

文章编号: 1000-7598(2009)08-2397-06

顶管工程工作井位移与土抗力分析

魏丽敏¹, 向远华², 陈果元³, 胡海军^{1,4}

(1. 中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075; 2. 中铁十二局集团 第七工程有限公司, 长沙 410004;
3. 中南林业科技大学 土木建筑与力学学院, 长沙 410004; 4. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 为保证顶管工程的施工安全和经济设计, 必须深入分析顶力作用下工作井及周围土体的应力、位移特性。以两个实际顶管工程为工程背景, 针对工作井的浅埋、深埋圆形沉井, 采用三维有限元分析, 给出了浅埋沉井土抗力沿圆周分布的拟合方程。分别采用《规程》^[1]和《手册》^[2]推荐的计算方法和三维有限元分析, 对顶力作用下深埋、浅埋工作井的位移和新增土抗力进行对比分析, 结果表明: ①由于只考虑了顶力后背一侧半圆范围内土体抗力的作用, 规范法和手册法将导致土抗力计算结果偏大; ②顶力作用位置对深埋沉井的井壁变位、土抗力大小和分布情况影响显著; ③规范法和手册法仅适用于顶力作用于沉井底部的浅埋沉井。

关 键 词: 顶管工程; 工作井; 圆形沉井; 土抗力; 位移

中图分类号: U 452

文献标识码: A

Analysis of displacement and soil counterforce for working well of pipe jacking engineering

WEI Li-min¹, XIANG Yuan-hua², CHEN Guo-yuan³, HU Hai-jun^{1,4}

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. The 7th Engineering Co., Ltd. of China Railway 12th Bureau Group, Changsha 410004, China; 3. College of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China; 4. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An in-depth study of displacement of working well and soil counterforce under the jacking force is indispensable to ensuring safe and economical construction. Two practical pipe jacking project were employed to represent respectively the deep-buried or shallow-buried circular open caisson which was used as working well of jacking project. Firstly, a fitting equation of soil counterforce distributing around the circumference was obtained by the 3D finite element method (FEM). Then the comparative analysis of displacement and soil counterforce around the working well under the jacking force for both deep-buried and shallow-buried circular open caisson was performed by different method, namely, FEM analysis, specification^[1] method and manual^[2] method. The results indicate that: only the soil counterforce that acting at the semicircular was taken into account in specification^[1] method and manual method; as a result, the calculated soil counterforce are larger than that from FEM analysis. For deep-buried working well, the distribution and quantity of well displacement and soil counterforce are affected evidently by the acting position of jacking force. The methods proposed by specification and manual are applicable only to shallow-buried working well that jacking force acting near its bottom.

Key words: pipe jacking engineering; working well; circular open caisson; soil counterforce; displacement

1 引 言

近年来国内很多较早建设的火电厂因生产时间长或扩建等原因, 原有储灰场已不能满足排灰要求。为扩充储灰容量, 需进行坝体加高和加固^[3-4]。辐射井排渗系统是用于子坝砌筑后坝体加固的新技术, 它通过降低排灰场的水位, 增加挡灰坝体的稳

定性。

辐射井通常由沉井和辐射管组组成, 其特点是伸向含水层的滤水管(辐射状布置)范围大、排渗范围广, 能有效降低浸润线。当铺设辐射管和导流管时, 沉井常作为工作井进行顶管施工。此时, 工作井将作为后背墙承受顶力的反力。若顶力过大, 则可能由于工作井强度不够、整体性差或者井壁后

收稿日期: 2008-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50678175)。

第一作者简介: 魏丽敏, 女, 1965年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程科研与教学工作。E-mail: lmwei@mail.csu.edu.cn

