

文章编号: 1000-7598 (2013) 03-0757-05

深埋顶管顶力理论计算与实测分析

杨 仙^{1,2}, 张可能², 黎永索³, 彭环云², 黄常波⁴

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000; 4. 中建市政建设有限公司, 北京 100161)

摘 要: 针对管幕预筑法中深埋顶管顶力进行理论和实测分析。顶管顶力与垂直土压力密切相关。参照隧道开挖中垂直土压力的计算方法, 常用的垂直土压力计算理论有: 普氏理论和太沙基理论。在详细分析了这两种垂直土压力计算理论的适用性和缺陷之后, 结合普氏理论和太沙基理论, 提出了改进的垂直土压力计算理论公式, 并编写 MATLAB 程序计算改进理论公式的数值解。改进理论既考虑了土拱效应, 又考虑了拱下土体的扶持力, 更符合实际土体变形情况。将普氏理论、太沙基理论和改进的理论应用于沈阳地铁新乐遗址站管幕预筑法顶管工程中, 计算不同深度的两根大埋深管道顶力, 并把计算与实测结果进行比较, 发现普氏理论和太沙基理论计算结果都远大于实测值, 改进理论计算结果稍大于实测值, 更适合于深埋顶管顶力估算。

关 键 词: 管幕预筑法; 顶管顶力; 垂直土压力; 普氏理论; 太沙基理论; 改进理论; 实测顶力

中图分类号: U 25

文献标识码: A

Theoretical and experimental analyses of jacking force during deep-buried pipe jacking

YANG Xian^{1,2}, ZHANG Ke-neng², LI Yong-suo³, PENG Huan-yun², HUANG Chang-bo⁴

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, China;
4. China Construction Municipal Construction Corporation Limited, Beijing 100161, China)

Abstract: Theoretical and experimental analyses are conducted for the pipe jacking force of the great depth pipeline in pipe roof pre-construction method. The pipe jacking force is closely related to the vertical soil pressure. Reference to the calculation method of vertical earth pressure in tunnel excavation, there are two kinds of frequently-used theories to calculate vertical earth pressure in pipe jacking, i.e. M. M. Promojijfakonov theory and Terzaghi theory. After analyzing the adaptability and defects of the two kinds of theories, new modified theoretical formula based on M. M. Promojijfakonov theory and Terzaghi theory is got to calculate vertical earth pressure; and MATLAB program is written to calculate the numerical solution of new modified theoretical formula. Both the soil arching effect and the holding force under the arching of soil are considered in modified theory, which is more consistent with the actual soil deformation. M. M. Promojijfakonov theory, Terzaghi theory and modified theory are used to calculate jacking force of two pipelines at different depths in pipe roof pre-construction method of Xinle Ruins Station of Shenyang Metro; the calculated results are compared to the measured results. It is shown that the results of M. M. Promojijfakonov theory and Terzaghi theory are much larger than the measured values; the results of modified theory are slightly larger than the measured results. So that the results of modified theory are more suitable for estimating pipe jacking force of great depth pipelines.

Key words: pipe roof pre-construction method; pipe jacking force; vertical earth pressure; M. M. Promojijfakonov theory; Terzaghi theory; modified theory; measured jacking force

1 引 言

沈阳地铁新乐遗址站为暗挖车站, 采用管幕预筑法施工。该工法最早由比利时的 Smet Boring 公

司开发, 在韩国得到了推广使用以及改进^[1]。沈阳地铁新乐遗址站使用的工法是从韩国引进的, 在国内首次应用。新乐遗址站管幕预筑法具体施工过程见文献[2]。

收稿日期: 2012-02-02

基金项目: 湖南省教育厅一般研究项目(No. 11C0246)。

第一作者简介: 杨仙, 女, 1982 年生, 博士研究生, 从事岩土工程方面的研究。E-mail: yangxjj@163.com

该工法中顶进的钢管具有埋深大、管径大、数量多、间距小、顶管工期长等特点。为保证顶管工程的安全性,管材强度和顶进后背强度的确定以及千斤顶的选择都至关重要,而这些都与顶管顶力有直接关系^[3-4]。因此,在顶管工程进行前,准确地估算顶力大小非常重要。而顶管顶力又与垂直土压力密切相关。参照隧道开挖中垂直土压力的计算方法,常用的顶管垂直土压力计算方法有两种:普氏理论和太沙基理论。

