

# 不同储气内压下盐岩地下储气库可靠性分析\*

贾超<sup>1</sup>, 张强勇<sup>1</sup>, 刘家涛<sup>1</sup>, 沈鑫<sup>1</sup>, 李术才<sup>1</sup>, 杨春和<sup>2</sup>

(1. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

**摘要:**目前我国已经开始大规模兴建盐岩能源地下储库群,客观存在的不确定性因素使得盐岩地下储气库不可避免地存在风险,因此开展盐岩地下油气储库风险分析研究具有重要的理论意义和工程应用价值。本文探索基于可靠度的随机力学方法在盐岩地下储气库工程中的应用,以金坛盐岩地下储气库为研究对象,基于可靠度随机力学分析方法对盐岩地下储气库的可靠性进行分析,建立了盐岩破坏的功能函数,探讨其不同储气内压下,在材料强度参数为随机的情况下盐岩可靠性的变化规律,经过计算指出储气库薄弱部位,为储库安全运营提供技术依据。

**关键词:** 金坛盐岩储气库; 可靠度; 随机有限元; 随机因素; 储气内压

中图分类号: TE122.2 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2011)02-0276-05

## Reliability Analysis for Underground Saltrock Gas Storage under Different Gas Pressure

Jia Chao<sup>1</sup>, Zhang Qiangyong<sup>1</sup>, Liu Jiatao<sup>1</sup>, Shen Xin<sup>1</sup>, Li Shucui<sup>1</sup>, Yang Chunhe<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Energy storage is in great demand for the national strategy, large-scale underground salt-rock storage constructions have begun in China. Objective uncertainties cause unavoidable risk in underground saltrock gas storage. Therefore, it is very significant to develop an effective risk analysis technique in underground saltrock gas storage. In this paper reliability-based stochastic mechanism method was used in risk analysis of Jintan underground saltrock gas storage, the failure mode performance function was established, the reliability index variation law of saltrock gas storage was obtained under different gas pressure when the strength parameters were considered as the random parameters. The weak part of the gas storage was pointed out through calculations, which can provided scientific basis for gas storage safety operation.

**Keywords:** Jintan saltrock gas storage; reliability; stochastic finite element method; random factors; gas pressure

## 1 引言

盐岩能源储备是利用水溶法开采地下盐矿而形成的大型地下空间实施油气储备(如图1),利用

深部盐岩洞穴进行能源地下储备是国际上广泛认可的能源储备方式,我国能源盐岩地下储备也已成为能源战略储备的重点部署方向<sup>[1]</sup>。建设中的江苏金坛盐岩储气库,2010年将达到15个单腔(单

\* 收稿日期:2010-12-07(修改稿)

作者简介:贾超(1976-),男,江苏徐州人,博士(后),副教授,主要从事工程可靠度风险分析方面的教学与科研工作。E-mail: jiachao@sdu.edu.cn

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)(2009CB724607);山东大学自主创新基金资助(2009TS092)

腔容积约为  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ ) 的规模, 最终将形成由 100 ~ 120 个单腔组成的密集地下储气库群。同时, 一个由 50 ~ 60 个单腔组成的大型地下石油储库群也将在金坛盐矿兴建, 原油储备可达  $3 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6 \text{ t}^{[2]}$ 。尽管相对于其它储存围岩体, 盐岩能源地下储备库具有较好的安全性, 但近三十年来, 国外盐岩地下储库灾难性事故, 如油气泄漏导致的火灾爆炸、溶腔失效和库区地表沉陷等时有发生, 且事故突发性强、破坏力大, 对安全及环境产生巨大灾难影响<sup>[3]</sup>。因此对盐岩地下储库进行可靠性分析具有重要意义。

