

手掘式顶管中箱梁顶进力计算研究

李东波^{1,2}, 赵冬^{1,2}, 张艳强¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055)

摘要:通过辨析普通手掘式顶管施工中顶进力计算公式的特点,对顶进施工中的箱梁进行了受力分析,推导得到了手掘式顶管中矩形箱梁的顶进力实用计算公式,且基于某工程的实测数据,将实用计算公式计算的结果与实测数据进行了对比,结果较为合理,从而验证了实用计算公式的合理性与可靠性。

关键词:手掘式顶管; 箱梁; 顶进力

中图分类号: TU746.3; TU753.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)01-0060-05

顶进力计算是顶管施工中最常用、最基本的计算之一。但由于各种条件的变化,用传统的公式计算出来的预期顶进力与实际顶进力之间有着明显的不同。因此,有必要对顶进力计算公式进行进一步研究。

手掘式顶管技术是一种非开挖地下管道铺设技术^[1],其基本施工原理是:人首先在铺设管道前端掘土,然后利用千斤顶从顶进工作坑将待铺设管道按设计高程逐节顶入土层,从而实现管道铺设(图1)。

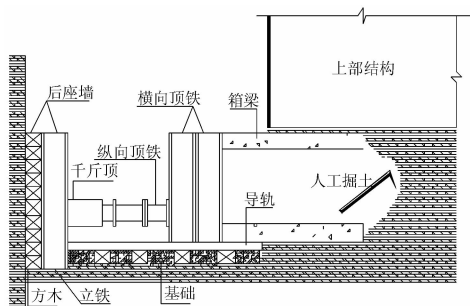


图1 手掘式顶管施工示意图

Fig. 1 Schematic representation of manual pipe-jacking



图2 手掘式顶管中所用箱梁

Fig. 2 Box girder used in the manual pipe-jacking

较之传统的顶管施工,手掘式顶管采用了顶管技术的基本原理,和普通顶管技术具有诸多相似之处,但又存在较大差异,主要表现在:①构件(箱形截面梁)直接在建筑物下顶进,其顶部覆土很浅;②顶进构件的横截面形状为矩形而非常见的圆形(图2)。

1 普通手掘式顶管施工中顶进力常用计算公式辨析

现有的计算公式主要分为理论公式和经验公式^[2]。理论公式以经典土力学为基础,但由于引入的简化和假定往往使计算结果误差较大。经验公式多以实际工程的测试数据为依据,较符合实际情况,但其应用的区域性和局限性较大,具体使用时应进行针对性的分析。

1.1 理论公式

(1)考虑土拱效应的理论公式,即顶管施工时管道所处土层为稳定土层且顶部覆土厚度较大时,认为作用于管道上的土压力仅是其上部分高度的土柱重量,其主要表现在对顶进管道周边均布荷载 q 的

收稿日期:2011-05-12 修改稿日期:2011-12-26

基金项目:陕西省重点学科专项资金资助项目(E01001)

作者简介:李东波(1982-),男,河北邢台人,博士生,主要从事结构与力学的研究。

计算中.

1)顶进力为初始顶进力与各种阻力之和^[3],即

$$F = F_0 + [(\pi B_c q + W)\mu' + \pi B_c C']L \quad (1)$$

式中: F 为顶进力,kN; F_0 为初始顶进力,kN,手掘式顶管施工中, $F_0 = 13.2\pi B_c N$, N 为土的标准贯入值; B_c 为顶进管道外径,m; q 为顶进管道周边的均布荷载,kPa,其计算过程可详见文献[3]; W 为每米顶进管道的重力,kN/m; μ' 为顶进管道与土之间的摩擦系数; C 为顶进管道与土之间的粘聚力,kPa; L 为顶进长度,m.

2)在采用了降水等辅助施工措施后,挖掘面的土体稳定而且能自立,据此,文献[3]进一步给出了如下手掘式顶管施工的顶进力计算公式:

$$F = F_0 + \pi \alpha B_c \tau_a L + W\mu' L \quad (2)$$

式中: α 为顶进管道与土之间的摩擦系数, α 可取0.50~0.75; τ_a 为顶进管道与土之间的剪切应力,kPa, $\tau_a = \beta q\mu' + C$; β 为顶进管道周边的荷载系数, β 可取1.0~1.5; N 为刃口迎面阻力系数,在普通粘性土中 $N = 1.0$;在砂性土和硬土中, N 则分别取2.5和3.0;其余参数意义同上式.