郭文康^[5]通过北京市第四市政工程公司 1980 年施工的 87 个顶管段的顶力实测资料,分析了普氏土拱效应理论与太沙基松动土压力理论的计算结果与实测结果之间的差异,指出普氏公式基本符合率只达 46.2%,其余均大于实测。太沙基公式基本符合率达 74.5%,其余均大于实测。

周小文^[6]通过盾构隧道的离心模型试验研究,朱伟^[7]通过颗粒流模拟研究,得出共同的结论是垂直土压力比太沙基松动土压力还要小。

王海涛^[8]指出,太沙基压力公式计算出的深埋围岩压力值过于保守,适用于计算浅埋隧道围岩的压力。

综合上述文献资料,笔者认为,一般情况下可以考虑使用太沙基理论。但太沙基理论更适用于浅埋情况,在深埋情况中计算值偏于保守。这主要是因为该理论未考虑到深埋情况下,开挖引起的土层松动并未一直延伸到地表。根据普氏理论,在深度较大的稳定土层中开挖会形成土拱^[9-11]。由于土拱效应的存在,地表以下的一部分土体实际上是能够保持自稳的,并未对下层土体形成土压力。研究中,笔者尝试结合普氏和太沙基理论,既考虑土拱效应,又考虑土体的挟持作用,提出了改进的土压力计算理论,使之更符合深埋情况下的土压力计算。

2 改进的土压力计算理论

普氏理论适合于深埋情况,对深埋的界定如下:自然覆土深度至少应大于两倍压力拱高度^[4]。改进的理论计算也考虑了拱效应,因此,也需满足深埋的界定。土拱上部土体压力被土拱承受。计算顶管受到的垂直土压力时只需要考虑土拱以下土体的压

力。在普氏理论中,土拱以下土体的压力计算只考虑了土拱以下土体的重力。根据太沙基理论,笔者认为,土拱以下土体压力计算式除了考虑土体重力外,还必须考虑周围土体对松动土体的挟持力。土拱以下土压力的计算参照太沙基理论推导过程进行。在太沙基理论中,计算边界为水平的地表,进行应力传递推导时,选取的是水平薄条带状基本单元^[12-14]。而在改进的理论中,压力拱承受了上部土压力,故压力拱下部即为计算边界,各点土压力为 0。进行应力传递推导时,选取拱形薄条带为基本单元。综上所述,可以建立如图 1 所示的模型。