侧的土体强度不足等导致工程事故。目前,关于土体抗力的计算方法大致有:被动土压力计算法^[5]、弹性地基梁法^[6]和基于土体三维受力分析的土抗力计算方法^[7]。当沉井用作顶管工程的工作井时,其后背土压力的分布图形比较复杂,一般假定为空间曲面分布,但不同学者给出的假定不尽相同^[7-10]。尽管有相关的行业规程和计算手册可用于工程设计,也有学者采用有限元方法分析顶进过程中的结构受力^[11-12]、后背顶力与位移的关系^[13],但在实际应用中,仍存在许多问题。因此,深入研究顶力作用下工作井及周围土体的应力、位移特性,具有重要的工程意义。

2 工程实用算法

圆形沉井作为顶管工程工作井时,实际工程应用中常采用给水排水工程《钢筋混凝土沉井结构设计规程》^[1](以下简称《规程》)和《给水排水工程结构设计手册》^[2](以下简称《手册》)给出的井侧土抗力和井壁内力的计算方法。

2.1 规程法

《规程》^[1]假定:在工作荷载下土体对井壁的抗力在水平方向按向心余弦分布,沿深度方向呈三角形分布,如图 1 所示。图中, q_A 为任意高度上 A 点的土抗力。

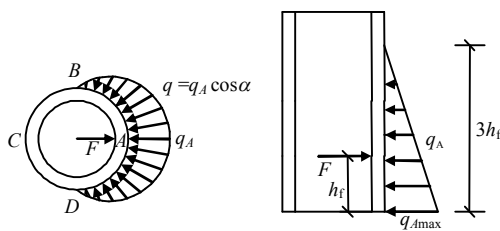


图 1 工作荷载下圆形沉井土抗力分布图

Fig.1 Distribution of soil counterforce on circular open caisson under jacking force during working

土抗力最大值为

$$q_{Amax} = \frac{4F}{3\pi r_c h_f} \quad (1)$$

式中: q_{Amax} 为壁板后土抗力的最大值; F 为顶力设计值; r_c 为沉井中心半径; h_f 为顶力至刃脚底的距离。由此,可计算出各计算点内力。

2.2 手册法

《手册》^[2]假定:工作荷载下土体对井壁的抗力在水平方向沿半圆周均匀分布,沿竖向均匀分布于 h 深度内, h 可按 q 不大于被动土压力的条件经

试算而定,如图 2 所示。

$$q = \frac{F}{2rh} \quad (2)$$

式中: q 为向心均匀分布的反力,其值不大于土的被动土压力; r 为沉井平均半径; h 为均布反力在井体垂直向的作用范围。

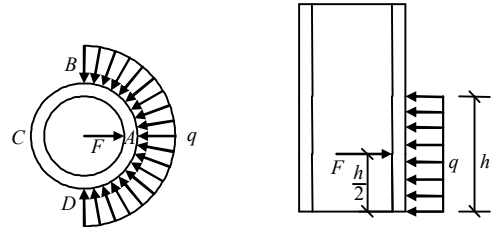


图 2 顶力作用下圆形沉井土抗力分布图

Fig.2 Distribution of soil counterforce on circular open caisson under jacking force

3 浅埋沉井有限元分析和工程实用方法的对比

为对比分析有限元方法和工程实用计算的差别,本文对某工程的浅埋沉井^[14]分别进行了三维有限元分析和工程实用计算。

3.1 工程实例与有限元模型建立

沉井高为 9 m,内、外径分别为 4.0、4.6 m,垫板厚为 0.4 m,长为 1.885 m,所占角度范围为 $-15^\circ \sim 15^\circ$,垫板高为 2.0 m,底边距井底为 2.0 m,垫板中心距井底为 3.0 m,受力为 1 000 kN。

三维有限元分析的计算区域为:长 $\times$ 宽 $\times$ 高=90 m $\times$ 80 m $\times$ 27 m,前后左右施加水平约束,底部施加竖向约束。网格划分参见图 3。

