

# 内钢板复合井壁水平承载力数值模拟研究\*

齐善忠,付春梅

(黄河水利职业技术学院,河南 开封 475004)

**摘 要:**内钢板高强钢纤维混凝土复合井壁水平承载力受多因素影响。作者采用相似理论对水平承载力的影响因素进行了分析,并对典型参数模拟分析,得到了影响水平承载力的显著性因素依次为:混凝土厚度、内钢板厚度、混凝土强度等级。根据对大量模拟结果的回归分析,得到了复合井壁的水平承载力计算公式,该公式考虑的几何因素有内钢板厚度和钢纤维混凝土厚度,并且考虑了钢纤维混凝土强度等级。最后通过物理模型试验,说明了计算公式的可靠性,并且提出使用时需乘以0.9的系数进行折减。

**关键词:**复合井壁;水平承载力;相似理论;数值模拟

中图分类号:TD265.3      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2017)02-0493-06

## Numerical Simulation Study of Horizontal Bearing Capacity of Inner Steel Plate Compound Shaft Lining

Qi Shanzhong, Fu Chunmei

(Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng Henan 475004, P.R.China)

**Abstract:** Horizontal bearing capacity of inner steel plate compound shaft lining is influenced by multi-factor. Influence factors of horizontal bearing capacity were analyzed based on similarity theory. Through simulation calculation and analysis of typical-parameters, main influence factors of horizontal bearing capacity were got. By analyzing the results of numerical simulation, a calculation formula of estimating the horizontal bearing capacity of inner steel sheet and high-strength steel fiber reinforced concrete shaft lining was obtained. In the calculation formula, the diversified factors relating to the horizontal bearing capacity was considered. Finally, the applicability and reliability of the calculation formula was verified by model examples, and a reduction coefficient of 0.9 should be multiplied.

**Keywords:** compound shaft lining; horizontal bearing capacity; similarity theory; numerical simulation

### 0 引言

进入21世纪以来,由于经济建设发展的需要,我国埋藏较浅(小于600 m)的煤田已被开发,这时只有开发特厚冲积层覆盖(超过600 m)的矿区。在超过600 m冲积层的矿区建井,水平荷载较大,必须使用承载力较高井壁结构才能满足要求<sup>[1-3]</sup>。对埋藏较浅的矿井一般使用高强钢筋混凝土

井壁,但随着混凝土强度的提高,其脆性会显著增加,特别当混凝土等级超过C60后,井壁发生脆性破坏的危险性非常显著。同时,井壁厚度的增加将会降低矿井的使用率,增加建井费用,另外还会增加井壁出现温度裂缝的可能性<sup>[4]</sup>。

在超过600 m冲积层的矿区建井,一般采用新型井壁结构,或者增加井壁含钢量,掺入钢纤维以降低高强混凝土的脆性,提高延性<sup>[5]</sup>。新型井壁

\* 收稿日期:2016-08-17(修改稿)

作者简介:齐善忠(1979-),男,山东单县人,硕士,讲师,主要从事岩土特殊施工技术方面的教学与研究工作,

E-mail: qsz0219@126.com

基金项目:河南省教育厅科学技术重点项目(13B440124);黄河水院科技项目(2014KXJS018)

大多通过设置钢筋或内钢板来提高井壁的含钢量,达到提高水平承载力、减小井壁厚度目的,以满足在有特厚冲积层矿区建井的需要。陈湘生、臧桂茂、刘登攀等分别对多种新型井壁结构进行了理论分析和数值模拟,并且进行了一定数量的模型试验研究<sup>[1-12]</sup>。

相似第三定理的提出至今已近百年,在建筑结构、化工、热工、采矿、地下工程、矿山建筑等领域的广泛应用,对其学科发展起到了巨大的推动作用<sup>[13]</sup>。笔者首先利用相似理论进行无量纲分析,然后设定典型参数进行模拟计算,根据结果分析出对水平承载力的主要影响因素,并对主要影响因素进行模拟、回归分析,得到关于井壁水平承载力的计算公式,最后进行一定的物理模型试验,证明计算公式的可靠性。