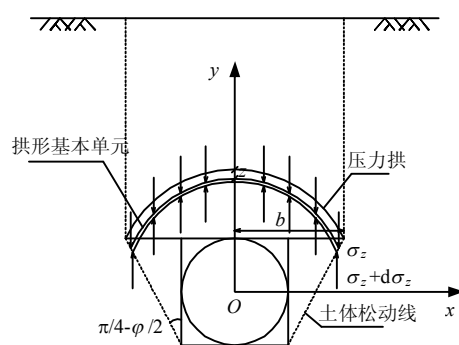


图 1 改进理论计算模型

Fig.1 Model of modified theory

根据普氏压力拱理论,压力拱曲线方程为

$$y = \frac{D}{2} + \frac{b^2 - x^2}{bf} \quad (1)$$

式中: b 为拱跨的一半 (m); D 为顶管直径 (m); $f = \tan \varphi$ 为土体坚固系数; φ 为土体内摩擦角 ($^\circ$)。

假设选取的薄条带拱形基本单元离压力拱的距离为 z , 则该拱形线的曲线方程可以看作是压力拱沿着 y 轴向下平移了 z , 因此, 薄条带拱形基本单元的曲线方程为

$$y = \frac{D}{2} + \frac{b^2 - x^2}{bf} - z \quad (2)$$

由普氏理论可知, 土体松动线的方程为

$$y = \tan(\pi/4 + \varphi/2)(x - b) + D/2 \quad (3)$$

式 (2)、(3) 联立求解, 可以得到两曲线交点的 x 坐标值, 该值用 z 的函数表示为

$$x(z) = \frac{-bf \tan(\pi/4 + \varphi/2) + \sqrt{[bf \tan(\pi/4 + \varphi/2)]^2 - 4[bfz - b^2 f \tan(\pi/4 + \varphi/2) - b^2]}}{2} \quad (4)$$

薄条带拱形基本单元拱曲线与土体松动线相交坐标的 x 值得出后, 即可以利用曲线积分得到薄条带拱曲线 1/2 的长度为

$$l(z) = \int_0^{x(z)} \sqrt{1 + \frac{4h^2 x^2}{b^4}} dx \quad (5)$$

薄条带拱形土条自重为

$$2l(z)\gamma dz \quad (6)$$

垂直应力差为

$$2l(z)d\sigma_z \quad (7)$$

土条两侧剪应力为

$$\tau = 2(c + \sigma_z k_0 \tan \varphi) dz / \cos \theta \quad (8)$$

列平衡方程如下:

$$l(z)\gamma dz = l(z)d\sigma_z + (c + \sigma_z k_0 \tan \varphi) dz / \cos \theta \quad (9)$$

以上各式中: σ_z 为垂直土压力 (kPa); γ 为上覆土平均重度 (kN/m³); H 为上覆土厚度 (m); $h = b/f$ 为拱高 (m)。

式 (9) 的边界条件为压力拱拱形线下部各点土压力为 0。

$$\text{即 } z = \frac{x^2}{bf} \text{ 时, } \sigma_z = 0 \quad (10)$$

将式 (5)、(10) 代入式 (9), 即可解出微分式 (9)。

考虑到解析方程的复杂性, 笔者根据上述改进理论, 使用 Matlab 编程来求解微分方程式 (9) 的数值解, 即可得到地层中各点的垂直土压力。

地层中各点的垂直土压力得到后, 即可使用 Matlab 编程来计算钢管上部总的垂直土压力 N_{z1} 。如图 2 所示, 要求得钢管上半部分受到的总垂直土压力, 必须先求出钢管上半圆弧 C1-A-C2 上各点的垂直土压力, 然后求和。根据式 (9) 由曲线 1 计算出垂直土压力 $\sigma_{(m1)}$ 即为 A 点的垂直土压力, 由曲线 2 计算出垂直土压力 $\sigma_{(m2)}$ 即为 B1 和 B2 点的垂直土压力, 由曲线 3 计算出垂直土压力 $\sigma_{(m3)}$ 即为 C1 和 C2 点的垂直土压力。从 A 点到 C 点所有曲线上的垂直土压力全部计算出来, 然后通过积分计算的思想编程, 即可得到钢管上部总的垂直土压力 N_{z1} 。

