

文章编号:0253-9993(2013)04-0600-04

# 基于接触面孔隙率的含水基岩井壁外荷载研究

柏东良<sup>1</sup>,杨维好<sup>1,2</sup>,杨志江<sup>1,2</sup>,韩涛<sup>2</sup>,张驰<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221008;2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院,江苏 徐州 221008)

**摘要:**为更合理地设计井壁,在多孔介质孔隙率相关问题研究的基础上,提出了基于井壁与围岩接触面孔隙率  $n_p$  以及围岩径向卸载率  $\eta_1$  的新井壁外载计算方法;分析了  $n_p$  和  $\eta_1$  对井壁径向外载的影响。分析表明:随  $n_p$  增大孔隙水压力作用增强,随  $\eta_1$  增大围岩压力影响降低,井壁设计与施工中应在避免接触面固体骨架受拉的前提下合理提高  $\eta_1$ 。

**关键词:**孔隙率;含水岩层;井壁;荷载;卸载率

**中图分类号:**TD265.32 **文献标志码:**A

## Study on radial loads of mine shaft lining in rock aquifer based on porosity of contact surface

BO Dong-liang<sup>1</sup>, YANG Wei-hao<sup>1,2</sup>, YANG Zhi-jiang<sup>1,2</sup>, HAN Tao<sup>2</sup>, ZHANG Chi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** In order to form a more rational design of shaft lining, a formula was put forward, in which the porosity of contact surface between shaft lining and surrounding rock  $n_p$  and ratio of radial unloading of surrounding rock  $\eta_1$  was taken into account, based on study of porosity of porous media. The influence of  $n_p$  and  $\eta_1$  on shaft lining was analyzed. The analysis shows that the influence becomes strong with increase of  $n_p$  and the impact of surrounding rock pressure becomes weak with increase of  $\eta_1$ . Raising  $\eta_1$  rationally under precondition of avoiding stripping of solid skeleton should be done in design and construction. The result of the new method is smaller than that of current method and smaller than the pore water pressure obviously.

**Key words:** porosity; rock aquifer; mine shaft lining; loads; ratio of unloading

近年来,在内蒙古、陕西、山西、宁夏、新疆等地大量大直径、深立井井筒正在或即将建设<sup>[1]</sup>。在这些地区,表土层较薄,白垩系和侏罗系岩层厚度大,且孔隙含水丰富。水荷载是含水岩层中井壁设计的重要荷载,但现行井壁设计方法对孔隙水压力的作用考虑不足<sup>[2]</sup>。

目前基岩段井壁荷载计算方法有平面挡墙理论、经验地压公式、轴对称挡土墙地压公式以及夹心墙理论<sup>[3]</sup>等。上述计算方法中均未考虑孔隙水压力的影响。随深度的增加,孔隙水压力的作用逐步凸显。如何科学地反映孔隙水压力的作用是必须解决的井壁

设计理论问题之一。

交通隧道工程中在“以堵为主,限量排放”的原则下对水压力进行计算,设计中常将理论水压进行折减,系数一般表示为3个系数的乘积,即

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \quad (1)$$

其中,  $\beta_1$  反映地下水压因传递阻力而产生的水压降低;  $\beta_2$  考虑水荷载作用面积减小的折减;  $\beta_3$  考虑排水情况的水压降低<sup>[4-9]</sup>。井筒一般埋深大、水压大,且要求严格封水,因此交通隧道中采取的地下水处理方式不适用于井筒。

Farmer I W 等<sup>[10]</sup>研究了考虑水渗流时作用于井

收稿日期:2012-05-07 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家高科技研究发展计划(863)资助项目(2012AA06A401);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介:柏东良(1986—),男,河北承德人,博士研究生。E-mail:dlbed@cumt.edu.cn。通讯作者:杨维好(1966—),男,安徽淮南人,教授,博士生导师。E-mail:whyang@cumt.edu.cn

壁上的水压力,认为作用于井壁与围岩接触面处的水压可根据井壁与围岩的相对渗透性进行折减。

Black J C 等<sup>[11]</sup>通过对井筒掘砌过程的分析认为:混凝土井壁砌筑初期围岩处于卸载状态,围岩变形压力很小;水压是在井壁与围岩形成密闭结构后进水量大于渗出量时才逐渐形成。井壁成型后,围岩压力与水压都作用于井壁,井壁的微小变形会使得井壁与围岩间隙充满地下水,此时只有水压力作用于井壁。基于上述分析认为井壁在运营期间全部外表面承受全部静水压力。

韩涛<sup>[12]</sup>对含水基岩段井壁荷载进行了分析,考虑了以多孔围岩孔隙率作为组合参数的井壁荷载计算方法,但未考虑同样是多孔介质的混凝土井壁的孔隙特征对荷载组合系数的影响。