今拟采用基于可靠度的随机力学分析方法对金坛地下储气库进行风险分析。盐岩地下储气库作为一种大型的地下工程具有随机因素众多、块体结构与失效模式多样性和不确定性、高度非线性等特有的特征, 因而工程可靠度随机力学方法在盐岩地下储气库工程中应有广泛的应用发展空间, 并且该法已在土木、水利工程得到了若干应用<sup>[4~6]</sup>, 但遗憾的是目前国内外将基于可靠度的随机力学方法应用于该领域进行分析研究尚未见有相关报道, 其研究深度和广度都有待于发展提高。

本文探索将可靠度的随机力学分析方法引入到盐岩地下储气库的可靠性分析中, 探讨其在不同储气内压下, 在材料强度参数为随机的情况下, 沿腔可靠性的变化规律, 经过计算指出储气库薄弱部位, 为储库安全运营提供技术依据。

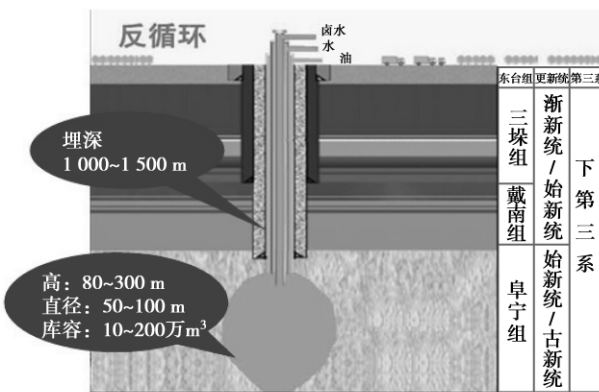


图 1 岩盐地下溶腔形成过程示意图

Fig. 1 Underground salt rock cavern formation diagram

## 2 可靠度计算方法

目前, 求解可靠指标的方法很多, 现运用结构可靠度计算的优化算法(几何法)来求解可靠指标<sup>[4]</sup>。根据可靠指标的几何含义, 可靠指标的获得也就是在功能函数面  $G(Y)$  上寻找一个点  $Y^*$ ,

使该点与均值点的距离最短, 从而使该问题成为一个优化问题, 即:

$$\text{目标函数: } \beta = \min(Y^* T Y^*)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{约束函数: } G(Y^*) = 0 \quad (1)$$

用优化算法(几何法)求解可靠指标  $\beta$  的思路是: 先假设验算点  $X^*$ , 将验算点值代入极限状态方程  $g(X^*)$ , 此时, 一般  $g(X^*) \neq 0$ , 沿着  $g(X) = g(X^*)$  所表示的空间曲面在  $X^*$  点处的梯度方向前进(或后退), 得到新的验算点  $X^*$  代入极限状态方程, 如果  $g(X^*) > \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为控制精度), 则继续进行迭代; 如果  $g(X^*) \leq \varepsilon$ , 则表示验算点已在失效边界上, 迭代停止, 即可求出  $\beta$  值及设计验算点的值。具体迭代步骤如下:

(1) 确定正态随机变量  $X$  和极限状态方程  $g(X) = 0$ ;

(2) 正态随机变量  $X$  转换成标准正态随机变量  $Y$ :

$$Y = TX + B$$

式中:  $T$  为随机变量转换矩阵;  $B$  为补充转换向量;  $T$  和  $B$  可由 Rosenblatt 方法<sup>[7]</sup> 或李同春提出的 Cram-Schmidt 正交化方法<sup>[8]</sup> 求出;

(3) 定初始迭代点  $X^{(0)}$ , 一般以均值点  $\bar{X}$  为初始迭代点, 此时  $Y^{(0)} = 0$ ;

(4) 求出极限状态方程的梯度  $\nabla G(Y)$ :  $\nabla G(Y) = T^{-1} \nabla g(X)$ ;

(5) 求迭代点移动方向  $\alpha$ :  $\alpha = - \nabla G(Y) / \nabla G(Y)$ ;

(6) 求迭代点移动步长  $a$ :  $a = G(Y) / \nabla G(Y)$ ;