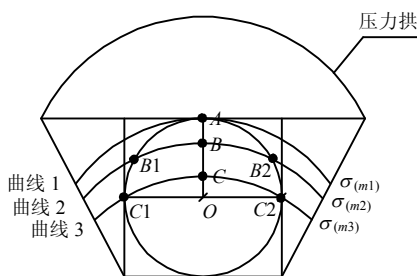


图2 土压力计算示意图

Fig.2 Calculation sketch of soil pressure

钢管底部总垂直土压力为

$$N_{z2} = N_{z1} + G \quad (11)$$

钢管左侧水平土压力为

$$N_{x1} = k_0 N_{z1} \quad (12)$$

钢管右侧水平土压力为

$$N_{x2} = k_0 N_{z1} \quad (13)$$

式中: G 为钢管本身的重量(kN); k_0 为土体侧压力系数。

3 顶力计算与实测分析

3.1 钢管顶力计算

钢管受到的围压如图 3 所示, 主要分为垂直和横向土压力。求每延米的钢管顶力为

$$P = f_0 (N_{x1} + N_{x2} + N_{z1} + N_{z2}) \quad (14)$$

式中: f_0 为管-土摩擦系数。

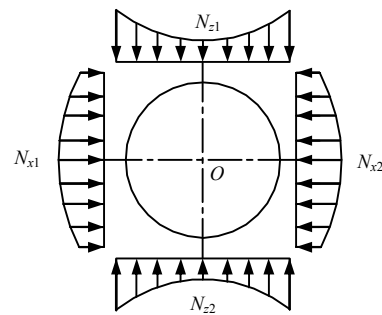


图3 围压计算示意图

Fig.3 Calculation sketch of confining pressure

管-土摩擦系数是顶力计算中的重要参数, 直接关系到管周摩擦阻力的大小, 并影响顶力计算结果。管-土摩擦系数的影响因素包括土层性质、管壁外表粗糙程度、管道运动幅度以及注浆效果等。为合理简化问题, 摩擦系数的确定应首先根据注浆与否进行区分, 在不注浆的情况下主要与土体内摩擦角相关, 而在注浆的情况下主要取决于注浆效果。在注浆的情况下, 通过对国内外文献中依据工程实例给出建议值的总结, 摩擦系数取值通常在 0.07~0.10 范围内, 根据注浆量、注浆均匀性、泥浆套完整性等注浆效果做适当调整, 在效果较好的情况下取较低值, 反之取较高值, 但通常不超过 0.2。在不注浆的情况下, 摩擦系数 $f_0 = \tan \varphi$ [15]。

3.2 工程实测分析

沈阳地铁新乐遗址站主体顶管过程中对两根深埋管道进行了顶力监测。第 1 根为 3B 管道, 第 2

根为 11B 管道, 其参数见表 1。

表 1 顶管和土层参数

Table 1 Parameters of pipe and soil

管道类型	管径 /mm	壁厚 /mm	顶进 地层	顶管埋深 /m	土体重度 /(kN/m ³)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 /(°)
第 1 根 3B	2 000	20	中粗砂	13.5	18.8	3	30
第 2 根 11B	2 200	22	圆砾	29.8	18.5	3	35

根据现场注浆情况, 3B 管道初始注浆效果较差, 顶进到 25 m 左右时, 形成稳定了泥浆套, 注浆效果较好。因此, 25 m 之前取 $f_0=0.15$ 计算; 25 m 之后, 取 $f_0=0.07$ 计算。11B 管道取 $f_0=0.07$ 计算。且顶管过程中, 顶进所用的油缸直径为 0.35 m。

分别使用普氏理论、太沙基理论和改进的太沙基理论计算两根管道的顶力, 可得到顶进每延米的顶力和所需的顶进油缸压强。顶力如表 2 所示, 压强如表 3 所示。

表 2 各种理论计算的每延米顶力 (单位: kN/m)

Table 2 Jacking force per meter by different theories and measured results (unit: kN/m)

理论与实测	3B 管 25 m 前	3B 管 25 m 后	11B 管
普氏理论	62.8	29.3	42.4
太沙基理论	111.3	51.9	115.8
改进理论	45.2	21.1	20.5
实测平均值	35.0	15.1	16.4

表 3 各种理论计算的每延米压强 (单位: MPa/m)

Table 3 Jacking pressure per meter by different theories and measured results (unit: MPa/m)

理论与实测	3B 管 25 m 前	3B 管 25 m 后	11B 管
普氏理论	0.65	0.30	0.31
太沙基理论	1.16	0.54	1.84
改进理论	0.47	0.22	0.21
实测平均值	0.35	0.17	0.17