整理上述有关算式可得顶进力的计算公式如下:

$$F = 13.2\pi B_c N' + \pi \alpha B_c \beta q\mu' L + \pi \alpha B_c C' L + W\mu' L \quad (3)$$

(2)不考虑土拱效应的理论公式^[4],即按照管道顶部覆盖层的全部厚度计算土压力.值得指出的是对具有稳定性的土层而言,按照全部厚度计算时得到的结果要偏大.其计算公式如下:

$$P = f \times \gamma \times D_1 \times [2H + (2H + D_1) \times \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) + \frac{\omega}{\gamma \times D_1}] \times L + P_s \quad (4)$$

式中: P 为计算的总顶力,kN; γ 为管道所处土层的重力密度,kN/m³; D_1 为管道的外径,m; H 为管道顶部以上覆盖土层的厚度,m; ϕ 为管道所处土层的内摩擦角; ω 为管道单位长度的自重,kN/m; L 为管道的计算顶进长度,m; f 为顶进时管道表面与其周围土层之间的摩擦系数; P_s 为顶进时顶管掘进机的迎面阻力,当采用手掘式顶管施工(敞开式顶管法)时,迎面阻力(kN)可按下面公式计算:

$$P_s = \pi \times D_s \times t_s \times p_s \quad (5)$$

式中: D_s 为顶管机外径,m; t_s 为切削工具管的壁厚,m; p_s 为单位面积土的端部阻力,kN/m².

1.2 经验计算公式

有时为了简化计算程序,也可采用如下的经验公式计算手掘式顶管施工中的顶进力^[3]:

$$F = F_0 + RSL \quad (6)$$

式中: F 为顶进力,kN; F_0 为初始顶进力,kN; R 为综合摩擦阻力,kPa; S 为顶进管道外周长,m; L 为顶进长度,m;各种土质的 F_0 及 R 值可以直接从文献[3]中得到,也可以根据具体的施工经验得出.

根据以上所述,究其两类公式的共同点,可以看出,顶进力主要由作用于顶进管道上的各项顶进阻力组成,只是考虑各项顶进阻力的方法或组合方式不同而已.上述公式中顶进力大体由四部分组成:①初始顶进力,主要是指顶进管道前端的迎面阻力;②由于上覆荷载作用管道外壁上产生的摩阻力;③由于管道重量产生的摩阻力;④由于管外壁与土之间粘聚力产生的阻力.需要强调的是,公式(1)与(3)中计及了由于管外壁与土之间粘聚力产生的阻力,而公式(4)则没有计及,且目前相关文献也没有明确指出什么情况应该考虑由于管外壁与土之间粘聚力产生的阻力.此外,公式(1)和(3)虽然考虑了由于管外壁与土之间粘聚力产生的阻力,但没有给出其计算的定量指标,非常不便于在实际工程中应用.

2 箱梁顶进力实用计算公式的推导

2.1 箱梁顶进力组成分析

结合普通手掘式顶管施工中顶进力计算公式的组成分析并从顶进施工中箱梁的受力特点出发,可以认为,千斤顶在推动箱梁前进的过程中需要克服下列五部分作用于箱梁上的外力(统称顶进阻力):①首节箱梁端部的迎面阻力 P_s ;②由上部结构垂直压力作用 P_v 引起的箱梁底部和顶部的摩阻力 F_1 ;③由于箱梁自重 G 引起的箱梁底部与土之间的摩阻力 F_2 ;④由箱梁两侧的土压力 PH 引起的摩阻力 F_3 ;

⑤由箱梁外壁与土之间的粘聚力产生的阻力 F_4 . 图 3(a)、(b)为顶进过程中箱梁的受力简图,根据轴向力平衡原理,即可求出顶进力 P 的理论计算公式如下:

$$P = P_s + F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (7)$$

此外,顶进过程中由于箱梁不断受到各种外界因素的影响,如土质、顶进偏差、千斤顶行程的同步性、后座墙的变形等,所以箱梁的受力状态经常处于变化之中,而变化情况事先又较难估测,考虑到这些因素,故顶进力 P 一定要有适当的安全系数,以便克服在顶进过程中所遇到的各种意外阻力. 既应保证安全可靠的顶力值,也要考虑施工的经济性.