(7) 为了保证  $Y^{(Y)}$  坐标原点与新的迭代点  $Y^{(Y+1)}$  之间的连线是沿着  $Y^{(Y)}$  点所在曲线的梯度方向, 将  $Y^{(k)}$  修正为:  $Y^{(k)} = Y^{(k)} T \alpha a$ ;

(8) 迭代公式为:

$$Y^{(k+1)} = (Y^{(k)} T \alpha + \frac{G(Y^{(k)})}{\nabla G(Y^{(k)})}) \alpha$$

(9) 求新的验算点  $X^{(k+1)}$ :

$$X^{(k+1)} = T^{-1}(Y^{(k+1)} - B)$$

(10) 计算可靠指标  $\beta$ :  $\beta = \sqrt{Y^T Y}$ ;

(11) 计算  $g(X)$  (或  $G(Y)$ ), 进行收敛判别。

如果  $g(X) > \varepsilon$ , 则继续迭代, 回到步骤④; 如果  $g(X) \leq \varepsilon$ , 则表示已达失效边界, 迭代停止。

## 3 基于随机有限元法的可靠度分析

为详细分析盐岩地下储库的可靠性, 应对储库整体进行随机有限元分析, 得出各点的可靠指标。

各类随机有限元的计算,最重要的是要得出位移和应力的均值和方差<sup>[9]</sup>,本文对盖层岩体采用线弹性 Taylor 展开法随机有限元(TSFEM)进行分析,设基本随机变量为  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ ,则基本列式如下:

$$KU = F \quad (2)$$

$$\sigma = DBU \quad (3)$$

$$E[U] = \bar{K}^{-1}\bar{F} \quad (4)$$

$$Var[U] \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial U}{\partial X_i} \Big|_{X=\bar{X}} \cdot \frac{\partial U}{\partial X_j} \Big|_{X=\bar{X}} Cov(X_i, X_j) \quad (5)$$

以上各式中:  $U$  为位移列阵,  $F$  为等效接点荷载列阵,  $K = \sum \iiint_{\Omega} B^T DB dv$  为整体刚度矩阵,  $B$  为形变矩阵,  $D$  为弹性矩阵,  $E[\cdot]$  表示求均值,  $Var[\cdot]$  表示求方差,  $Cov(X_i, X_j)$  为  $X_i, X_j$  的协方差。同样,将应力  $\sigma$  在均值点处 Taylor 展开,也有与上式(4)、式(5)类似的表达式。

对盐岩层采用非线性随机有限元进行分析<sup>[10]</sup>,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,基于随机有限元的可靠度计算关键在于计算功能函数对各随机变量的偏导数,在单元进入塑性之前,可靠指标的计算由下列式子给出  $g(\sigma, X_R)$  的均值和方差:

$$E[g(\sigma, X_R)] \approx g(\bar{\sigma}, \bar{X}_R) \quad (6)$$

$$Var[g(\sigma, X_R)] \approx \sum_{i,j}^6 \frac{\partial g}{\partial \sigma_i} \frac{\partial g}{\partial \sigma_j} Cov(\sigma_i, \sigma_j) + \sum_{i,j}^n \frac{\partial g}{\partial X_i} \frac{\partial g}{\partial X_j} Cov(X_i, X_j) \quad (7)$$

式中:  $X_R$  表示抗力随机变量;  $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, 6)$  为应力张量  $\sigma$  的 6 个分量。给定功能函数的具体表达式,按式(6)、式(7)很容易计算出功能函数的均值和方差。可靠指标由下式获得:

$$\beta = \frac{E[g(\sigma, X_R)]}{\sqrt{Var[g(\sigma, X_R)]}} \quad (8)$$

当单元进入塑性时,可靠指标的计算与线弹性有所不同。线弹性问题,单元的失效就是单元的破坏,对于弹塑性材料,单元的失效就是单元进入屈服,成为塑性。单元功能函数  $g(\sigma, X_R)$  中  $\sigma$  为:

$$\sigma = D_e B U^e \quad (9)$$

点可靠指标的获得关键在于  $g(X)$  的计算,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial X_i} &= \frac{\partial g}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial X_i} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial X_i} &= D_e B \frac{\partial \sigma}{\partial X_i} + \frac{\partial \sigma}{\partial X_i} B U^e \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