3B 管道从累计进尺 12.1 m 时开始记录顶进油缸压强。3B 管道的 3 种计算结果与实测结果对比见图 4 (压强对比图)。

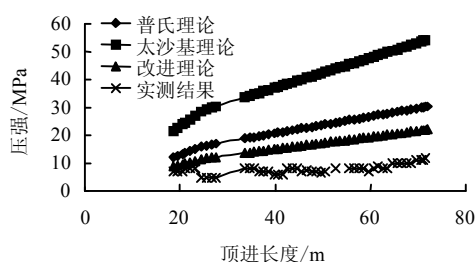


图 4 3B 管道顶进压强计算与实测结果

Fig.4 Jacking pressures of pipe 3B by different theories and measured results

11B 管道从累计进尺 8.2 m 时开始记录顶进油缸压强。11B 管道的 3 种计算结果与实测结果对比见图 5 (压强对比图)。

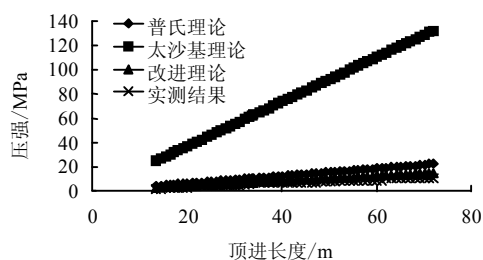


图 5 11B 管道顶进压强计算与实测结果

Fig.5 Jacking pressures of pipe 11B by different theories and measured results

由图 4、5 对比可知: 由于太沙基理论未考虑土拱效应, 计算顶进压强远远大于实际使用压强, 而且埋深越大, 计算值与实测值的差距越大。普氏理论考虑了土拱效应, 但未考虑土体本身的黏聚力产生的挟持作用, 计算值与实测值的差距也较大。在大埋深情况下, 若按照太沙基理论或者普氏理论进行顶力估算, 则对于千斤顶的选择、钢管材料强度的选择以及后背墙的设计都会有过高的要求。改进理论既考虑了土拱效应, 又考虑了土体本身的黏聚力产生的挟持作用, 计算值更接近实测值, 更适用于深埋情况下预测顶管顶力。

4 结 论

(1) 在深埋管道顶力计算中, 由于太沙基理论考虑土拱效应, 计算顶进压强远远大于实际使用压强, 而且埋深越大, 计算值与实测值的差距越大。普氏理论未考虑土体本身的黏聚力产生的挟持作用, 计算值与实测值的差距也较大。

(2) 同时考虑土拱效应和土体本身的黏聚力产生的挟持作用, 可建立模型推导出改进的竖向土压力计算模型。该模型用于顶管顶力计算, 所得的计算结果更接近于实测值。该理论更适用于大埋深情况下顶管顶力估算。

参 考 文 献

- [1] KIM Jeongyoon, PARK Innjoon, KIM Kyonggon. A study of the applicability of underground structure using steel tubular in Korean geotechnical condition[J]. Tunneling Technology (Korean), 2003, 5(4): 401—409.
- [2] 邢凯, 陈涛, 黄常波. 新管幕工法概述[J]. 城市轨道交通