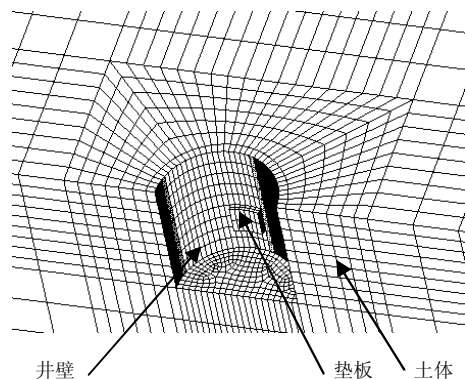


图 3 有限元网格划分

Fig.3 Mesh of finite element method

土体和沉井单元选择 Solid45,接触单元采用 Target170 和 Conta171,接触法向刚度取 60 MPa,

切向刚度取 40 MPa。将顶力作用于弧形面积进行简化, 分布力为

$$p = \frac{1\,000}{\int_{-15^{\circ}}^{15^{\circ}} \cos \alpha r d\alpha} = \frac{1\,000}{3.6 \times 2 \times \sin 15^{\circ}} = 268.313 \text{ kPa}$$

井壁弹性模量 $E_1=30 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu_1=0.15$; 土体弹性模量 $E_2=20 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu_2=0.45$ 。

因顶力不大, 采用弹性模型。认为施加顶力前土体在自重作用下的位移已经完成, 自重应力场已经形成, 仅计算顶力荷载作用下新增的位移或应力, 该位移即为现场实测位移, 但沉井上的实际土压力应为新增应力与原位应力的叠加。

3.2 三维有限元分析结果

图 4 为荷载作用下土体抗力沿半圆周的分布情况。可见, 在井底和顶力中心, 抗力在顶力后背一侧 $0^{\circ} \sim 76.5^{\circ}$ 范围内为压应力, 而在顶力一侧则为拉应力。井顶处, 压应力作用的范围为 $0^{\circ} \sim 98^{\circ}$ 。

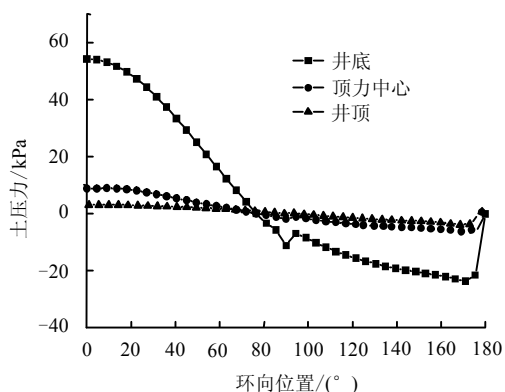


图 4 新增径向应力沿 1/2 圆周分布

Fig.4 Distribution of radial stress increase around half-circumference

图 5 为顶力荷载作用下土体抗力沿深度的分布情况。可以看出, 在 $0.5 \sim 7.0 \text{ m}$ 范围内, 土体抗力接近于直线分布, 但自顶力作用点下约 1 m 以下的范围内急剧增大, 其最大值 $q_{A\max}=54.2 \text{ kPa}$, 作用在沉井底面处。若按规程法计算, 最大抗力为 32.9 kPa , 此最大值在沉井底部。

将顶力作用点处土抗力沿圆周的分布情况绘于图 6 中, 拟合可得土抗力与沿圆周的分布情况。

$$\left. \begin{aligned} q &= q_A \cos\left(\frac{90}{\theta_0} \theta\right), \quad 0 < \theta \leq \theta_0 \\ q &= q_C \cos\left[\frac{90}{(180-\theta_0)}(180-\theta)\right], \quad \theta_0 < \theta \leq 180^{\circ} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: q 为顶力作用点高程上任意计算点处土抗力; q_A 为顶力作用点处土抗力; q_C 为与顶力作用点成 180° 夹角处土抗力; θ 为计算点与顶力作用线的夹角; $180^{\circ} < \theta \leq 360^{\circ}$ 与 $0^{\circ} < \theta \leq 180^{\circ}$ 对称分布; θ_0 为计算参数, 其大小与计算截面所在高程、沉井与土体相对刚度有关。对于本算例, $\theta_0 = 76.5^{\circ}$ 。