1 数值模型设计

1.1 相似理论推导与无量纲化

在数值模型计算中使用了相似理论,将各变量之间的关系根据相似准则进行转化,从而减少变量个数,扩大计算结果的应用范围。

分析已有研究成果可知,影响井壁水平承载力的因素主要有结构尺寸、混凝土强度、竖向应力等,井壁模型示意图如图 1。

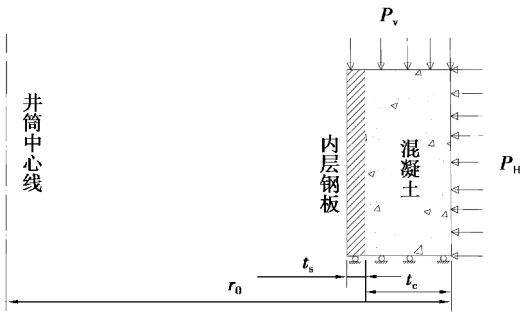


图 1 井壁模型示意图

Fig.1 Sketch map of model shaft lining

笔者通过对龙骨煤矿副井实测数据分析,温度变化对井壁水平承载力影响不显著;分析前人关于锚卡的研究,结果表明,对轴对称复合井壁结构水平承载力影响不显著<sup>[6]</sup>,因此,将温度和锚卡对水平承载力的影响列入次要因素。

综合考虑各影响因素可得参数方程:

$$F(r_0,t_c,t_s,P_v,f_{ck},f_s)=P_H \tag{1}$$

式中: $r_0$ 为井筒中心线至混凝土井壁外缘距离,m; $t_c$ 为混凝土径向尺寸,m; $t_s$ 为内钢板径向尺寸,m; $P_v$ 为竖向荷载,MPa; $P_H$ 为水平极限承载力,MPa; $f_{ck}$ 为混凝土立方体轴心抗压强度,MPa; $f_s$ 为内钢板屈服强度,MPa。

将计算模型无量纲化,并推导相似准则间的关系,可得到以下准则。

几何准则:

$$\pi_1=t_c/r_0,\pi_2=t_s/r_0,$$

力学准则:

$$\pi_3=P_v/f_{ck},\pi_4=P_H/f_{ck},\pi_5=f_s/f_{ck}$$

因此,有准则方程:

$$f\left(\frac{t_c}{r_0},\frac{t_s}{r_0},\frac{f_s}{f_{ck}},\frac{P_v}{f_{ck}}\right)=\frac{P_H}{f_{ck}} \tag{2}$$

1.2 建立有限元模型

使用 ANSYS 有限元软件建立三维有限元模型,模型中的钢板假设为理想弹塑性体,钢纤维混凝土假设为弹塑性体,并做以下简化和假设:

- (1)模型为中心轴对称结构;
- (2)钢板和混凝土接触位置设置接触单元;
- (3)模型井壁顶部位移耦合,底端进行位移约束;井壁内侧径向荷载为零、外侧为待求量;
- (4)井壁竖向荷载与模型井壁自重无关。

1.3 各因素取值范围的确定

根据现阶段工程实际情况,冲积层厚度小于 500 m 的已不存在技术问题,超过 1 000 m 则开采价值不大,现阶段矿井使用的混凝土最高标号为 C75,内钢板和混凝土部分太薄和太厚都没有实际意义,各因素变化步长主要考虑到实际工作量,由以上原因制定各因素取值范围和步长如下:根据深度可计算 500~1 000 m 对应的水平荷载为 12.5~25 MPa,步长取 2.5 MPa;钢纤维混凝土强度取 CF60~CF100,步长取 10;几何因素  $t_s/r_0$  取 0.006~0.02,步长 0.002, $t_c/r_0$  取 0.17~0.31,步长为 0.02。