计算出(10)后,即容易计算得到点可靠指标。

按 Mohr-Coulomb 准则建立功能函数:

$$g(X) = c \cdot \cos \varphi - \sigma_m \cdot \sin \varphi - J_2 \left[ \sin \left( \frac{\pi}{3} - \theta \right) + \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}} \cdot \cos \left( \theta - \frac{\pi}{3} \right) \right] = 0 \quad (11)$$

式中:  $\varphi$  为内摩擦角;  $\theta$  为 Lode 角。

$$\theta = \frac{1}{3} \cdot \cos^{-1} \left( \frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}} \right) \quad (12)$$

### 4 金坛盐岩地下储库可靠性分析

计算选取江苏金坛盐岩某地下油气储库为计算算例,其盐岩层厚度为 300 m,顶板和底板各为 300 m 的泥岩层,溶腔为标准椭球体,轴长分别为 70 m、30 m,位于岩层中间,覆盖层厚度为 700 m,作为等效荷载施加在模型上,建立图 2 所示的数值计算模型,由于模型对称,仅取 1/4 部分进行计算,共剖分了 53 246 个节点,48 890 个单元。

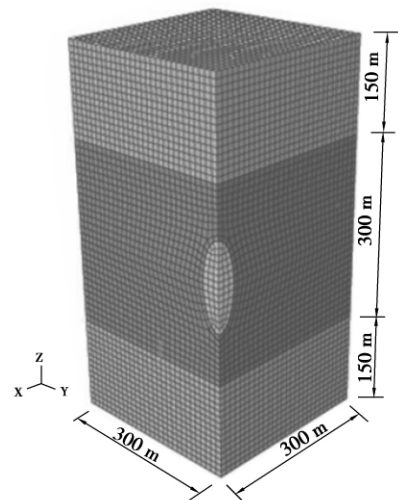


图2 盐岩油气储库数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model of Jintan salt rock cavern  
根据相关资料<sup>[2]</sup>,金坛油气储库地层基本材料参数见表3。

表3 地层基本参数  
Table 3 Basic parameter of the formations

地层	弹模 (GPa)	泊松比	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	粘聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)
泥岩	20.91	0.232	2 351	4.14	24.0
盐岩	5.15	0.312	2 199	4.17	41.4

研究表明,相对于粘聚力和摩擦系数,弹

模的变异系数较小,因此,仅考虑粘聚力和内摩擦角为随机变量,参数分布如表 4。

表 4 随机变量及其有关数据

Table 4 Distribution parameters of random variables

地层	随机变量	均值	变异系数	标准差	分布
泥岩	$c$ (MPa)	4.14	0.10	0.414	正态
	$\varphi$ ( $^{\circ}$ )	39	0.15	5.85	正态
盐岩	$c$ (MPa)	4.17	0.10	0.417	正态
	$\varphi$ ( $^{\circ}$ )	41.4	0.15	6.21	正态