综上所述,交通隧道工程中的水处理方式不适合于井筒;现行基岩段井壁荷载计算方法对孔隙水压力考虑的较粗略:要么不考虑,结算结果偏于危险;要么认为其作用于全部外表面,结果偏于保守。对水、岩压力共同作用的微观基础还没有系统的认识。本文从井壁与围岩接触面孔隙率的角度出发,探索考虑因素更全面、计算结果更合理的井壁外载计算方法。

### 1 多孔介质孔隙率研究

含水岩层中的井壁与围岩接触面有大量孔隙分布,包括连通孔隙与孤立的闭合孔隙。接触面的连通孔隙影响着孔隙水压力与围岩骨架变形压力对井壁的作用,要定量地分析此问题,首先需要对多孔介质的孔隙率相关基础问题进行研究。以下孔隙率均指连通孔隙率。

#### 1.1 多孔介质的体孔隙率与面孔隙率

文献[13]通过理论分析认为多孔介质的体孔隙率、面孔隙率和线孔隙率相等,但未进行试验验证。

利用编程语言对 AutoCAD 进行二次开发<sup>[14]</sup>,生成以球体(图1)、长方体、圆柱体、楔形体以及4种形状混合的多孔介质立方体模型,其中孔隙单元的几何参数与位置参数随机生成。对多孔介质立方体进行平面截切(图2),统计截面孔隙率,得到面孔隙率与体孔隙率的关系(图3),可见二者数值相等,且孔隙形状的影响很小,结论与文献[13]一致。

#### 1.2 多孔介质接触面孔隙率

井壁与围岩接触面的孔隙率决定了孔隙水和围岩骨架的作用面积,是一个重要的参数。根据概率论可得接触面孔隙率理论值为

$$n_p = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2 \quad (2)$$

式中, $\alpha_1, \alpha_2$  分别为围岩和井壁孔隙率。

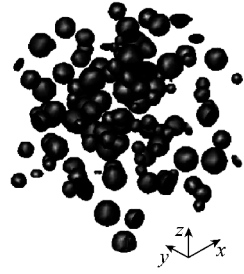


图1 多孔介质球形孔隙形态

Fig.1 Form of spherical pore of porous media

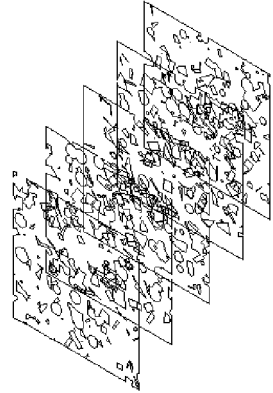


图2 平截面孔隙形态

Fig.2 Pores form of cross section

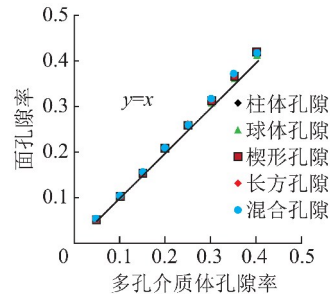


图3 多孔介质体孔隙率与面孔隙率关系曲线

Fig.3 Relationship curve between volumetric porosity and superficial porosity

用计算机模拟方法验证式(2)。假设  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ , 则式(2)变为  $n_p = 2\alpha - \alpha^2$ 。对多孔介质进行平面截切,将两不同截面进行重叠(图4),统计得到接触面孔隙率(图5),可见不同单元形态下的计算值与理论值均非常吻合,且孔隙形状影响很小。

### 2 井壁外荷载分析

井壁与围岩间的接触状态可分为:

- (1) 不完全贴合。井壁与围岩间存在剥离区,剥离区井壁只受水压作用,应避免此种不利工况。
- (2) 完全贴合。孔隙水和围岩骨架压力分别通过接触面孔隙和固体接触部分作用于井壁上。本文研究该种工况下的荷载计算。

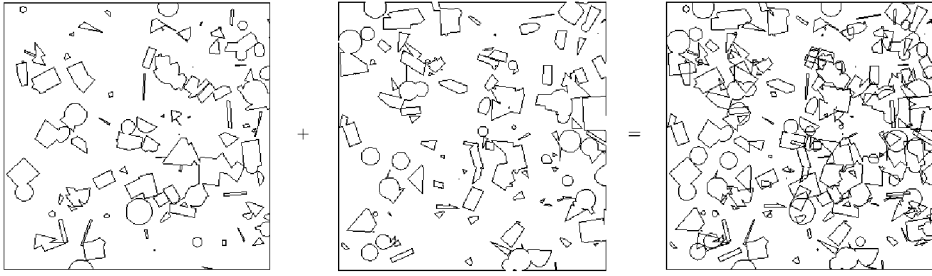
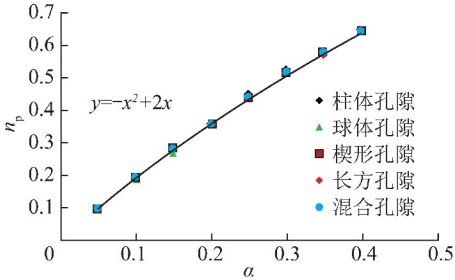


