕基地转动	0.1 H
黏土	主动	平移或绕基地转动	0.004 H
	被动	—	—

注：H 为墙高。

3 后背墙内衬分析

3.1 工程概况

以一矩形顶管工程（顶管截面为3 m×3 m）工作井为实例分析，工作井的内净空尺寸为9 m（长）×5.5 m（宽）×7.0 m（深），内衬结构顶板距地表2.1 m，土层及物性指标见表2。后背墙结构由3部

分组成：由外至内依次是搅拌桩加固土体、SMW工法桩围护结构和内衬。工作井采用明挖顺作法，顶管施工过程中千斤顶最大推力为8×1 500=12 000 kN。

表2 后背墙所处地层的主要物理力学性质
Table 2 Physico-mechanical properties of ground

土名	层厚/m	状态	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	e	w/%
淤泥质黏土	8	软塑	11.8	12.2	1.21	44.8
淤泥质粉质黏土	10	流塑	11.2	10.0	1.35	47.2

3.2 后背墙结构各部分之间的相互作用的有限元分析^[12]

工作井实体模型见图2，采用Sap2000v9版进行三维有限元计算：采用矩形板壳单元，单元面积为0.5 m×0.5 m，模拟工作井壁；采用一维杆单元模拟梁柱，单元长度为0.5 m，后背墙内衬与SMW工法桩（灌注桩）之间采用节点接触弹簧模拟两者之间的反力，有限元模型见图3。模型主要研究工作

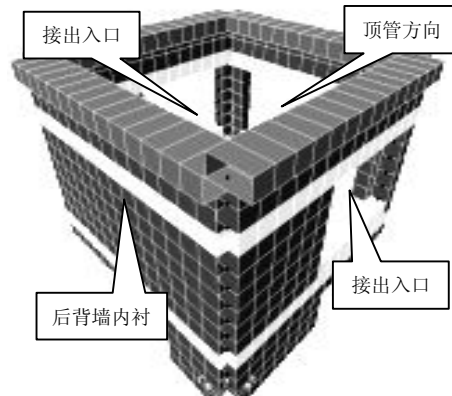


图2 工作井实体模型
Fig.2 Solid model of working shaft

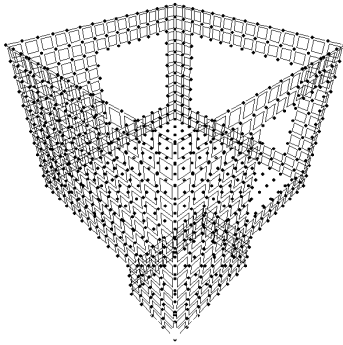


图3 工作井有限元模型
Fig.3 FEM of working shaft

井内衬结与围护结构之间的相互作用, 探求后背墙的在顶管施工期间的力学变形机制, 为其结构设计的合理简化提供依据。

程序计算所得的节点模拟弹簧反力(反力, 下同)见表3。将表中数据沿深度与宽度方向绘制成

节点弹簧反力空间分布图, 如图4反力宽度方向平面投影见图5。从反力分布图分析, 千斤顶产生的推力的传递形式是: 作用在内衬上的推力以梯形或三角形(如图4)作用于围护结构上, 然后围护结构上的线性分布荷载与后背墙外侧的土体抗力静力平衡。

从三维结构空间分析后背墙节点弹簧反力分布看来, 反力在工作井深度方向上呈梯形或三角形分布连续线性分布, 沿后背墙宽度方向呈近似均匀分布。同时也可以得出: 在小变形范围内, 后背墙在顶管推进方向上(x 方向, 坐标系见表3)位移与节点模拟弹簧变位是一致的, 则有:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_y &= 0 \\ \gamma_{xy} = \gamma_{xz} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