算得到在不同储气内压条件下,储库腔体周边可靠指标云图,如图 3 ~ 图 6 所示,顶点、底部节点及中间节点可靠指标随储气内压变化曲线如图 7 ~ 图 9 所示。

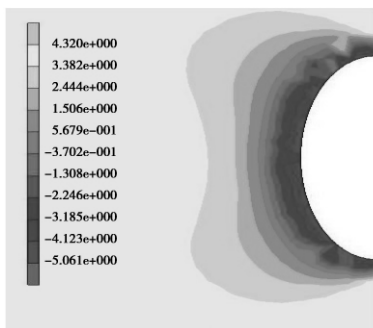


图 3 建腔完成时腔体周边可靠度云图

Fig. 3 Reliability contours surrounding the cavern with no gas pressure

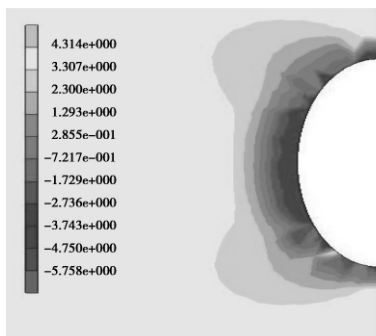


图 4 内压 3 MPa 时腔体周边可靠度云图

Fig. 4 Reliability contours surrounding the cavern under 3 MPa gas pressure

从计算结果可知,当腔体刚建成时,由于应力释放,临空面的产生,腔体周边可靠指标较小,基本在 -2.2 到 -3.6 之间,由此可推知临近临空面的周边岩体介质有向内收缩的趋势,并且可能进入塑性,当腔体储气内压不断增大时,除腔体中间节点外,周边点可靠指标不断增大,说明周边岩体稳定性随储气内压的增大逐渐变好,因此内压对腔体有

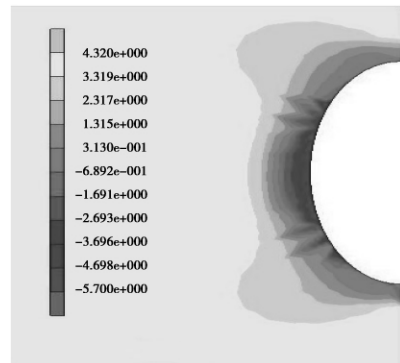


图 5 内压 5 MPa 时腔体周边可靠度云图

Fig. 5 Reliability contours surrounding the cavern under 5 MPa gas pressure



图 6 内压 10 MPa 时腔体周边可靠度云图

Fig. 6 Reliability contours surrounding the cavern under 10 MPa gas pressure

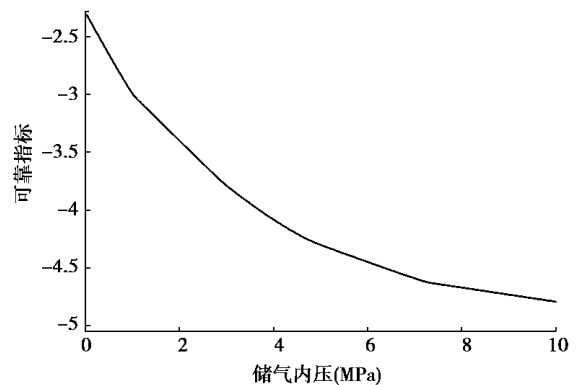


图 7 腔体中间点可靠指标随储气内压变化曲线

Fig. 7 The relation curve between reliability index with intrinsic gas pressure for the node at the middle of the cavern 支撑稳定作用,由图 3 ~ 图 6 可知其可靠指标提高的规律是由腔体上下两边向腔体中心逐渐变化的,由图 8 可知腔体顶点的可靠指标由 0 MPa 时的 -3.6 变化为 10 MPa 时的 3.87,由图 9 可知底部节点可靠指标由 0 MPa 时 -3.1 变化到 10 MPa 时的 4.7,由图 7 可知腔体中间点始终保持较低的可靠指标,并且随内压增大,其可靠指标是持续降低的,可靠指标由内压为 0 MPa 时的 -2.2 降低到 10 MPa 时的 -4.7,说明腔体中间点始终为最危险

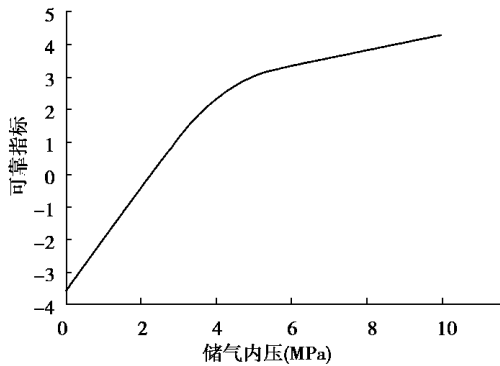


图8 腔体顶点可靠指标随储气内压变化曲线

Fig. 8 The relation curve between reliability index with intrinsic gas pressure for the node at the top of the cavern.