图4 两多孔介质表面及接触面孔隙形态

Fig. 4 Surface of two porous media and the form of the porosity of interface

图5  $n_p$  与  $\alpha$  关系曲线Fig. 5 Relationship curve between  $n_p$  and  $\alpha$ 

在井壁与围岩接触面上,根据力的平衡关系有

$$f = (1 - n_p)\sigma + n_p u \quad (3)$$

式中, $f$ 为井壁的法向荷载,MPa; $\sigma$ 为接触面上固体骨架传递的法向应力,MPa; $u$ 为孔隙水压力,可取为相应深度处静水压力,MPa。

在工作面疏排水影响范围内(普通法凿井),或在冻结壁解冻前(冻结法凿井),可认为 $u=0$ ,则有

$$f = (1 - n_p)\sigma \quad (4)$$

此时, $\sigma$ 可表示为

$$\sigma = p_0(1 - \eta)/(1 - n_p) \quad (5)$$

其中, $p_0$ 为无水条件下岩体原始水平应力,MPa; $\eta$ 为井壁未受孔隙水压力作用时的围岩径向卸载率,完全卸载时 $\eta=1$ ,未卸载时 $\eta=0$ ,其详细研究见文献[12]。可见此时 $f$ 随 $\eta$ 的增大而降低,反之亦然。

在井壁正常运营阶段,因允许的渗漏量很小,可认为 $u=\gamma_w H_w$ ,其中 $\gamma_w$ 为水容重, $\text{MN}/\text{m}^3$ ; $H_w$ 为计算点的水头高度,m。在冻结法凿井冻结壁解冻或普通法凿井成井过程中,随壁后孔隙水的积聚,水压增大,在孔隙水压作用下井壁发生变形,接触面上固体骨架进一步卸载, $\sigma$ 变为

$$\sigma = p_0(1 - \eta_1)/(1 - n_p) \quad (6)$$

式中, $\eta_1 = \eta + \Delta\eta$ ; $\Delta\eta$ 与井壁几何、物理力学参数,围岩的力学参数以及 $u$ 等有关, $\Delta\eta \geq 0$ , $\eta + \Delta\eta \leq 1$ ,具体参见文献[12]。当接触面上固体骨架完全卸载时, $\eta_1=1$ ,此时有 $\sigma=0$ 且

$$f = n_p u \quad (7)$$

由于井壁的刚度不足等原因,在孔隙水压作用下,会出现 $\sigma$ 为负(即接触面固体骨架受拉)的情况, $f$ 随拉应力的增大而减小,当 $\sigma$ 达到接触面固体骨架极限抗拉强度( $\sigma = -\sigma_1$ , $\sigma_1 > 0$ )时,有

$$f = n_p u - (1 - n_p)\sigma_1 \quad (8)$$

此时井壁的径向荷载达最小值。

当井壁在孔隙水压作用下部分与围岩剥离时,接触面孔隙率变形为 $n_p + \Delta n_p$ ( $\Delta n_p > 0$ ),此时有

$$f = (n_p + \Delta n_p)u - (1 - n_p - \Delta n_p)\sigma_1 \quad (9)$$

可见,此种情况下井壁受到的总径向荷载反而比式(8)增大了。

当井壁与围岩完全剥离时, $n_p + \Delta n_p = 1$ ,有

$$f = u \quad (10)$$

即井壁全外表面承受全部静水压作用,为井壁最不利的工况。

为确保安全,应避免井壁与围岩接触面的固体骨架受拉,即应遵循以下原则:在避免接触面固体骨架受拉的前提下合理降低井壁荷载。这要求在设计时通过控制掘进施工段高和井壁参数等对 $\eta_1$ 进行合理取值。张驰<sup>[15]</sup>对 $\eta$ 取值有较为系统的研究,得出冻结壁内缘径向 $\eta$ 取值在0.403~0.911,常见值0.7~0.9。由于 $\eta_1 \geq \eta$ ,一般 $\eta_1 \geq 0.85$ ,这时井壁的厚度往往受井壁的刚度要求控制,见文献[12]。

### 3 算 例

某井筒深 $H=800$  m,地层容重 $\gamma=24$   $\text{kN}/\text{m}^3$ ,内摩擦角 $\varphi=38^\circ$ ,泊松比 $\nu=0.3$ ,无构造应力。围岩孔隙率取为 $\alpha_1=0.2$ ,井壁混凝土孔隙率为 $\alpha_2=0.08$ 。根据式(2)可得基岩与井壁接触面孔隙率为 $n_p=0.264$ ,计算水位高度取自地面,则孔隙水压力为 $u=8$  MPa。

