

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.001

软土地铁盾构隧道环缝张开可靠度分析

王 慧^{a,b}, 黄宏伟^{a,b}

(同济大学 a. 地下建筑与工程系; b. 岩土及地下工程教育部重点实验室 上海 200092)

摘 要:软土地铁盾构隧道运营后,受各种内外部因素影响,隧道产生较大的不均匀沉降,进而产生不同程度的环缝张开,严重影响运营安全。在综合考虑隧道衬砌几何尺寸、纵向曲率半径及沿隧道纵向抗压抗拉刚度比基础上,同时考虑认识不确定性及随机不确定性,通过区间 Monte Carlo 抽样模拟计算环缝张开的失效概率区间。讨论了环缝失效概率随不同纵向曲率半径及衬砌环沿隧道纵向不同抗压抗拉刚度比的变化情况,量化的得到两者在一定失效概率区间下的控制范围。为地铁运营养护决策的制定、优化结构和防水设计提供依据。

关键词:软土盾构隧道;环缝张开;可靠度;蒙特卡罗

中图分类号:U45 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)06-0001-06

Reliability Analysis on Metro Shield Tunnel Segment Joint in Soft Soil

Wang Hui^{a,b}, Huang Hongwei^{a,b}

(a. Department of Geotechnical Engineering; b. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education Tongji, University Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: After operation of the metro, there has been increasing longitudinal nonuniform settlements of shield tunnel due to various interior and exterior factors, and then some expansion of shield tunnel segment joint develops to varying degrees, which seriously impacts on the safety of the train. Taking geometric dimension of segment, curvature radius, stiffness ratio in longitudinal, uncertainty and epistemic uncertainty into consideration, an interval Monte Carlo method has been developed which combines simulation process with the interval analysis to estimate the probability of shield tunnel segment joint failure. Finally, the interval of the failure probability is obtained. Case studies are presented to discuss the effect of different curvature radius and stiffness ratio in longitudinal on the failure probability. Hence, the control sphere of the two factors is obtained under the certain interval of the failure probability. The results provide the guidance for tunnel protection, waterproof design and construction technique of shield tunnel.

Key words: shield driven tunnel in soft soil; expansion of shield tunnel segment joint; reliability; Monte Carlo methods

软土盾构隧道在投入运营后发生纵向不均匀沉降。其发展到一定程度后,环缝张开,进而容易引起渗水和诱发进一步的不均匀沉降。故环缝张开量是隧道安全运营的关键指标。通过分析盾构隧道环缝

张开可靠度可为运营隧道的适时合理维护以及优化结构和防水设计提供技术支撑。

实际工程中由于衬砌的设计受地质勘查资料准确程度以及相关规范和理论的制约,包含一定的不

收稿日期:2013-03-25

基金项目:国家基础研究项目“973”计划(2011CB013803);国家自然科学基金(51278381、50879058);上海优秀学术带头人计划(12XD1405100)

作者简介:王慧(1986-),主要从事隧道及地下工程研究,(E-mail)639wh@tongj.edu.cn。

确定性;盾构隧道在运营期间其上覆地层也会发生一定的变迁;施工中管片的制作精度和螺栓连接等方面同样带有不确定性。故多种因素影响环缝张开量的变化。确定性分析则忽略或低估了各种不确定因素对地下结构物的影响。可靠度分析则是一种清楚反映各种不确定影响的计算方法。

目前,对管片衬砌的可靠度分析通常使用一次二阶矩法(FOSM),在此基础上胡志平等^[1]基于 JC 法可靠度指标的几何意义,建立了管片衬砌结构可靠度计算的优化模型。对于复杂的非线性功能函数则有 Monte Carlo 模拟法^[2,20]、随机有限元法^[3]以及响应面法^[4,20]。然而对于随机变量分布参数(均值、方差等)的估计通常是带有认识不确定性的,且在小样本统计时尤为明显^[5],一般方法使用点估计并没有体现。忽视认识不确定性可能会导致低估隧道环缝分析中的不确定性水平,从而导致不安全的决策。贝叶斯估计作为一种较好的方法可以给出参数的分布,但需要不断地增加后验信息。区间估计则可以在一定置信水平下考虑分布参数的认识不确定性。因此,在样本数量较少时,可以将其与 Monte Carlo 模拟结合使用。从而在样本信息不完整情况下客观反映可靠度本身的不确定性。