2.2 箱梁顶进力的实用计算公式

为了推导工程中便于应用的实用计算公式,现作如下计算假定:①箱梁外壁与周围土体接触均匀无缝隙;②箱梁外壁与周围土体间摩擦系数为恒定值;③考虑箱梁直接在建筑物下顶进,其两侧覆土较浅,故不计由箱梁两侧的土压力 P_H 形成的摩阻力 F_3 ;④由于箱梁与土之间粘聚力产生阻力的不明确性,加之顶进距离较短,因此不予考虑 F_4 . 综合上述箱梁顶进力的组成分析及已有的普通手掘式顶管施工中顶进力计算公式即可得到箱梁的顶进力实用计算公式如下:

$$P = k[F_1 + F_2 + P_s] \\ = k\{[2bP_v + \omega]fL + P_s\} \quad (8)$$

式中: P 为箱梁的顶进力, kN; f 为箱梁与土之间的摩擦系数,其值可查表;

P_v 为上部结构垂直均布压力, kN/m²; ω 为箱梁单位长度的重量, kN/m; L 为顶进距离, m; b 为箱梁的宽度, m; P_s 为首节箱梁前端端面的迎面阻力,可按下面公式计算:

$$P_s = p_s A_s \quad (9)$$

式中: A_s 为首节箱梁端部的吃土面积,为避免在箱梁外围产生空隙而引起上部结构沉降,箱梁端部要吃土前进,箱梁端部置留土体的面积即为吃土面积,如图 2(c)所示; p_s 为单位面积土的迎面阻力, kN/m²; k 为安全系数,建议取 1.2.

3 箱梁顶进力实用计算公式计算结果与实测对比分析

3.1 工程概况

2008 年,为了彻底解决元代砖石结构开封市延庆观玉皇阁(“国保级”文物)基础受地下水侵蚀问题,遂决定对其进行整体顶升保护,其核心工序—基础托换也采用了手掘式顶管基础托换方法. 经数值模拟,玉皇阁主体结构重约 12 000 kN,对地基土的均布压力约为 228 kN/m²;根据现场勘察,箱梁周围土层土质以湿润粉土为主并拌合石灰、碎砖瓦且土体较为密实,取 $f=0.3$, $p_s=1\,000$ kN/m². 箱梁顶进时,为避免在箱梁外围产生空隙而引起上部结构沉降,箱梁前端各壁约置留 50 mm 厚土体,表 1 为玉皇阁箱梁顶进力计算参数表,经计算,最大顶进力约为 2 528 kN.

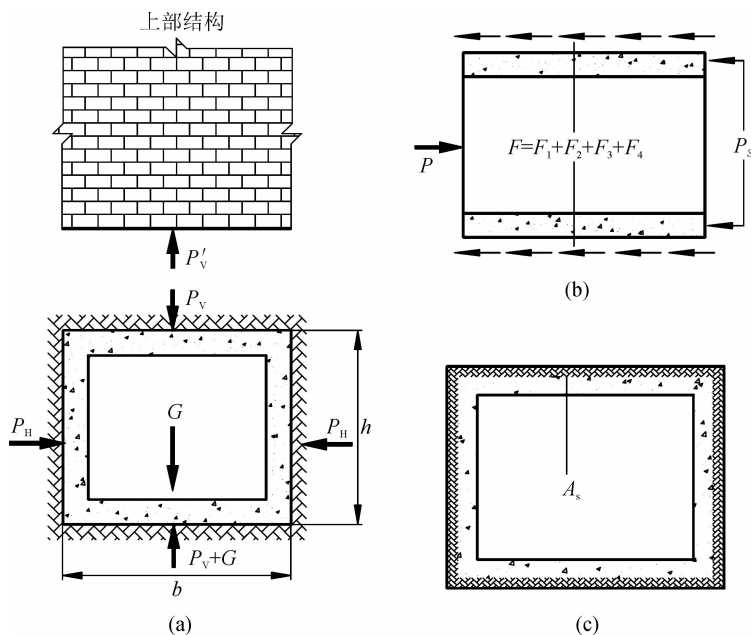


图 3 顶进过程中箱梁的受力简图

Fig. 3 Force diagram of box girder in the process of jacking

表 1 箱梁顶进力计算各参数取值

Tab. 1 Parameters of the box girder's jacking force caculation

Parameters	k	b/m	$P_V/kN/m^2$	$\omega/kN/m$	f	L/m	P_S/kN
Value	1.2	1.6	228	22	0.3	8.0	280

