

盾构隧道管片衬砌力学行为区间不确定性分析

冉春江^{1,2}, 杨海天^{*1,2}, 陶越^{1,2}

(1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:以琼州海峡盾构隧道为研究背景,基于梁-弹簧有限元模型,考虑初始设计阶段中相关参数的不确定性,将侧向土压力系数、地层抗力系数、接头等效抗弯刚度考虑为区间不确定性变量,建立了管片衬砌结构区间不确定性问题的数值求解模型,推导了影响度计算公式,可估计轴力、弯矩、安全系数的上下界.通过数值分析,探讨了各区间变量不确定性对管片衬砌结构力学行为的影响.数值结果表明:所取参数的不确定性对轴力影响较小,但对变形和弯矩影响较为明显;两种荷载模式对应的管片安全系数区间相差较大,在设计中应妥善考虑.研究结果有望为管片衬砌鲁棒优化设计提供参考.

关键词:盾构隧道;管片衬砌;梁-弹簧模型;区间不确定性

中图分类号:U451.4

文献标识码:A

doi:10.7511/dllgxb201903001

0 引言

越江海隧道具有不受气候影响、通行能力稳定和抵抗战争破坏强等特点,日渐成为城市、地区和国家之间的重要交通连接手段^[1],我国也有规划建设多条越江海大型盾构隧道,如琼州海峡隧道.管片衬砌作为盾构隧道的承力结构,其设计理论与安全性评价研究对隧道的安全建设、运营以及应对灾害的能力具有重要的实际应用价值,特别是对琼州海峡跨海通道这样的高水压、长距离、大直径的盾构隧道更是如此.

管片衬砌结构的设计与安全性评价,首先需要明确相关的荷载与边界条件.由于实际工程的复杂性,提供较为准确的水下盾构隧道荷载与边界条件往往十分困难.采用荷载-结构模型进行管片衬砌结构的计算和设计时,与荷载、边界条件相关的参数主要有地层抗力系数和侧向土压力系数.对这两个参数,文献[2-4]提供了可参考的近似确定方法,但由于实际工程问题的复杂性,以及试验仪器/条件、设计人员工程经验等因素的影响,这些参数的取值难免有较大的不确定性,对琼州海峡跨海通道而言,由于深水海底地质勘测比

在陆地更为困难,准确性也相对较低^[5],不确定性的影响进一步增大.

另一方面,管片衬砌结构通过接头将管片相连,计算时需考虑管片接头处力学性态对管片结构力学行为的影响^[6].在梁-弹簧模型中,通过在接头处设置旋转弹簧来模拟管片间的相互作用^[7].但旋转弹簧的等效抗弯刚度不仅与管片、螺栓以及衬垫部件的几何尺寸、材料性质、接头的构造形式、螺栓预紧力等因素有关,而且还与接头处所受轴力和弯矩相关^[8].已有不少学者通过简化的接头计算模型^[9-10]、三维有限元模型^[7-8,11]和加载试验^[7,12-13]等方法进行过研究,但目前似还没有统一的方法可准确地预测不同管片接头的等效抗弯刚度^[14].郭瑞等^[7]通过加载试验和数值模拟对狮子洋隧道管片接头抗弯刚度的研究也并未得到确定性的抗弯刚度值,只得到该隧道管片接头抗弯刚度的取值范围为50~700 MN·m/rad.

以上分析表明,影响梁-弹簧模型分析的3个重要参数:地层抗力系数、侧向土压力系数和接头等效抗弯刚度的取值都有较大的不确定性.对这些不确定性的影响认识与分析不充分,有可能在

收稿日期: 2018-12-15; 修回日期: 2019-04-01.

基金项目:“九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB057804);国家自然科学基金资助项目(11572068).

作者简介:冉春江(1990-),男,博士生,E-mail:ranchj@163.com;杨海天*(1956-),男,教授,博士生导师,E-mail:haitian@dlut.edu.cn;陶越(1990-),男,硕士生,E-mail:m.taoyue@foxmail.com.

管片衬砌结构的设计中留下安全隐患. Coleman 等^[15]曾在不确定性问题的研究中指出:在一个试验中所有的测量只具有 1% 的不确定性,但可导致试验结果的不确定性大于 50%. Hadidi 等^[16]指出,数据信息及计算模型中的不确定性对计算结果会产生重要的影响,必须予以考虑.事实上,不确定性对结构安全性分析及鲁棒优化设计的研究一直是各方面关注的一个热点和难点课题.早在 2003 年,几位世界顶级的计算力学大师曾指出:处理不确定性的新方法将成为所有力学分支的重要部分^[17].

不确定性描述主要有 3 种模型:(1)概率模型;(2)模糊模型;(3)区间模型.在土木工程界,通常用随机变量描述相关量的不确定性,并在此基础上进行可靠性分析^[18],但在设计的初始阶段,由于建立不确定性模型所需的先验信息往往较少或难以获得(如概率密度函数、隶属度函数),采用只需用上下界表达的区间模型是一种合理的选择^[19].据作者查阅的文献来看,与盾构隧道管片衬砌直接相关的不确定性研究的文献报道很少.

为此,本文从梁-弹簧模型入手,将侧向土压力系数、地层抗力系数、接头等效抗弯刚度考虑为区间不确定性变量,建立管片衬砌结构区间不确定性数值分析模型,推导参数影响度计算公式,实现对管片衬砌结构轴力、弯矩、位移以及安全系数区间不确定性分析,可提供弯矩、轴力、位移、安全系数的上下界,及各参数对结构响应的影响程度分析,以期为管片衬砌结构的鲁棒优化设计以及不确定性相关的进一步研究提供参考.