在分析环缝张开可靠度时,首先通过随机变量分布参数的区间估计,结合随机变量的分布函数产生概率分布边界。采用 Monte Carlo 抽样产生随机变量区间,从而计算出环缝失效概率的上界和下界。以上海地铁盾构隧道为例,结合纵向曲率半径和纵向弯曲刚度比进行了进一步的讨论,定量化的得到两者在一定失效概率区间下的控制范围,最后与验算点法对比讨论,阐述区间 Monte Carlo 法较验算点法的优势。

1 盾构隧道环缝张开量

软土盾构隧道衬砌结构先由管片拼装成衬砌环再沿纵向连接而成。根据盾构隧道结构现有纵向分析方法^[6-15],当环缝接头受压时,主要由传力衬垫及混凝土管片承受压应力;当环缝接头受拉时,由螺栓承受拉应力,衬垫或管片不参与受拉。因此环缝接头的抗压刚度和抗拉刚度具有较大差异,抗压刚度大于抗拉刚度。樊振宇等^[16]通过抗压刚度与抗拉刚度的比值确定出环缝张开量与压缩量的比值,进而算出环缝张开量。该方法由于概念清晰,使用方便,本文采用将以这一方法为基础进行盾构隧道环缝张开量的可靠度分析。这一方法有 5 点假设:

1)平截面假定,即隧道横断面上每一处的张开

或压缩量与该位置距中性轴的长度成正比;

2)螺栓抗拉刚度沿环缝面积均匀分布;

3)接头位置法向应力沿厚度方向均匀分布;

4)纵向弯矩作用下,管片环以中性轴为界,一侧受压,另一侧受拉。受拉侧的拉应力由螺栓承担,受压侧的压应力由管片或衬垫承担;

5)衬砌环刚度远大于环缝接头,视为刚体。

衬砌环计算半径定义为 R ;管片厚度为 d ;环缝接头抗压刚度为 k_p (Pa/m);抗拉刚度为 k_t (Pa/m);抗压、抗拉刚度比值(以下简称“刚度比”)为 $n, n = k_p/k_t$ 。

当环缝接头承受纵向弯矩的时候,其转动轴位置并不在衬砌环的几何中心,而是由 O 点移动到 O' 点(图 1),沿弧长取角度微分 $d\theta$,则微分段的弧长为 $Rd\theta$,考虑到衬砌厚度为 d ,则微分段的面积为 $(Rd)d\theta$ 。转动轴位置对应角度为 α 。通过积分分别求出转动轴上方和下方的法向应力,在不考虑衬砌纵向轴力的条件下,由转动轴上方与下方合力的绝对值相等,得式(1)。

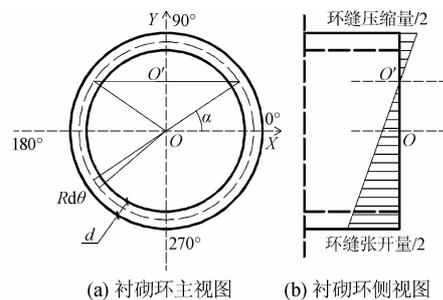


图 1 衬砌环转动示意图

$$\cos \alpha + \left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \sin \alpha = n \left[\cos \alpha + \left(-\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \sin \alpha\right] \quad (1)$$

通过求解式(1)可得到转动轴位置对应角度 α ,进一步得到环缝张开量与压缩量比值 m :

$$m = (1 + \sin \alpha) / (1 - \sin \alpha) \quad (2)$$

通过对不同刚度比 n 的取值进行计算,环缝张开及压缩量比值 m 与刚度比 n 的关系如下表所示。通常刚度比 n 都由估算进行确定。表 1 给出部分 m 与 n 的计算结果。