3.2 测试方法

图 4 为玉皇阁箱梁顶进方案示意图. 箱梁依次沿东、北、西、南各方位顶入结构承重墙下,每面墙下顺次顶入六个箱梁,其长度分别为 1.2 m、1.2 m、1.6 m、1.2 m、1.2 m、1.6 m,总顶进距离为 8.0 m. 施工过程中,同步记录安装于千斤顶电动油压泵的压力显示表读数,通过记录的读数计算得到顶进力. 此外,在记录压力表读数的同时,测量导轨上未顶入墙下的箱梁长度,通过换算可得顶进距离.

3.3 计算曲线与实测曲线的对比分析

图 5~8 分别为东、北、西、南各方位箱梁顶进施工过程中顶进力与顶进距离实测关系曲线与计算曲线对比图. 可以看出,顶进力随顶进距离基本呈线性上升趋势. 若不考虑安全系数,实测曲线与计算曲线较为吻合,充分证明了本文给出的箱梁顶进力实用计算公式的适用性. 当安全系数取 1.2 时,此时的计算曲线基本处于实测曲线上方,这证明本公式中安全系数取 1.2 是合理的,其既保证了安全可靠顶力值,又兼顾了施工的经济性. 此外,实测曲线呈现出一定的波动趋势,这真实的反映了顶进施工过程中诸如顶进误差、挖土操作、后座墙的变形,局部不良土质等不可预测因素对顶进力的影响.

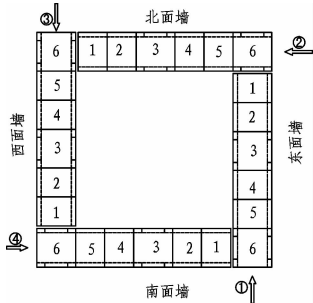


图 4 沿墙纵向顶进方案
Fig. 4 The longitudinal jacking scheme along the wall

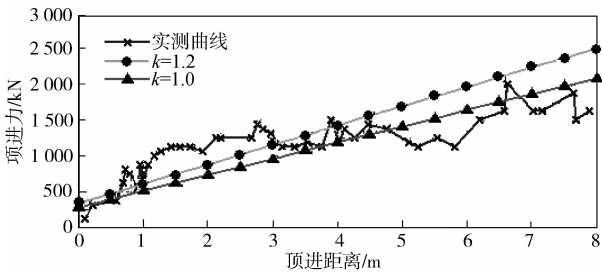


图 5 顶力与顶距实测关系曲线与计算曲线对比图(顶进方位:东)
Fig. 5 Contrast figure between the measured relationship and the calculated results of jacking force with jacking distance (jacking location: east)

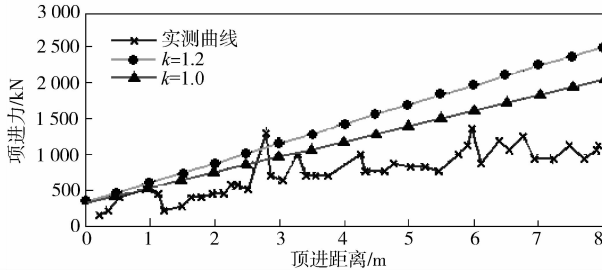


图 6 顶力与顶距实测关系曲线与计算曲线对比图(顶进方位:北)
Fig. 6 Contrast figure between the measured relationship and the calculated results of jacking force with jacking distance (jacking location: north)