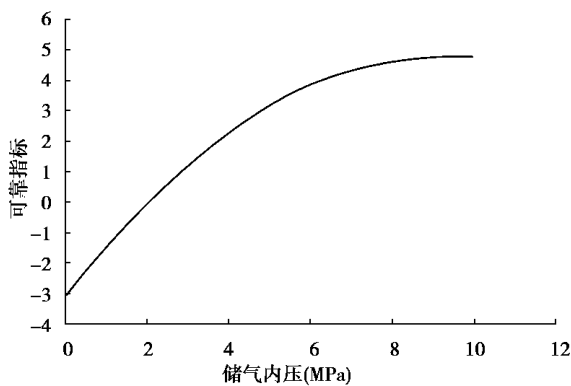


图9 腔体底部节点可靠指标随储气内压变化曲线

Fig. 9 The relation curve between reliability index with intrinsic gas pressure for the node at the bottom of the cavern. 点,分析其原因,可能是由于该部位处于形状变化拐点处,始终受到拉应力作用,随内压增大拉应力也增大,有被撕裂的趋势,因此,如若发生破坏,其破坏起始点应在中间部位,由该点发生渐进破坏。

同时从图6还可以看出,随着内压的增大,深部岩体的可靠性也在逐渐变小,有向内延伸的发展趋势。

## 5 结语

以金坛盐岩地下储库为研究对象,分析了影响储库风险的强度参数,将其主要风险因素作为随机变量,建立了随机分析的强度功能函数,对其进行了基于随机有限元法的可靠度计算,分析了金坛盐岩地下储库在随机因素的影响下,在不同储气内压条件下腔体可靠指标的变化规律,主要得出如下结论:

(1) 内压在一定范围内增长可降低储气库风险。

(2) 随内压增长储库腔体可靠指标的增长趋

势是由腔体上部及下部向中间发展。

(3) 腔体中间部位为最危险部位。

(4) 随储气内压的增大,可靠指标逐渐向深部岩体降低。

## 参考文献(References)

- [1] 杨春和,梁卫国,魏东吼,等.中国盐岩能源地下储存可行性研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(24):4409-4417. (Yang Chunhe, Liang Weiguo, Wei Donghou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in china[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4409-4417. (in Chinese))
- [2] 杨春和.深部盐岩层地下石油储备中的基础性研究-国家自然科学基金资助项目结题报告[R].2008. (Yang Chunhe. Basic research on oil storage in depth rock bedded salt-final report of the national natural science foundation of China[R]. 2008. (in Chinese))
- [3] J. C. Stormont. In situ gas permeability measurements to delineate damage in rock salt[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1997, 34(7): 1055-1064.
- [4] 刘宁.可靠度随机有限元法及其工程应用[M].北京:中国水利水电出版社,2001. (Liu Ning. Finite element method of stochastic reliability and its application[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese))
- [5] 韩宪军.弹模随机场对地下洞室可靠度计算结果的影响[J].西安科技大学学报,2007,27(2):214-217. (Han Xianjun. Effect of elastic modules random field of surrounding rocks on reliability calculation of underground chamber[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(2): 214-217. (in Chinese))
- [6] 陈建康,朱殿芳,赵文谦,等.基于响应面法的地下洞室结构可靠度分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):351-356. (Chen Jiankang, Zhu Dianfang, Zhao Wenqian, et al. Structure reliability analysis of underground cavern based on response surface method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 351-356. (in Chinese))
- [7] Rosenblatt M. Remarks on a multivariate transformation[J]. Annals of Math Stat, 1952, 23(3): 470-472.