表 1 环缝张开及压缩量比值 m 与刚度比 n 关系

n	1	2	3	4	5	8	10	15	20
m	1	1.56	2.01	2.42	2.79	3.78	4.36	5.67	6.84

图 2 为纵向曲率半径与环缝张开量关系图,图中 aa' bb' 分别为环缝张开量的一半和环缝压缩量的一半, $aa'/bb' = m, D$ 为衬砌环外直径, B 为环

宽。根据几何关系推导出环缝的张开量为:

$$\Delta = \frac{mBD}{(m+1)\rho - mD} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,最大环缝张开量由 B 、 D 、 m 、 ρ 4 个变量确定。

2 环缝张开失效的概率模型

由式(3)构造环缝张开失效功能函数:

$$G(B, D, m, \Delta_{cr}, \rho) = \Delta_{cr} - \frac{mBD}{(m+1)\rho - mD} \quad (4)$$

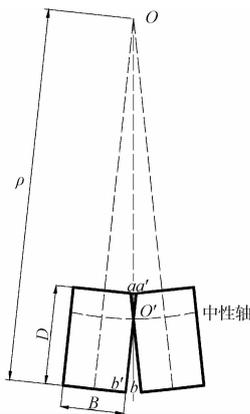


图2 环缝张开几何关系示意

其中 ρ 代表隧道的纵向曲率半径。环宽 B 、衬砌环直径 D 由于制作精度,具有一定的误差。刚度比通常通过估算得到。 Δ_{cr} 则表示环缝临界张开量。记 $X = [x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}]$ 表示由随机变量组成的 4 维向量,其分别代表功能函数中 B, D, m, Δ_{cr} 4 个参数。通过沉降监测数据使用不同拟合方法计算出隧道的纵向曲率半径略有差别,且其变异系数很小,对环缝张开可靠度的影响可忽略,本文不将纵向曲率半径视为随机变量。式(4)中随机变量的概率分布参数由样本统计进行估计,这里采用区间估计确定分布参数的置信区间,从而表征统计估计的认识不确定性。本文做探讨性假设 $x_B, x_D, x_{\Delta_{cr}}, x_m$ 服从正态总体。各随机变量分布函数的确定有待进一步的研究。各随机变量待估参数为 μ ,令 Θ 表示待估参数 μ 的置信区间。对于 $X = [x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}]$ 中每个元素,当均值 μ 在区间 Θ 中变化时,产生一族概率密度函数,通过 Monte Carlo 抽样在一族密度函数中模拟得到不同的 P_f ,其也在一定的区间内变化,我们感兴趣的是寻找这个区间的上界和下界。

令 $F(X)$ 表示 $X = [x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}]$ 中各随机变量的正态分布函数,对应于 $\mu \in \Theta$,能够找到一对分布函数 $\underline{F}, \overline{F}$,使得 $F(x) \in [F(x), \overline{F}(x)]$ 。则这一对分布函数组成一组概率分布边界,所有可能的分

布函数介于其中。图3所示为一组概率分布边界,表示一族均值 $\mu \in [2, 3]$ 标准差 $\sigma = 1$ 的正态分布概率分布函数。概率分布边界不仅包含的参数的不确定性,某种程度上也蕴含了随机变量相关性的不确定性。

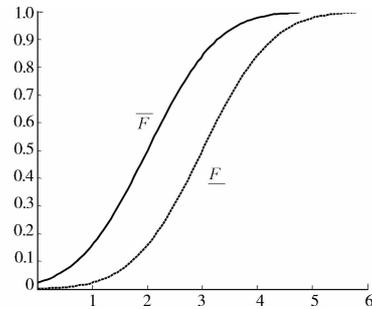


图3 一组概率分布边界(正态分布 $\mu \in [2, 3], \sigma = 1$)

使用 Monte Carlo 方法进行模拟,通过式(5)可计算结构失效概率:

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu) \leq 0], \mu \in \Theta \quad (5)$$