按现行规范<sup>[2]</sup>计算的井壁荷载为

$$p = \gamma H \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \approx 4.57 \text{ MPa}$$

无水条件下岩体原始水平应力为

$$p_0 = \gamma H(1 - \alpha_1) \frac{\nu}{1 - \nu} \approx 6.58 \text{ MPa}$$

按本文方法计算的井壁荷载为(取  $\eta_1 = 0.85$ )

$$f = 6.58(1 - 0.85) + 0.264 \times 8 \approx 3.01 \text{ MPa}$$

本文方法计算的含水岩层中井壁径向外载为现行方法的 65.9%,且明显小于静水压力。

## 4 结 论

(1)多孔介质的体孔隙率与面孔隙率数值相等,与孔隙形状无关。

(2)2个多孔介质接触面的孔隙率与两多孔介质各自的面孔隙率有关,可表示成式(2)。

(3)含水岩层中井壁径向外载  $f$  可用式(3)表示。 $f$  与井壁和围岩接触面的孔隙率有关,随孔隙率的增大,水压力作用增强。

(4)井壁设计中应在避免接触面固体骨架受拉的前提下合理降低井壁径向荷载。

## 参考文献:

- [1] 周晓敏,陈建华,罗晓青. 孔隙型含水基岩段竖井井壁厚度拟定设计研究[J]. 煤炭学报,2009,34(9):1174-1178.  
Zhou Xiaomin, Chen Jianhua, Luo Xiaoqing. Research on the preliminary thickness design of shaft lining in porous rock aquifer[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1174-1178.
- [2] GB 50384—2007, 煤矿立井井筒及硐室设计规范[S].  
GB 50384—2007, Code for design of coal mine shaft and chamber [S].
- [3] 刘希亮. 深厚表土不稳定地层中井壁受力研究[M]. 北京:煤炭工业出版社,2003.  
Liu Xiliang. Research on stress of shaft lining in deep and unstable soil[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2003.
- [4] 张有天,张武功. 隧洞水荷载的静力计算[J]. 水利学报,1980(3):52-62.  
Zhang Youtian, Zhang Wugong. Static calculation of water load acting on tunnels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980(3): 52-62.
- [5] 张有天,张武功,张 镭. 再论隧洞水荷载的静力计算[J]. 水利学报,1985(3):22-32.  
Zhang Youtian, Zhang Wugong, Zhang Lei. Further study on static calculation of water load acting on tunnels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985(3): 22-32.
- [6] 陈林杰,蒋树屏,丁 浩. 公路隧道外水压力折减规律研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(3):383-404.

- Chen Linjie, Jiang Shuping, Ding Hao. Research on discount rule of external water pressure for highway tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2008, 27(3): 383-404.
- [7] 郑 波. 隧道衬砌水压力荷载的实用化计算研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2010.  
Zheng Bo. Practical calculation of water load pressure on tunnel lining[D]. Beijing: China Academy of Railway Science, 2010.
- [8] 姜安龙,郭云英. 隧道衬砌外水压力计算方法研究[J]. 南昌航空工业学院学报(自然科学版),2006,20(4):28-32.  
Jiang Anlong, Guo Yunying. Study on the computation method of external hydraulic pressure upon tunnel lining[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology (Natural Science), 2006, 20(4): 28-32.
- [9] 崔 岩,崔京浩,吴世红,等. 浅埋地下结构外水压折减系数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(1):82-84.  
Cui Yan, Cui Jinghao, Wu Shihong, et al. Testing study of reduction factor for the pore water pressure of underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 82-84.
- [10] Farmer I W, Jennings D H. Effect of strata permeability on the radial hydrostatic pressures on mine shaft linings[J]. International Journal of Mine Water, 1983, 2(3): 17-24.
- [11] Black J C, Auld F A. Current and future UK practice for the permanent support of shaft excavations[J]. International Journal of Mining Engineering, 1985(3): 35-48.
- [12] 韩 涛. 富水基岩单层冻结井壁受力规律及设计理论研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2011.  
Han Tao. Study on the loads and design theory of the monolayer freezing shaft lining in water-rich bedrock [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [13] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999.  
Kong Xiangyan. Advanced mechanics of fluids in porous media [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1999.
- [14] 张晋西. Visual Basic 与 AutoCAD 二次开发[M]. 北京:清华大学出版社,2002.  
Zhang Jinxi. Secondary development of Visual Basic and AutoCAD [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [15] 张 驰. 富水岩层中新型单层冻结井壁关键施工技术与工艺研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2012.  
Zhang Chi. Study on key construction technologies of the new monolayer freezing shaft lining in deep water-rich bed rock [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.