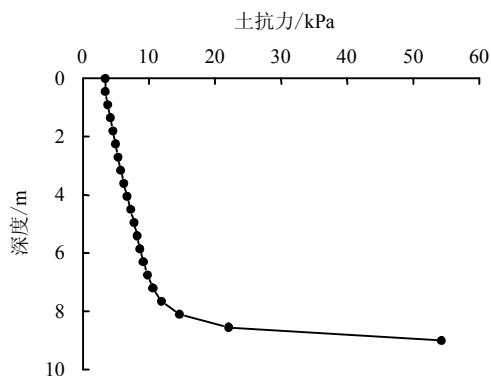


图 5 新增径向应力沿深度的变化

Fig.5 Distribution of radial stress increase versus depth

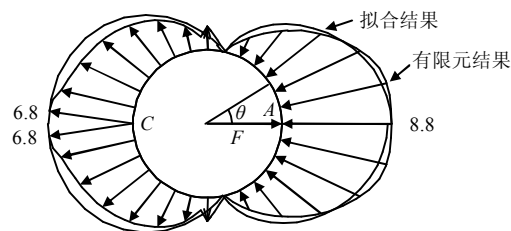


图 6 有限元分析结果 (单位: kPa)

Fig.6 Soil counterforce from FEM (unit: kPa)

3.3 抗力分布对计算结果的影响

(1) 抗力沿竖向分布

为分析对比土抗力沿竖向的分布范围对土抗力和井壁内力计算结果的影响, 笔者分别采用规程法和手册法对上述浅埋沉井进行计算, 表 1 为规程法和手册法计算所得顶力作用面处结果对比情况。

由表可以得出, 当在土体抗力沿深度方向的分布范围均取 9 m 时, 规范法和手册法计算所得环向轴力相对误差在 $0 \sim 2.3 \%$ 之间, 弯矩相对误差在 $4.1 \% \sim 57.2 \%$ 。若按手册建议的抗力竖向范围取值方法, 本工程中顶力作用点距刃脚底部 3 m , 则抗力在竖向的作用范围 $h=6 \text{ m}$, 环向轴力相对误差在 $0 \sim 7.8 \%$ 之间, 弯矩相对误差在 $43.9 \% \sim 135.9 \%$ 。可见, 土抗力沿竖向的分布范围, 将直接影响计算结果, 从而影响配筋量和精度。而手册法对该范围的确定没有明确规定, 不可避免地导致计算结果的不确定性, 影响其应用的准确性。

表 1 规程法和手册法计算结果对比

Table 1 Comparison of results from Specification^[1] Method and Manual^[2] Method

参数及计算量	H/m	$q_{A\max}/\text{kPa}$	q_A/kPa	$M_A/(\text{kN}\cdot\text{m/m})$	$M_B/(\text{kN}\cdot\text{m/m})$	$M_C/(\text{kN}\cdot\text{m/m})$	$N_A/(\text{kN/m})$	$N_B/(\text{kN/m})$	$N_C/(\text{kN/m})$
规程法	9	32.9	21.9	-124.5	27.6	-23.1	-275.7	-240.3	-252.1
	9	12.9	12.9	-119.4	43.4	-32.6	-278.2	-240.3	-258.0
手册法	6	19.4	19.4	-179.2	65.1	-49.0	-297.1	-240.3	-266.9

(2) 抗力沿水平方向分布

按照上述计算方法, 分别计算顶力作用平面内土抗力分布范围和新增抗力, 如表 2 所示。

表 2 不同计算方法土抗力对比

Table 2 Comparison of soil counterforce from different methods

计算方法	有限元法	规范法	手册法
新增最大抗力/kPa	8.8	21.9	19.4
分布范围	全圆周	半圆周	半圆周

可以看出: 在工作荷载作用下, 规范法和手册法只考虑了顶力后背一侧半圆范围内土体抗力作用, 而忽略了另外半圆上的土体抗力的变化, 这种处理方式必然导致计算所得土抗力偏大。