式中: N 表示总的抽样模拟次数; $I[\cdot]$ 为判断指标函数,当 $G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}) \leq 0$ 时为 1, 否则为 0。由参数 μ 的区间估计确定概率分布边界,使用逆转换法产生随机抽样区间 $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ 如图4所示。

在一次抽样模拟中,对功能函数 $G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}})$ 中每个基本未知量 x_i 进行一次 Monte Carlo 抽样,产生区间 $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$, 由这些区间的边界确定功能函数的最大值 $\max(G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu))$ 和最小值 $\min(G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu))$, 注意到

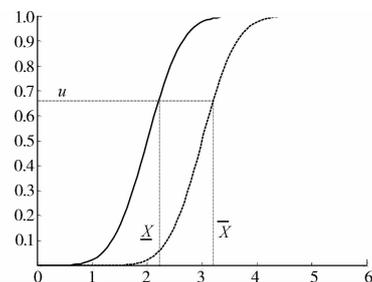


图4 由均匀分布随机数产生抽样区间示意

$$\begin{aligned} \min(G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu)) &\leq \\ G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu) &\leq \\ \max(G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu)) &\leq \end{aligned} \quad (6)$$

结合式(5)得

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[\max(G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu)) \leq 0] &\leq \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu) \leq 0] &\leq \end{aligned}$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[\min(G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu)) \leq 0],$$

$$\mu \in \Theta$$

最终得

$$\overline{P_f} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[\max(G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu)) \leq 0],$$

$$\mu \in \Theta$$

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[\min(G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}}; \mu)) \leq 0],$$

$$\mu \in \Theta$$

3 算例分析

以上海地铁 2 号线为例,衬砌环直径 $D=6.2$ m,环宽 $B=1$ m,根据传力衬垫和接头螺栓材料力学性能,刚度比取 $n=10$ ^[16],查表 1 可得对应 $m=4.36$ 。按地铁隧道设计要求,要使环缝中密封垫不漏水要求环缝张开量 $\delta \leq 6$ mm,即(4)中环缝临界张开量 $\Delta_{cr}=6$ mm。参考《地下铁道设计规范》以及《地下铁道工程施工及验收规范》规定的衬砌制作和拼装必须达到的精度要求并结合已有工程经验,各统计量见表 2。

表 2 各随机变量的统计量^[17-19]

随机变量 x	样本均值 \bar{x}	样本标准差 S
x_B/mm	1 000	0.5
x_D/mm	6 200	3.5
x_m	4.36	0.02
Δ_{cr}/mm	6	0.5

对各随机变量的期望进行区间估计(假设总体方差与样本方差相同),见表 3。分 3 种显著性水平 α ,对每个参数进行 $N=10\ 000$ 次 Monte Carlo 抽样模拟。在一次抽样模拟中,对功能函数 $G(x_B, x_D, x_m, x_{\Delta_{cr}})$ 中每个基本未知量 x_i 通过概率分布边界产生区间 $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$,由这些区间的边界确定功能函数的最大值 $\max(G(x; \mu))$ 和最小值 $\min(G(x; \mu))$,利用式(8)统计模拟结果计算失效概率的上界和下界。

当隧道纵向曲率半径变化时,计算结果如图 5 所示。

从图 5 可知:1)当纵向曲率半径小于 700 m 时, P_f 上下界均接近 1,环缝发生渗漏水的可能性极大,与文献[10]的分析结果相符;2)当纵向曲率半径大于 1 100 m 时, P_f 上下界均小于 0.1,发生渗漏水可能性较小,隧道可继续工作,但需根据巡检结果适时养护。《地铁隧道保护条例》规定由外界因素引起的隧道曲率半径应不小于 15 000 m,远大于 1 100 m,可