1.4 计算方法

为降低计算工作量,该模型的计算采用 APDL 参数编写命令流,通过命令流程序循环计算,得到水平极限承载力。计算方法步骤如下:

- (1)建立模型,进行网格划分,并设接触单元;
- (2)模型顶部进行位移耦合、并施加应力;
- (3)施加一个初始水平荷载进行分析,若收敛则增加 1 MPa;

- (4)将每一步的计算结果输出到指定文件;
- (5)若模型不收敛,则利用二分法逼近极限值,当差值小于 0.05 MPa 时结束,并保存计算文件;
- (6)清除以上计算模型和参数;
- (7)转到步骤(1),继续下一组计算。

1.5 计算方案

为确定影响承载力各因素的显著性,对两个几何因素采用正交表  $L_{64}(8^9)$  安排计算方案,共 64 组几何模型。由本文第 1.3 节知竖向荷载和材料两个因素分别取 6 水平和 5 水平,本课题采用正交轮换的方法安排计算方案,有限元模型共有  $6 \times 5 \times 64 =$

1 920 组。

为降低工作强度,可选取典型参数分析各影响因素的显著性,在模拟计算过程中将非显著性因素取为定值。本课题选取的典型参数  $P_v$ 、 $f_{ck}$ 、 $t_s/r_o$ 、 $t_c/r_o$ ,分别取:12.5 MPa、CF60、0.006、0.17。