4 深埋沉井的有限元分析

4.1 工程概况与计算模型

深埋沉井以湖南省耒阳电厂灰坝辐射井排渗工程中的 A2 辐射井为工程背景, A2 入土部分长

35 m, 上层为粉煤灰 (0~35 m), 下层为碎石土 (35~53 m), 沉井高出粉煤灰部分不予考虑, 沉井壁厚按平均为 50 cm 计算。垫板厚为 0.4 m, 长为 0.58 m, 所占角度为 $-15^\circ\sim 15^\circ$, 高为 1 m。导流钢管铺设时的最大可能顶力为 1 200 kN, 位于井底以上 3 m 和 18 m 处; 辐射管铺设时的最大可能顶力为 750 kN, 辐射管铺设范围在地面以下 7~17 m 范围内。

三维有限元分析共进行了 3 种工况的模拟。

工况 1: 顶力 $F=1\,200\text{ kN}$, 作用于距灰面 32 m 处, 用于模拟 A2~A3 井间导流钢管顶进。

工况 2: 顶力 $F=1\,200\text{ kN}$, 作用于距灰面 17 m 处, 用于模拟 A1~A2 井间导流钢管顶进。

工况 3: 顶力 $F=750\text{ kN}$, 作用于距灰面 7 m 处, 用于辐射管铺设。

有限元计算计算区域为 $90\text{ m}\times 80\text{ m}\times 57\text{ m}$, 共设置 56 812 个 Solid45 单元。

计算参数由室内外土工试验确定, 对应的钻孔编号为 ZK2, 计算参数见表 3。

表 3 A2 井计算参数表

Table 3 Calculation parameters for No. A2 well

试样编号	分布深度/m	含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$	湿密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	孔隙比 e	压缩系数/ MPa^{-1}	渗透系数/ (10^{-4} cm/s)	摩擦角/ $(^\circ)$
ZK2-1	0~17	24.90	1.02	1.34	1.06	0.29	0.707	21.20
ZK2-2	17~35	31.00	1.46	1.48	0.56	0.13	1.37	22.10

弹性模量按照表中压缩系数换算求得:

$$E=\frac{1+e_0}{a_v}\left(1-\frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) \quad (4)$$

式中: E 为灰层弹性模量 (MPa); a_v 为灰层压缩系数 (MPa^{-1}); e_0 为灰层初始孔隙比; ν 为泊松比。

由于粉煤灰在侧向效应上较黏土类似于砂土, 可取泊松比为 0.25, 换算所得上、下层粉煤灰的弹性模量分别为 5.9、13.3 MPa, 平均弹性模量为 9.6 MPa。

A2 沉井底为第四系残坡积 ($Q_4^{\text{el}+\text{dl}}$) 的黄色

粉质黏土夹粉白色风化砂岩碎石, 取弹性模量为 30 MPa, 泊松比为 0.2。

4.2 顶力作用位置对井壁变位的影响

不同工况土抗力沿深度分布情况见图 7。可以看出: 顶力作用位置不同, 沉井位移趋势不同。当顶力作用于沉井上部和下部时, 顶力后背侧井壁位移基本呈直线分布, 仅在顶力作用点处有不甚明显的转折, 最大位移分别为 4.72 mm 和 6.41 mm, 分别发生在沉井顶端和沉井底部。当顶力作用于沉井中部时, 沉井位移呈中部大、两端小的折线分布, 最大位移 3.71 mm 发生在顶力作用点处。