见按该条例规定,隧道可完全处于安全运行的工作状态;3)曲率半径在 700 m 至 1 100 m 之间, P_f 的变化幅度较大;4)从 3 种显著性水平来看,随 α 的减小,参数的置信区间宽度相应增大,两条 P_f 曲线包围的面积增大,即 P_f 上下界差值随之增大,反映出失效概率的不确定程度增大;5)在 3 种显著性水平下,曲率半径小于 700 m 或大于 1 100 m 时 P_f 上下界差值都较小,即失效概率不确定性较小,当曲率半径在 700 m 至 1 100 m 范围内时, P_f 上下界差值较曲线两端显著增大,即失效概率不确定性较大,可见认识不确定性对可靠度计算的影响主要集中在曲率半径为 700 m 至 1 100 m 范围内。

表 3 各随机变量期望的区间估计

随机变量	$\alpha=0.1$		$\alpha=0.05$		$\alpha=0.01$	
	$\underline{\mu}$	$\overline{\mu}$	$\underline{\mu}$	$\overline{\mu}$	$\underline{\mu}$	$\overline{\mu}$
x_B/mm	999.59	1 000.41	999.51	1 000.49	999.36	1 000.64
x_D/mm	6 197.13	6 202.88	6 196.57	6 203.43	6 195.49	6 204.51
x_m	4.34	4.38	4.34	4.38	4.33	4.39
Δ_{cr}/mm	5.59	6.41	5.51	6.49	5.36	6.64

当隧道纵向曲率半径为 1 000 m 时,改变刚度比,进行 Monte Carlo 模拟,计算所得环缝张开失效概率如图 6 所示。

从图 6 可知:1)当刚度比小于 5 时, P_f 上下界均接近 0,基本不会发生渗漏水;2)随刚度比增大, P_f 上界逐渐增大,下界变化较小;3)从 3 种显著性水平来看,随 α 的减小,参数的置信区间宽度相应增大,两条 P_f 曲线张开程度增大,反映出失效概率的不确定程度增大;4)在 3 种显著性水平下,刚度比小于 5 时 P_f 上下界差值较小,当刚度比大于 5 时, P_f 上下界差值单调增长,反映出对环缝张开量的认识不确定性逐渐增大。

以下通过本文方法与验算点法对比讨论,说明区间 Monte Carlo 法在考虑认识不确定性方面较传统可靠度分析方法的优点。

采用验算点法确定可靠度指标 β ,计算环缝失效概率(计算结果见图 7)。考虑显著性水平 $\alpha=0.1$,将 Monte Carlo 模拟结果与验算点法进行对比,如图 7 所示。由于验算点法在当量标准正态化时使用的是分布参数的点估计(通常是最大似然估计),故计算得到的失效概率同样也是一个点,即传统分析方法低估了认识不确定性对可靠度本身不确定性的影响。