因此, 后背墙计算可简化为一平面应变问题进行分析。

表3 后背墙内衬节点模拟弹簧反力表
Table 3 Joint analogous springs' reaction for internal lining of thrust wall

y/m	不同深度(m)的 R_x/kN										
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
0.0	13.29	26.60	39.81	52.96	65.94	78.73	91.37	103.90	116.43	128.92	141.38
0.5	14.72	28.33	42.11	55.82	69.08	81.91	94.35	106.53	118.60	130.62	142.54
1.0	15.75	29.56	43.72	57.98	71.26	84.25	96.39	108.46	120.04	131.98	143.29
1.0	16.38	30.15	44.16	58.09	71.45	84.23	96.48	108.46	120.13	131.81	143.32
2.0	16.62	30.19	43.80	57.26	70.36	83.01	95.32	108.39	119.38	131.20	143.00
2.5	16.55	29.97	43.21	56.26	69.06	81.62	93.99	106.28	118.54	130.73	142.83
3.0	16.55	29.72	42.74	55.52	68.14	80.62	93.05	105.52	118.03	130.57	142.96
3.5	16.54	29.63	42.58	55.29	67.85	80.32	92.80	105.36	118.00	130.72	143.26
4.0	16.62	29.75	42.80	55.63	68.28	80.81	93.30	105.86	118.48	131.17	143.70
4.5	16.63	30.03	43.35	56.47	69.36	82.00	94.49	106.93	119.39	131.86	144.24
5.0	16.63	30.32	44.05	57.62	70.84	83.64	96.10	108.36	120.59	132.74	144.87
5.5	16.43	30.37	44.55	58.64	72.17	85.14	97.60	109.73	121.73	133.70	145.58
6.0	15.88	29.91	44.30	58.78	72.31	85.56	97.97	110.32	122.18	134.40	144.16
6.5	14.95	28.84	42.92	56.95	70.55	83.73	96.53	109.09	121.53	133.97	146.35
7.0	13.65	27.31	40.93	54.05	67.94	81.21	94.36	107.41	120.45	133.43	146.34

注: 设 x 为顶管推进方向; y 为节点沿宽度方向坐标, z 为节点沿深度方向坐标; R_x 为节点弹簧反力。

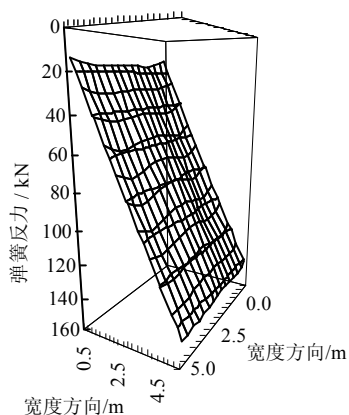


图4 后背墙节点弹簧反力空间分布图

Fig.4 Spatial distribution graph of joint springs' reaction

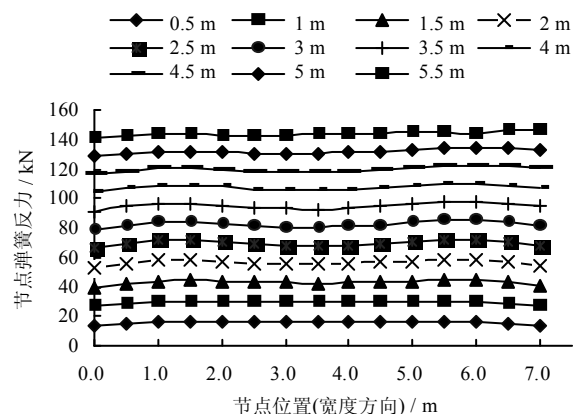


图5 不同深度节点弹簧反力在宽度方向的分布图
Fig.5 Width direction distribution graph of joint springs' reaction

3.3 按平面应变简化设计后背墙结构

取后背墙沿宽度方向一延米进行结构分析, 结构截面尺寸为: 工作井内衬壁厚 0.5 m, 底板厚 0.6 m, 顶管推进时计算简图见图 6。按平面一维杆件考虑, 采用 Sap84, 6.0 版本计算, 具体分析步骤如下。