2 计算结果分析

2.1 典型参数计算分析

典型参数模拟计算时固定 3 个因素取典型参数,只变化另一个因素,以便分析各因素的显著性。将计算结果拟合曲线如图 2 所示。

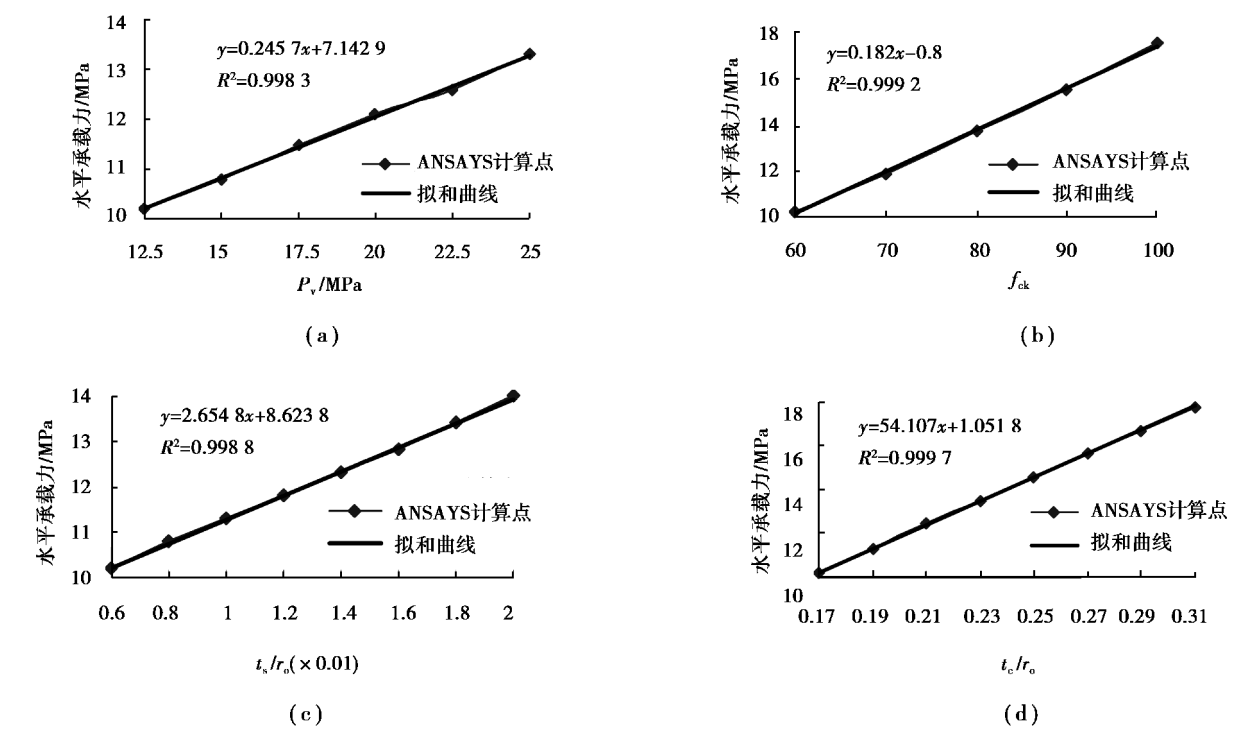


图 2 水平承载力与各因素之间的关系

Fig.2 Relation between horizontal bearing capacity and other factors

由图 2 可知,水平承载力与 4 个因素均呈直线关系。

根据  $H=400P_v$  分析图 2(a) 可知,深度对水平承载力的影响为每 100 m 变化 0.62 MPa,约为典型参数的 6.1%。而典型参数取实际工程中的较小值,随复合井壁承载力增大,深度的影响将变小。为减小计算工作量,将深度产生的竖向荷载近似地取为定值,按 700 m 深,取 17.5 MPa。

由图 2(b)、(c)、(d) 可知,  $t_c/r_o$  对承载力的影响大约是  $t_s/r_o$  的 20 倍,说明  $t_c/r_o$  比  $t_s/r_o$  对水平承载力影响更显著;混凝土强度对水平承载力影响的

显著性则不如  $t_s/r_o$  强,这 3 个因素对水平承载力的影响都较为显著,可称为关键因素。

为减少工作量,在数值计算中只考虑以上 3 个因素,这样需计算的有限元模型还有  $5 \times 64 = 320$  组。

2.2 正交分析

根据以上分析,数值模拟过程中只考虑关键因素的变化,其他因素取固定值,对得到的 320 组数据按照混凝土强度进行方差分析(自由度  $f=7$ ),如表 1 所示。

表 1 计算结果分析 ( $\alpha=0.05$ )

Table 1 Analysis of calculation results ( $\alpha=0.05$ )

因素	CF60		CF70		CF80		CF90		CF100	
	$t_c/r_o$	$t_s/r_o$	$t_c/r_o$	$t_s/r_o$	$t_c/r_o$	$t_s/r_o$	$t_c/r_o$	$t_s/r_o$	$t_c/r_o$	$t_s/r_o$
极差	7.7	3.8	9.0	3.7	10.4	3.7	12.1	3.7	13.5	3.7
平方和 S	406.09	96.23	565.96	95.15	753.10	95.42	1001.64	91.49	1 252.01	96.07
均方 S/f	58.01	13.75	80.85	13.59	107.59	13.63	143.09	13.07	178.86	13.73
统计量 F	375.84	88.93	325.10	54.52	278.76	35.17	490.84	44.68	651.92	49.87

对表 1 中极差和方差进行分析可知,混凝土厚度对水平承载力的影响最显著,钢板厚度次之。

2.3 计算结果的回归分析

为了便于本课题的研究成果推广应用,决定对计算结果进行无量纲回归分析,得到通用的计算公式。根据准则方程和典型参数分析,回归计算公式形式可以由式(3)表示,相关系数如表 2 所示。

$$P_H/f_{ck} = A \cdot t_s/r_o + B \cdot t_c/r_o + C \tag{3}$$

表 2 回归方程系数

Table 2 Coefficient of regression equation

A	B	C	R <sup>2</sup>
3.427 6	0.940 5	0.009 4	0.997 3

回归方程的相关系数  $R^2 = 0.997\ 3$ , 接近于 1, 说明回归方程是理想的。

3 物理模型实验

3.1 模型井壁设计

为验证回归方程是否安全可靠,专门进行了室内物理模拟试验。根据相似准则,模型井壁使用的混凝土、钢板、锚卡等材料均要与实际矿井井壁相同,锚卡的布置按百分率设置。

由于高压试验台空间尺寸问题,模型井壁外半径统一为 500 mm,高度统一为 2 100 mm(不包括上、下两端 100 mm 的钢制密封件)。根据矿井井壁的正常尺寸和本课题所考虑的相关因素,最终确定 3 个模型井壁的几何尺寸,具体如表 3 所示。