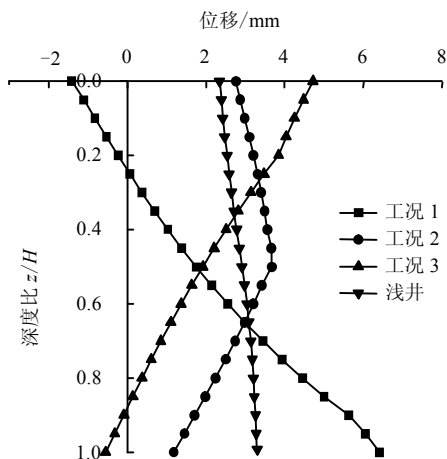


图 7 不同工况沉井位移对比

Fig.7 Comparison of displacements of open caisson in different construction conditions

4.3 顶力作用位置对土抗力的影响

不同工况土抗力沿深度分布情况见图 8。

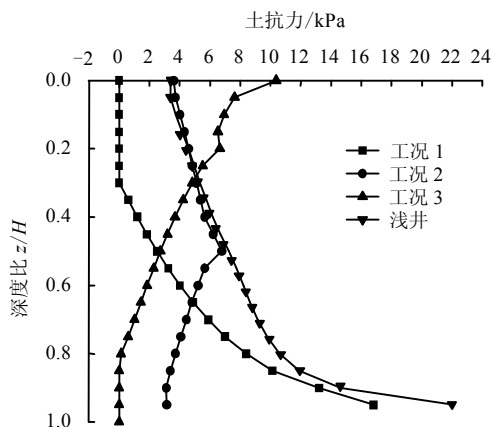


图 8 不同工况土抗力沿深度分布

Fig.8 Distribution of soil counterforce versus depth in different construction conditions

由图可以看出, 顶力大小和作用位置对土抗力的大小和分布影响显著。对于深埋沉井, 当顶力作用于沉井下部时, 在顶力后背一侧, 土体抗力的作用范围仅发生在沉井顶面以下一定范围内 (工况 1 为 $0.3H$ 以下); 而在沉井顶部, 其抗力将发生在顶力一侧。当顶力作用在沉井中部时, 抗力发生在整个沉井深度范围内, 其最大值出现在顶力作用点处。3 种工况土抗力的最大值分别为 16.8、6.79、10.38 kPa, 也说明规程法和手册法的计算方法仅适用于顶力作用于沉井底部处, 对顶力作用于沉井中、上部的情况不适用。

4.4 深埋和浅埋沉井土抗力作用范围的对比

如前所述, 在工作荷载下规范法和手册法认为,

土体抗力分布深度取值仅与抗力作用点与沉井底部的距离有关, 这种取值方法存在一定的经验性。手册法虽然兼顾了土抗力必须小于被动土压力的影响, 但对深埋沉井而言, 这种考虑往往起不到控制作用。为对比分析不同计算方法对土抗力在竖向分布范围的影响, 将以上两个工程案例分别采用不同计算方法确定其抗力分布范围, 列于表 4, 表中深度自沉井底部算起。由表可知, 说明规程法和手册法仅适用于浅埋沉井。

表 4 土抗力沿深度作用范围对比

Table 4 Comparison of effective of soil counterforce range in depth

参数	规程法		手册法		有限元法	
	深埋	浅埋	深埋	浅埋	深埋	浅埋
深度范围/m	9	9	6	6	25.515	9

当 $\theta \leq \theta_0$ 时, 土抗力沿圆周的分布情况为

$$q = q_A \cos \left(\frac{90^\circ}{\theta_0} \theta \right) \quad (5)$$

当 $\theta_0 < \theta \leq 180^\circ$ 时, 土抗力则为

$$q = q_C \cos \left[\frac{90^\circ}{(180^\circ - \theta_0)} (180^\circ - \theta) \right] \quad (6)$$

式中: θ_0 为计算参数, 其大小与计算截面所在高程、沉井与土体相对刚度有关。

5 结 论

(1) 当沉井作为顶管工程的工作井时, 顶力作用将在整个圆周上引起土体作用力变化。

(2) 顶力作用位置对深埋沉井的井壁变位、土抗力大小和分布影响显著。

(3) 《规程》和《手册》推荐的计算方法仅适用于顶力作用于沉井底部的浅埋沉井。

参 考 文 献

- [1] 上海市政工程设计研究院. CECS 137:2002 给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 上海市工程设计院. 给水排水工程结构设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [3] 陈建斌, 周立运. 粉煤灰坝动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3):437-440.