计算结果表明验算点法计算所得 P_f 曲线在

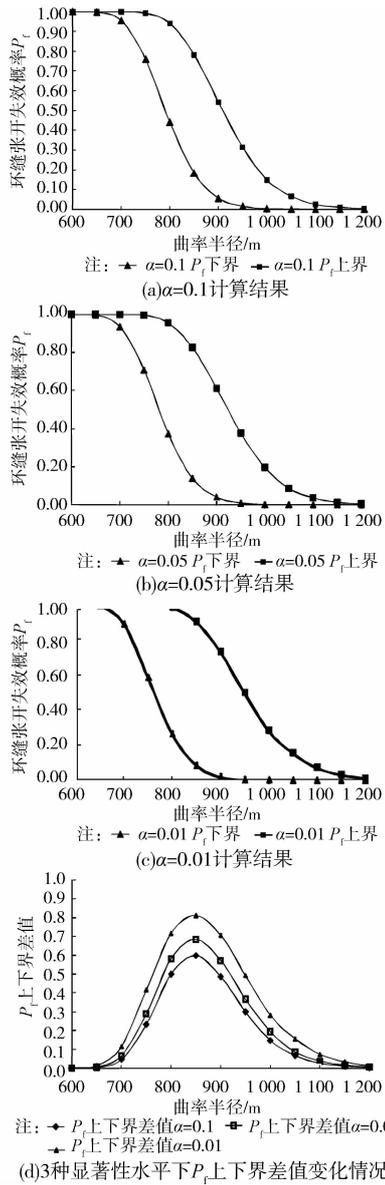


图 5 不同显著性水平下曲率半径-环缝张开失效概率计算结果

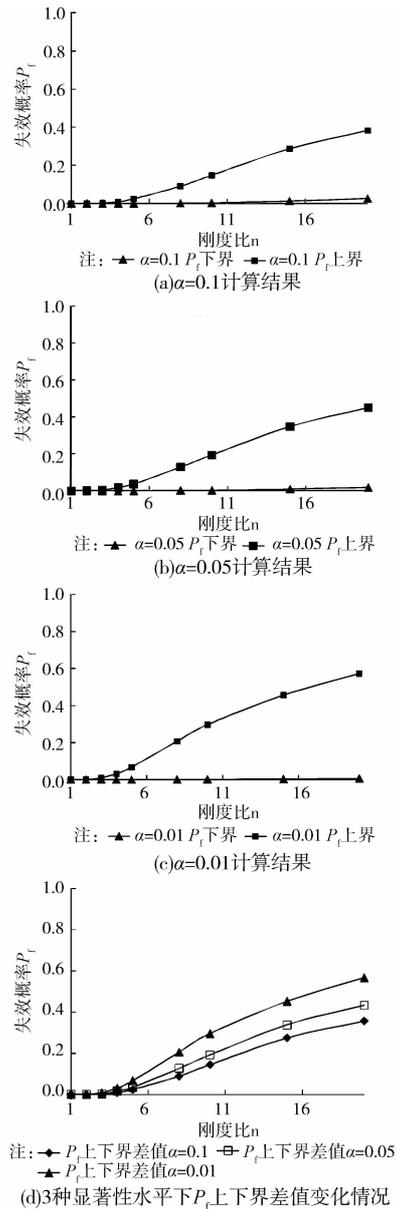


图 6 不同显著性水平下刚度比-环缝张开失效概率计算结果

Monte Carlo 模拟结果的上下界包围的区域内部。说明 Monte Carlo 模拟将分布参数的不确定性考虑在内。对置信水平的选取和部分未知参数的确定是包含主观因素的,区间 Monte Carlo 法体现了由于认识不确定性导致的结构可靠度在一定区间内变化。验算点法所得曲线应当理解为在所有可能的 P_f 曲线中,分布参数最大似然估计对应的特殊情况,而不能完全反应统计参数估计带来的可靠度本身的不确定性。区间 Monte Carlo 法较传统方法在认识不确定性方面考虑的更为完善,更有利于地铁运营维护决策的制定、优化结构和防水设计。

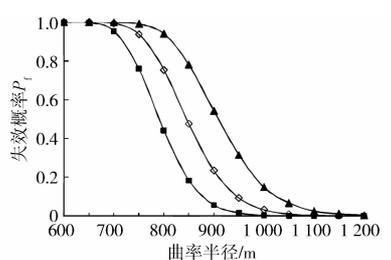
4 结 论

通过区间 Monte Carlo 随机抽样模拟,从地铁

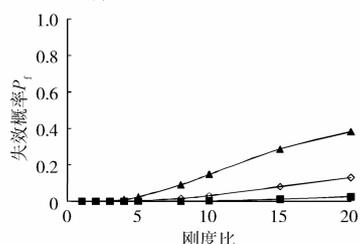
盾构隧道纵向曲率半径和管片衬砌环刚度比两方面讨论了环缝张开失效概率,并与传统分析方法(验算点法)对比,得出以下结论:

1)隧道纵向曲率半径的变化对环缝张开量的影响较为显著,从计算结果来看,隧道纵向曲率半径大于 1 100 m 时,失效概率较低且变异性很小。证明现行《地铁隧道保护条例》对隧道变形曲线的规定合理有效。

2)隧道在一定纵向曲率状态下随衬砌环刚度比的增加,失效概率逐渐增大,其变异性也随之增大。当衬砌密封垫和止水片良好的情况下,通过增大环缝接头螺栓直径或增多螺栓数量等方式可有效降低环缝张开失效的概率。