表 3 模型井壁的几何尺寸

Table 3 Physical dimension of model shaft lining

编号	1#	2#	3#
$t_s/\text{mm}$	5	5	3
$t_c/\text{mm}$	105	85	85

3.2 模型井壁的制作

制作模型井壁时首先在工厂进行加工内钢板和焊接锚卡,再在实验室布设钢板与混凝土接触位置的应变片和混凝土计,浇筑混凝土。模型井壁浇筑 3 d 后拆模,放进高温养护箱进行高温养护。高温养护时间为 7 d,结束后在模型井壁内、外两侧分别布设应变计、数据线保护处理等,混凝土浇筑和高温养护如图 3 所示。

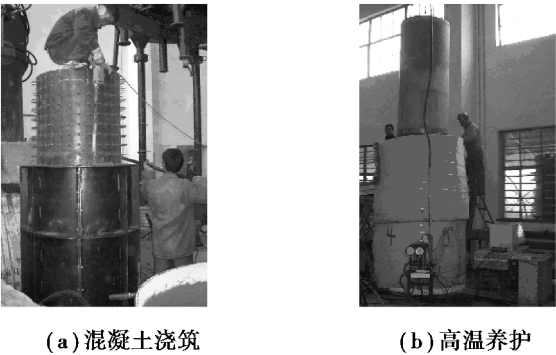


图 3 模型井壁的制作

Fig.3 Model shaft lining production

3.3 模型试验

模型试验是在如图 4 所示的“高压试验台”上进行的,试验结束后在压力机上测得同条件下养护的混凝土试件单轴抗压强度  $f_{cu}$ 。

模型试验测得的水平极限承载力、混凝土轴向





图 4 高压试验台照片

Fig.4 High pressure test rig

抗压强度 $f_{cu}$ ,以及根据式(3)计算的水平极限承载力,如表 4 所示。

表 4 模型井壁水平极限承载力试验结果(单位:MPa)  
Table 4 Experimental results of horizontal ultimate bearing capacity of model shaft lining (unit: MPa)

编号	1#	2#	3#
$f_{cu}$	91.6	95.2	91.1
计算值	22.09	19.38	17.30
试验值	20.90	19.57	16.49
计算值/试验值	105.69%	99.03%	104.91%

3.4 模型试验结果分析

由表 4 可知,模型井壁按公式计算与模型实验得到的水平极限承载力并不一致。这主要是因为数值计算时模型井壁的材料是均质的、受力是理想的轴对称状态;而物理模型井壁的材料是非均质的,钢板加工、混凝土浇筑,以及受力都很难达到轴对称状态,并且模型井壁中还埋设有传感器,也会对井壁的受力产生影响。因此,物理模拟实验得到的水平极限承载力偏小,在应用式(3)时应乘以一个折减系数,为了安全建议折减系数取 0.9。

4 结论

- (1)在内钢板复合井壁水平承载力数值分析中使用了无量纲相似准则,以及关键因素分析,减少了变量个数,有效降低了计算工作量。
- (2)在数值模拟过程中,通过对典型参数的分析、正交分析,得到了对内钢板复合井壁水平承载

力影响的各因素主次关系,其影响的显著性依次为:钢纤维混凝土厚度、内钢板厚度、钢纤维混凝土强度等级。

(3)通过多因素回归分析得到了复合井壁水平承载力的计算公式,经室内物理模拟实验证明,回归的计算公式计算结果比物理模型试验得到的结果偏大,进行折减后具有一定的适用性与可靠性,并且建议折减系数取 0.9。