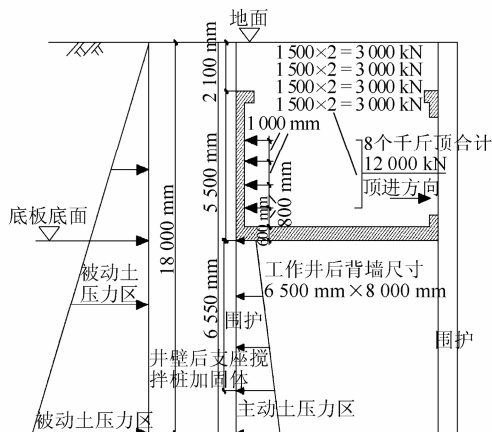


图 6 按平面应变后背墙结构计算简图

Fig.6 Simplified calculating diagram by plane strain hypothesis

(1) 根据弹性地基上梁计算内衬结构

作用于内衬基坑侧的荷载主要是顶进推力。后背墙内衬与围护之间接触弹簧按 20 MPa 取值, 弹簧为受压单向弹簧, 取内衬作为隔离体单独考虑, 计算所得的弯矩图如图 7 所示, 位移图如图 8 所示, 图中位移既包括弹性位移, 又包括刚体位移。位移图中虚线为按空间分析的线性结点位移图线, 两者相比按平面应变假定计算所得的位移是偏大的, 即反力亦偏大, 围护结构配筋或强度验算是根据分析得出的反力确定的, 因此, 平面应变计算的后背反力对设计围护结构安全储备系数更高。对于控制周边环境变形, 平面应变的结果显得更为保守, 对总体控制后被土体的隆起和水平位移是有利的。通过两者的结果分析对比误差在 3 % 以内。

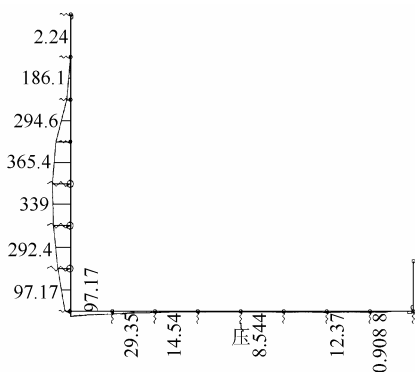
图 7 后背墙内衬弯矩图 (单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

Fig.7 Moment diagram of thrust wall lining (unit: kN·m)

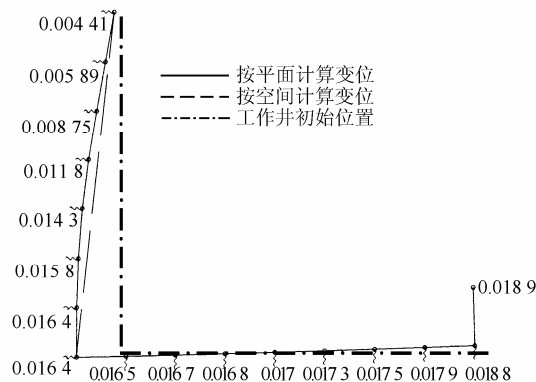


图 8 后背墙位移图 (单位: m)

Fig.8 Displacement diagram of thrust wall lining(unit: m)

(2) 围护结构计算

作用于围护结构内侧的荷载有：内衬传递给围护结构的推力荷载沿工作井竖向线性分布；底板下土的主动土压力。这里最为关键的是要合理确定桩长，桩长的控制因素有两种：一是基坑开挖阶段的基坑围护结构的稳定要求；二是顶管施工提供足够的抗力所需桩长。这里对基坑施工期间桩长要求不作详细讨论，主要分析顶管施工阶段的桩长计算。

前面分析得知, 抗力大小不能简单按被动土压取值, 环境保护和内衬结构变形要求使得土抗力达不到被动土压条件。另外, 必须控制在小变形范围内, 内衬背后反力符合线性分布的假定。根据设计经验, 通常在黏性土层中取极限被动土压的 50 % 作为有效抗力, 以此来估算围护桩的长度, 然后采用被动抗力土弹簧 (受压单向弹簧) 模拟进行数值计算所得的变形和内力值调整确定。计算所得桩长为 18 m (计算过程略去), 计算简图与内力图见图 9。