(a)不同曲率半径下失效概率



(b)不同刚度比下失效概率

注: ●— 验算点法 ■— $\alpha=0.1P_f$ 下界 ▲— $\alpha=0.1P_f$ 上界

图 7 区间 Monte Carlo 模拟与验算点法对比

3) 失效概率的变异性可反映对统计参数的认识不确定性。不考虑统计参数的不确定性时计算所得的失效概率在区间可靠度计算的失效概率的下界之上,说明采用传统可靠度分析方法可能会低估环缝张开的风险水平,进而可能导致不安全决策。可见区间 Monte Carlo 法较验算点法在认识不确定性方面考虑的更为完善。

在随机模拟中对各随机变量进行独立直接抽样,今后的工作中可进一步考虑随机变量的相关性,并在抽样方式上做以改进,考虑使用重点抽样达到提高抽样效率的目的。

参考文献:

- [1] 胡志平,罗丽娟. 管片衬砌结构可靠度分析的优化方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4145-4150.
Hu Z P, Luo L J. Study on reliability optimization of segments lining in shield tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4145-4150.
- [2] 赵国藩,金伟良,贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [3] 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.
- [4] Faravelli. A response surface approach for reliability analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(12): 2763-2781
- [5] Ang A H S, Tang W H. Probability concepts in engineering planning and design [M]. New York, 1975.
- [6] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 同济大学, 2005.
- [7] 朱合华,陶履彬. 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 26-32.
- Zhu H H, Tao L B. Study on two beam-spring models for the numerical analysis of segments in shield tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(2): 26-32.
- [8] 朱合华,崔茂玉,杨金松. 盾构衬砌管片的设计模型与荷载分布的研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 190-194.
Zhu H H, Cui M Y, Yang J S. Design model for shield lining segments and distribution of load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 190-194.
- [9] 朱合华,桥本正,杨林德,等. 盾构隧道管片接头衬砌系统的两种受力设计模型[J]. 工程力学, 1996(A3): 395-399.
Zhu H H, Hashimoto, Yang L D, et al. Two design model for shield lining segments and Joint system [J]. Engineering Mechanics, 1996(A3): 395-399.
- [10] Hashimoto T, Zhu H H, Nagaya J. A new model for simulating the behavior of segments in shield tunnel [C]//Proceeding of the 49th Annual Conference of the JSCE, 1994: 1242-1243.
- [11] 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): 4552-4558.
Zheng Y L, Han W X, Tong Q H, 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): 4552-4558.
- [12] 黄正荣. 基于壳-弹簧模型的盾构衬砌管片受力特性研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [13] 朱伟,黄正荣,梁精华. 盾构衬砌管片的壳-弹簧设计模型研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 940-947.
Zhu W, Huang Z R, Liang J H. Studies on shell-spring design model for segment of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 940-947.
- [14] 蒋洪胜. 盾构法隧道管片接头的理论研究及应用[D]. 上海:同济大学, 2000.
- [15] 蒋洪胜,侯学渊. 盾构法隧道管片接头转动刚度的理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1574-1577.
Jiang H S, Hou X Y. Theoretical study of rotating stiffness of joint in shield tunnel segments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1574-1577.
- [16] 樊振宇. 软土盾构隧道衬砌结构计算方法及纵向变形分析[D]. 上海:同济大学, 2009.
- [17] DBJ 08-50-96 盾构法隧道防水技术规程[S].
- [18] GB 50157-92 地下铁道设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 1993
- [19] GB 50299-1999 地下铁道工程施工及验收规范[S]. 北京:中国计划出版社, 1999
- [20] 彭志忠,何川,苏宗贤,等. 盾构隧道管片接缝结构可靠度分析[J]. 现代隧道技术, 2008(Sup1): 172-177.
Peng Z Z, He C, Su Z X, et al. Reliability analysis of shield tunnel segment Joint [J]. Modern Tunnelling Technology, 2008(Sup1): 172-177.