参考文献(References)

[1] 姚直书,桂建刚,程桦,等. 内层钢板高强钢筋混凝土复合井壁数值模拟[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35 (1): 35-38. ( Yao Zhishu, Gui Jiangang, Cheng Hua, et al. Numerical simulation for composite shaft lining of inner steel cylinder and high strength reinforced concrete [J]. Journal of Guangxi University ( Natural Science ), 2010, 35 (1): 35-38. ( in Chinese ))

[2] 姚直书,程桦,荣传新. 深冻结井筒内层钢板高强钢筋混凝土复合井壁试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (1): 153-160. ( Yao Zhishu, Cheng Hua, Rong Chuanxin. Experimental study on composite shaft lining of inner steel plate cylinder and high strength reinforced concrete in deep frozen shaft [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 153-160. ( in Chinese ))

[3] 姚直书,秦一雄,程桦,等. 双层钢板混凝土复合井壁设计计算方法研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2008, 28 (3): 14-18. ( Yao Zhishu, Qin Yixiong, Cheng Hua, et al. Study on design method of composite shaft lining with concrete and double steel cylinder[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology ( Natural Science ), 2008, 28 (3): 14-18. ( in Chinese ))

[4] 陈晓祥,杨维好. 新型单层冻结井壁水平极限承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (增 2): 181-186. ( Chen Xiaoxiang, Yang Weihao. Experimental study of horizontal ultimate loading capacity of new type monolayer freezing shaft lining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 ( Supp. 2 ): 181-186. ( in Chinese ))

[5] 韩涛,杨维好,任彦龙,等. 钢骨混凝土井壁水平极限承载特性的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,

2011,28(2):181-186. (Han Tao, Yang Weihao, Ren Yanlong, et al. Horizontal ultimate bearing capacity of encased steel concrete shaft lining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28 (2): 181-186. (in Chinese))

[6] 洪伯潜. 约束混凝土结构在井筒支护中的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 150-154. (Hong Boqian. The research and application of confined concrete structure in shaft lining[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 150-154. (in Chinese))

[7] 姚直书, 荣传新. 双层钢板高强混凝土复合井壁强度的数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(3): 321-323. (Yao Zhishu, Rong Chuanxin. Numerical simulation on strength of composite shaft lining of high strength concrete and double steel cylinder [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2004, 23(3): 321-323. (in Chinese))

[8] 姚直书, 余贵华, 程桦, 等. 特厚表土层钢板混凝土复合井壁竖向承载力试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1687-1691. (Yao Zhishu, Yu Guihua, Cheng Hua, et al. Research on vertical bearing capacity of shaft lining structure of high strength concrete and double steel cylinders in super-thick alluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1687-1691. (in Chinese))

[9] 姚直书. 巨厚冲积层钢筋钢纤维高强混凝土井壁试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1253-1258. (Yao Zhishu. An experimental study on steel fiber reinforced high strength concrete shaft lining in deep alluvium [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (7): 1253-1258. (in Chinese))

[10] 齐善忠. 钢板-高强钢纤维混凝土复合井壁力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006. (Qi Shanzhong. Research on the mechanical characteristics of shaft lining consisting of steel sheet and high-strength steel fiber reinforced concrete [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2006. (in Chinese))

[11] 吴娟, 钱魏魏. 高强钢筋混凝土井壁水平极限承载特性实验[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2012, 32(4): 56-59. (Wu Juan, Qian Weiwei. Horizontal ultimate bearing capacity test of high strength reinforced concrete shaft lining [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 32(4): 56-59. (in Chinese))

[12] 张荣立, 何国纬, 李铎. 采矿工程设计手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010. (Zhang Rongli, He Guowei, Li Duo. Designing guidebook of coal mining [M]. Beijing: China Coal Industry Press, 2010. (in Chinese))

[13] 崔广心. 相似理论与模型试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990. (Cui Guangxin. Similitude theory and model test [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1990. (in Chinese))