- CHEN Jian-bin, ZHOU Li-yun. Experimental research on dynamic property of fly-ash dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3):437—440.
- [4] 陈建斌, 周立运. 大型粉煤灰坝模型抗震试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1109—1113.
- CHEN Jian-bin, ZHOU Li-yun. Experimental study on earthquake resistance and failure test of models for large-sized fly-ash dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(7): 1109—1113.
- [5] 余彬泉, 陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [6] 赖惠清, 宋敏生, 刘功勋. 顶管工程后背反力计算及后背结构设计初探[J]. 广州建筑, 2001, (增刊): 47—52.
- LAI Hui-qing, SONG Min-sheng, LIU Gong-xun. On calculation of counterforce and structure design for back wall of pipe jacking project[J]. **Guangzhou Architecture**, 2001, (Supp.): 47—52.
- [7] 冯海宁, 徐日庆, 龚晓南. 沉井后背墙土抗力计算的探讨[J]. 中国市政工程, 2002, (1): 64—66.
- FENG Hai-ning, XU Ri-qing, GONG Xiao-nan. On calculation of earth resistance at caisson thrust wall[J]. **China Municipal Engineering**, 2002, (1): 64—66.
- [8] 宋伟宁, 葛春辉. 顶管工程中后座井壁荷载近似计算方法探讨[J]. 特种结构, 1995, 12(4): 31—35.
- SONG Wei-ning, GE Chun-hui. The approximate method of loads calculation at thrust area in pipe jacking construction[J]. **Special Structures**, 1995, 12(4): 31—35.
- [9] 王恒栋, 葛春辉, 王大龄, 等. 圆形沉井在顶力作用下的内力分析[J]. 特种结构, 2001, 18(2): 5—7.
- WANG Heng-dong, GE Chun-hui, WANG Da-ling, et al. Internal force analysis of circular sunk well under the action of jacking force[J]. **Special Structures**, 2001, 18(2): 5—7.
- [10] 夏明耀, 汪炳鑑, 王大龄. 圆形地下连续墙顶管工作井施工阶段和顶进阶段的内力计算与设计[J]. 同济大学学报, 1989, 17(1): 11—20.
- XIA Ming-yao, WANG Bing-jian, WANG Da-ling. Computation of internal force and design of circular diaphragm wall shaft of pipe jacking project in excavation stage and driving stage[J]. **Journal of Tongji University**, 1989, 17(1): 11—20.
- [11] 劭理中, 徐正良, 周顺华, 等. 穿越黄浦江顶管工程中的大深度顶管工作井设计[J]. 中国市政工程, 1996, (2): 21—25.
- SHAO Li-zhong, XU Zheng-liang, ZHOU Shun-hua, et al. Design of working well with deep depth pipe jacking project across Huangpu river[J]. **China Municipal Engineering**, 1996, (2): 21—25.
- [12] 成国保. 顶管工作井井壁压力分布研究[J]. 港工技术, 2003, (3): 24—25.
- CHENG Guo-bao. Study on distribution of pressure on pipe jacking working well[J]. **Port Engineering Technology**, 2003, (3): 24—25.
- [13] 闫治国, 朱合华, 李向阳, 等. 顶管同步顶进工作井稳定性三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 891—896.
- YAN Zhi-guo, ZHU He-hua, LI Xiang-yang, et al. 3D-FEM analysis of stability of shaft with conduit jacked synchronously in two directions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 891—896.
- [14] 魏纲. 顶管工程土与结构性状的理论研究[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [15] 向远华. 灰坝辐射井排渗系统施工技术与受力性能研究[硕士学位论文 R]. 长沙: 中南大学, 2007.