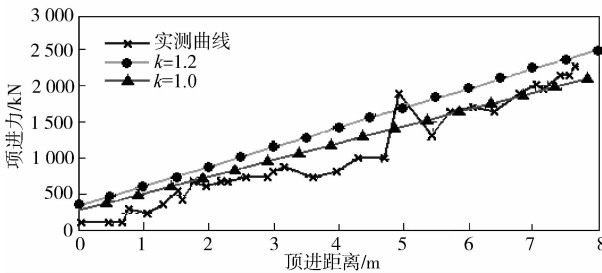


图 7 顶力与顶距实测关系曲线与计算曲线对比图(顶进方位:西)
Fig. 7 Contrast figure between the measured relationship and the calculated results of jacking force with jacking distance (jacking location: west)

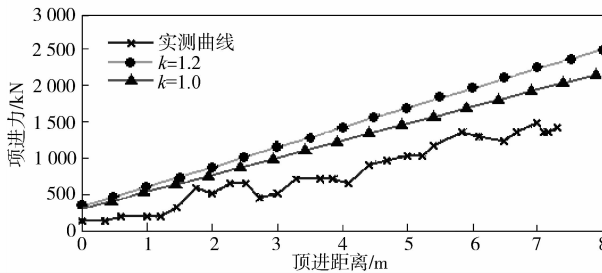


图 8 顶力与顶距实测关系曲线与计算曲线对比图(顶进方位:南)
Fig. 8 Contrast figure between the measured relationship and the calculated results of jacking force with jacking distance (jacking location: south)

4 结 论

综上所述,本文所推导手掘式顶管中箱梁的顶进力实用计算公式从影响顶进力的主要因素和箱梁的受力特点出发,通过安全系数来综合考虑各种不可预测因素对顶进力的影响,其推导思路是合理的。此外,该公式形式简单,各计算系数意义明确,非常便于应用,其对类似工程中箱梁的顶进力计算具有一定的参考价值。

参考文献 References

- [1] 高乃熙,张小珠. 顶管技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1984:62-63.
GAO Nai-xi, ZHANG Xiao-zhu. Technology of pipe-jacking[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1984:62-63.
- [2] 韩选江. 大型地下顶管施工技术原理及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
HAN Xuan-jiang. Large scale underground pipe jacking technology principle and application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [3] 余彬泉,陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,1998:187.
YU Bin-quan, CHEN Chuan-can. Technology of pipe-jacking constuction[M]. Beijing: People's Traffic Press, 1998:187.
- [4] 颜安平. GB50286—97 给水排水管道工程施工及验收规范[S]. 杭州:浙江大学出版社,2010.
YAN An-ping. GB50286—97 Code of water pipeline engineering construction and inspection[S]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2010.
- [5] 张卫喜,陈平,赵冬,等. 手掘式顶管技术在砖石结构古建筑保护中的应用[J]. 工业建筑,2011,41(3):127-130.
ZHANG Wei-xi, CHEN Ping, ZHAO Dong, et al. The application of manual pipe-jacking technology in brick buildings' protection[J]. Industrial Construction, 2011, 41(3):127-130.
- [6] 张卫喜,陈平,赵冬. 开封玉皇阁整体顶升施工技术[J]. 施工技术,2010,39(11):48-50.
ZHANG Wei-xi, CHEN Ping, ZHAO Dong. Construction technology of integral lift-up for Kaifeng jade emperor pavilion[J]. Construction Technology, 2010, 39(11):48-50.
- [7] 陈平,吴清,张卫喜. 开封玉皇阁整体顶升保护技术[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2011,43(4):470-473.
CHEN Ping, WU Qing, ZHANG Wei-xi. Lifting Yuhang Pavilion integrall[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011, 43(4):470-473.
- [8] ANTONUCCI R. Application of base isolation on an existing unreinforced masonry building[J]. Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings II, 1991:161-173.
- [9] GUERREIRO L. The use of passive seismic protection in structural rehabilitation[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2006, 8(4):121-132.

Research on the jacking force caculation of the box girder used in the manual pipe-jackong

LI Dong bo^{1,2}, ZHAO Dong^{1,2}, ZHANG Yan-qiang¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Science, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: By differentiating the characteristics of jacking force calculation formulas used in ordinary manual pipe-jacking, the paper deduces the practical calculation formula of the jacking force in the process of box girder's jacking according to the stress analysis of the box girder. Based on the measured data of a certain project, the paper verifies the rationality and reliability of the formula.

Key words: manual pipe-jacking; box girder; jacking force