(下转第285页)

## 参考文献(References)

- [1] 王友辛. 上海黄浦江打浦路隧道渗漏水治理[J]. 中国建筑防水, 1989, (3): 28-29. (Wang Youxin. Control of water leakage for Dapu Road Tunnel under Huangpu River in Shanghai[J]. China Building Waterproofing, 1989, (3): 28-29. (in Chinese))
- [2] 郑永来, 韩文星, 童琪华, 等. 软土地铁隧道纵向不均匀沉降导致的管片接头环缝开裂研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 552-4 558. (Zheng Yonglai, Han Wenxing, Tong Qihua, et al. Study on longitudinal crack of shield tunnel segment joint due to asymmetric settlement in soft soil. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 552-4 558. (in Chinese))
- [3] 潘朋. 越江盾构隧道防水技术[J]. 铁道标准设计, 2007, (增2): 19-21. (Pan Peng. Waterproof technology for shield tunnel under river[J]. Railway Standard Design, 2007, (Supp.2): 19-21. (in Chinese))
- [4] 温竹茵, 张庆贺, 郝坚, 等. 盾构法隧道防水堵漏技术[J]. 施工技术, 1999, 28(4): 13-14. (Wen Zhuyin, Zhang Qinghe, Zheng Jian, et al. Waterproofing and leakstoppage technology for shield-driven tunnel [J]. Construction Technology, 1999, 28(4): 13-14. (in Chinese))
- [5] 童智能, 吴祥红. 浅谈盾构隧道管片拼装接缝的防水处理[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(2): 52-55. (Tong Zhi-neng, Wu Xiang-hong. On the waterproofing of joints between shield tunnel segments [J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(2): 52-55. (in Chinese))
- [6] 樊庆功, 方卫民, 苏许斌. 盾构隧道遇水膨胀橡胶密封垫止水性能试验研究[J]. 地下空间, 2002, 22(4): 335-339. (Fan Qinggong, Fang Weiming, Su Xubin. Experimental study on the waterproof capability of the hydro-expansive rubber sealing cushion in shield tunnel [J]. Underground Space, 22(4): 335-339. (in Chinese))
- [7] 石修巍, 向科, 藏延伟. 盾构法隧道管片接缝密封垫设计及试验研究[J]. 地下工程与隧道, 2007, (增1): 40-42. (Shi Xiuwei, Xiang Ke, Cang Yanwei. Design and test study on segment joint cushion in shield tunnel [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2007, (Supp.1): 40-42. (in Chinese))
- [8] 向科, 石修巍. 盾构管片弹性密封垫断面设计与优化[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 361-364. (Xiang Ke, Shi Xiuwei. Design and optimization of elastic gasket section of shield tunnel lining [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 361-364. (in Chinese))
- [9] 薛绍祖. 地下建筑工程防水技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (Xue Shaoyu. Waterproof technology of underground architecture engineering [M]. China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese))
- [10] 刘建国. 盾构隧道遇水膨胀密封带接触压力试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1 122-1 125. (Liu Jianguo. The experimental research of the contact pressure of hydrophilic sealing gasket for shield tunnel segments [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6): 1 122-1 125. (in Chinese))
- (上接第 280 页)
- [8] 李同春. 用 Gram-Schmidt 正交化方法求变量相关时的结构可靠指标[A]. 工程结构可靠性全国第二届学术交流会议论文集[C]//重庆, 1989. (Li Tongchun. The reliability index calculation of variables related structure with the Gram-Schmidt process [A]. Collected Papers of the Second National Engineering Reliability Academic Exchanges Congress [C]//Chongqing, 1989. (in Chinese))
- [9] 孙芳垂, 陈星焘, 洪华生, 等译. 工程规划与设计中的概率概念(第 II 卷)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991. (Sun Fangchui, Chen Xingtao, Translation. Hong Hua-sheng. The probability conception in the planning and designing of engineering (Volume II) [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1991. (in Chinese))
- [10] 姚耀武, 申超. 非线性随机有限元法及其在可靠度分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 37-46. (Yao Yaowu, Shen Chao. Nonlinear stochastic FEM and its application for reliability analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 18(2): 37-46. (in Chinese))