- 通研究, 2009, (8): 523—528.
- XING Kai, CHEN Tao, HUANG Chang-bo. On new tubular roof method[J]. **Urban Mass Transit**, 2009, (8): 523—528.
- [3] 梁显逵. 大口径钢管长距离顶进技术[J]. 铁道标准设计, 1996, (9): 14—17.
- [4] 薛振兴. 顶管施工顶力计算与力学特性研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
- [5] 郭文康. 关于顶管顶力计算公式的讨论和建议[J]. 市政技术, 1983, (1): 2—18.
- [6] 周小文, 濮家骝, 包承纲. 隧洞拱冠砂土位移与破坏的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 32—36.
- ZHOU Xiao-wen, PU Jia-liu, BAO Cheng-gang. A study of the movement and failure characteristics of sand mass above the crown of a tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(2): 32—36.
- [7] 朱伟, 钟小春, 加瑞. 盾构隧道垂直土压力松动效应的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 750—754.
- ZHU Wei, ZHONG Xiao-chun, JIA Rui. Simulation on relaxation effect of vertical earth pressure for shield tunnels by particle flow code[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(5): 750—754.
- [8] 王海涛. 隧道管棚预支护体系的力学机理与开挖面稳定性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB50069—2002 给水排水工程构筑物结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [10] 汤华深, 刘叔灼, 莫海鸿. 顶管侧摩阻力理论公式的探讨[J]. 岩土力学, 2011, 25(增刊 2): 574—577.
- TANG Hua-shen, LIU Shu-zhuo, MO Hai-hong. Discussion on theoretical formulae of lateral friction resistance for pipe-jacking[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 25(Supp. 2): 574—577.
- [11] 张中安, 罗富荣. 土质地层浅埋地下结构设计中的土压力计算[J]. 铁道建筑, 2001, (3): 10—12.
- [12] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John-Wiley and Sons, 1943: 76—80.
- [13] 朱永全, 宋玉香. 隧道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [14] 宋玉香, 贾晓云, 朱永全. 地铁隧道竖向土压力荷载的计算研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2240—2244.
- SONG Yu-xiang, JIA Xiao-yun, ZHU Yong-quan. Study of vertical earth pressure calculation of metro tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2240—2244.
- [15] PELLET B A L, KASTNER R. Experimental and analytical study of friction forces during microtunneling operations[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2002, 17(1): 83—97.

中国隧道及地下工程修建技术

著译者: 王梦恕, D16 开本, 定价: 168 元, 出版单位: 人民交通出版社, 版次: 第 1 版第 2 次, 出版时间: 2013-01-25, 标准书号: ISBN 978-7-114-08240-5。

内容简介: 本书历时五年, 在当前我国隧道及地下工程大发展的形势下, 在建成的数千座隧道及地下工程的基础上, 以大量工程建设中的数据、经验和教训为依托, 全面客观地对我国隧道及地下工程修建技术进行梳理、总结和提升, 并加以系统阐述。全书共分十一章, 涵盖了钻爆法、浅埋暗挖法、明挖法、盾构法、掘进机法、沉埋管段法等六大隧道施工方法以及相应的辅助工法, 并包括特殊围岩隧道、水下隧道、风险管理等内容, 内容全面、系统、创新, 提出了诸多宝贵的理念、原则和要点, 逐渐形成了较完整的中国隧道修建法。本书将全面展现我国隧道建设的水平, 并引领世界隧道建设的技术进步, 在当下对我国规模庞大的隧道及地下工程建设将有极大的指导意义。

目录: 第 1 章总论: 第 1 节中国将是引领世界隧道及地下工程修建技术的国家, 第 2 节隧道及地下工程的种类, 第 3 节隧道及地下工程的建设特点与研究方法, 第 4 节围岩强度及压力理论研究, 第 5 节隧道及地下工程设计理论与方法, 第 6 节我国隧道及地下工程建设理念与要点; 第 2 章钻爆法隧道施工技术: 第 1 节钻爆法隧道施工综述, 第 2 节钻爆法隧道施工技术要点, 第 3 节钻爆法隧道施工, 第 4 节钻爆法隧道施工辅助作业线, 第 5 节长大隧道快速施工; 第 3 章特殊围岩隧道施工及地质灾害防治要点: 第 1 节特殊围岩隧道施工概述, 第 2 节几类特殊围岩施工技术要点, 第 3 节地质超前预报综述; 第 4 章浅埋暗挖施工技术: 第 1 节概述, 第 2 节浅埋暗挖隧道地质与环境调查, 第 3 节开挖方法, 第 4 节复杂条件下的浅埋暗挖施工, 第 5 节浅埋暗挖法防塌限沉技术, 第 6 节桩基托换及洞内桩基拆除, 第 7 节监控量测技术。

读者对象: 本书可供我国从事隧道及地下工程修建的设计、施工、科研技术人员以及广大师生使用和学习, 亦可供国外同行参阅和交流。

(摘自 人民交通出版社网站)