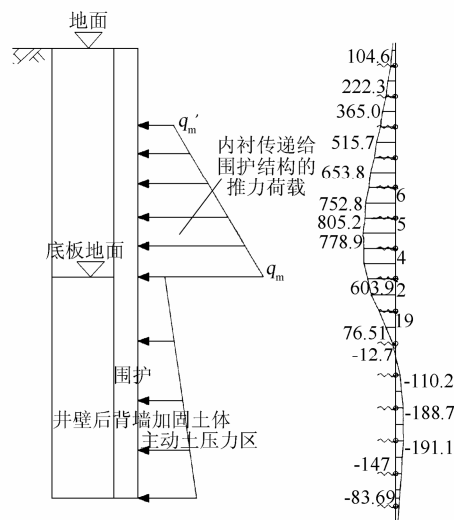


图 9 围护结构计算简图与弯矩图 (单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

Fig.9 Calculating model and moment diagram of retaining pile (unit: kN·m)

其中反力的计算如下: 根据静力平衡, 顶力和墙背反力应平衡, 根据力矩平衡有^[7]:

$$q_m = \frac{4FL - 6Fh}{AL^2} \quad (3)$$

$$q_{m'} = \frac{6Fh - 2FL}{AL^2} \quad (4)$$

式中: F 为千斤顶合力大小; L 为后座墙高; h 为千斤顶合力作用点到后座墙底端距离; A 为后座墙的宽度。

4 结 论

通过分析矩形顶管工作井后背墙在巨大推力作用下其荷载传递机制以及土体变形对抗力影响研究, 主要结论如下:

(1) 不考虑后背墙外土体变形以及应力路径计算其抗力是不正确的, 抗力的取值要综合考虑环境变形保护要求、后背墙结构变形要求以及土层性质。

(2) 通过数值分析得知: 在小变形范围内, 后背墙反力与变位沿工作井竖向承线性梯形或三角形分布。基于这一点, 后背墙结构受力可按平面应变问题处理, 从而大大简化了计算。

(3) 按平面应变进行结构分析使结构安全储备较高。

(4) 本文探求了对复合式后背墙的结构设计模式, 可供类似设计工作参考。

参 考 文 献

- [1] 陈天毫. 管道顶管施工技术[J]. 公路, 2000, (10): 57—59.
CHEN Tian-hao. Pipejacking construction technology for pipe lines[J]. **Highway**, 2000, (10): 57—59.
- [2] 熊焰. 北京的顶管技术发展回顾与展望[J]. 市政技术, 1994, (3): 49—52.
- [3] 唐元宁. 顶管技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 1994, (4): 17—19.
TANG Yuan-ning. Pipe jacking technology[J]. **Road Machinery and Construction Machinery**, 1994, (4): 17—19.
- [4] 任建文. 非开挖顶管施工技术[J]. 西部探矿工程, 2004, (1): 118—119.
REN Jian-wen. Pipe jacking trenchless technology, **West-China Exploration Engineering**, 2004, (1): 118—119.
- [5] 赖冠宙, 房营光. 顶管顶力的理论计算与分析[J]. 广东土木与建筑, 2003, (9): 45—47.
LAI Guan-zhou, FANG Ying-guang. Analysis and calculation of jacking forces in pipe jacking[J]. **Guangdong Architecture and Civil Engineering**, 2003, (9): 45—47.
- [6] 任凤明, 莫海鸿. 顶管工程中矩形工作井的应力与应变分析[J]. 广东土木与建筑, 2003, (6): 54—55.
REN Feng-ming, MO Hai-hong. Stress and strain analysis of rectangular shaft for pipejacking construction[J]. **Guangdong Architecture and Civil Engineering**, 2003, (6): 54—55.
- [7] 蒋燕, 葛春辉. 矩形沉井井壁受顶管后座力作用的分析[J]. 特种结构, 2001, (1): 1—3.
JIANG Yan, GE Chun-Hui. Stress and strain analysis of caisson shaft wall for thrust force in pipejacking construction[J]. **Special Structures**, 2001, (1): 1—3.
- [8] 方江龙, 宋丰文. 顶管工程后背墙设计[J]. 当代建设, 1994, (4): 17—19.
FANG Jiang-long, SONG Feng-wen. Thrust wall design for pipe jacking engineering[J]. **Current Construction**, 1994, (4): 17—19.
- [9] 蔡伟铭, 胡中雄. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [10] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [11] H·F·温特科恩. 基础工程手册[M]. 钱鸿缙, 叶书麟译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [12] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.