1 基本情况描述与计算参数选取

琼州海峡东西长约 80.3 km,南北平均宽度约为 29.5 km,最小宽度为 19.4 km,琼州海峡跨海通道推荐采用的中线铁路盾构隧道方案^[20]隧址附近海峡宽度约 21 km,沿线最大水深 98 m,本文根据文献^[20]取水深 90 m,埋深 40 m 进行计算.

管片环外径取 15.5 m,管片厚 700 mm^[20],管片分块方式参考直径相当的南京纬三路长江隧道(内径 13.3 m,外径 14.5 m,管片厚 0.6 m)^[21],采用 1 个 K 型管片、2 个 B 型管片和 7 个 A 型管片的分块方式,3 种管片圆心角分别为 12.86°、38.57°和 38.57°,管片宽度设为 2.0 m,不考虑二衬.

根据《盾构隧道管片质量检测技术标准》(CJJ/T 164—2011),混凝土管片的混凝土强度等级不应小于 C50.南京纬三路过江通道^[21-22]最大水压力达到 0.72 MPa,使用的是 C60 高强度混凝土,而规划论证中的琼州海峡跨海通道隧道方案最高水压力可达 1.4 MPa^[13],所以本文管片采用 C70 混凝土^[23],混凝土弹性模量为 37.0 GPa,泊松比为 0.17,密度为 2 300 kg/m³.

琼州海峡中部基本上是第三纪和第四纪的沉积层,200~300 m 的深度范围内未见基岩和较好持力层,主要以粉细砂、粉质黏土及黏土为主^[24].本文分别采用水土分算方式和水土合算方式进行区间分析.水土分算时,侧向土压力系数区间为 0.35~0.55,地层抗力系数区间为 5~50 MN/m³;水土合算时,侧向土压力系数区间为 0.65~0.75,地层抗力系数区间为 5~10 MN/m³.地层中土的饱和重度取 19.0 kN/m³.

由于目前没有相关的接头等效抗弯刚度试验数据,参考文献^[4]和^[7],本文假设管片接头等效抗弯刚度的取值范围为 40~400 MN·m/rad.

2 计算模型

2.1 结构模型

梁-弹簧模型如图 1 所示.利用 ANSYS 建立有限元模型,管片用 beam188 梁单元模拟,采用三次单元形函数,截面形状为矩形;假定地层弹簧只抗压不抗拉,采用 combin39 非线性弹簧单元模拟;相邻管片间接头的抗弯性能及切向地层弹簧使用 combin14 单元来模拟.

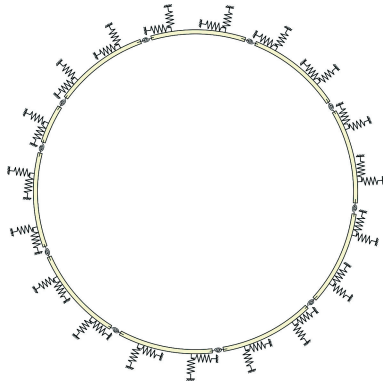


图 1 盾构隧道管片梁-弹簧模型

Fig. 1 Beam-spring model for shield tunnel segment

2.2 荷载模型

荷载包括顶部垂直水土压力、底部垂直荷载反

力、水平水土压力以及管片自重^[4]，如图2所示。

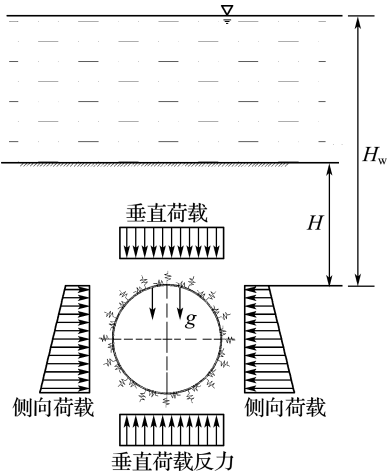


图2 荷载-结构模型

Fig.2 Loads-structure model

采用水土分算时，衬砌顶部的垂直土压力按式(1)计算，顶部总体的垂直水土压力按式(2)计算；采用水土合算时，顶部垂直土压力和总体的水土压力按式(3)计算：

$$\sigma_v = \gamma' H \tag{1}$$

$$P_1 = \sigma_v + \gamma_w H_w = \gamma' H + \gamma_w H_w \tag{2}$$

$$\sigma_v = P_1 = \gamma_w (H_w - H) + \gamma H \tag{3}$$

式中： σ_v 和 P_1 分别为隧道顶部土压力和总体的水土压力， H 为隧道顶部覆土厚度， γ 和 γ' 分别为土的饱和容重和浮重， γ_w 为水的重度， H_w 为总水头高度。

水土分算时，梯形水平压力为

$$q_1 = \lambda \sigma_v + \gamma_w H_w = \lambda (\gamma' H + \gamma_w H_w) + \gamma_w H_w \tag{4}$$

$$q_2 = q_1 + 2(\lambda \gamma' + \gamma_w) R_c \tag{5}$$

水土合算时，梯形水平压力为

$$q_1 = \lambda \sigma_v = \lambda [\gamma_w (H_w - H) + \gamma H] \tag{6}$$

$$q_2 = q_1 + 2\lambda \gamma R_c \tag{7}$$

其中 q_1 和 q_2 分别对应水平梯形荷载在隧道顶部和底部的取值， λ 为侧向土压力系数， R_c 为管片环中心线半径。

管片单位长度的自重为

$$g = \gamma_c A \tag{8}$$

式中： γ_c 为管片材料的重度， A 为管片截面积；底部的垂直反力 P_v 为

$$P_v = P_1 + g\pi \tag{9}$$

地层对管片结构侧向的抗力通过地层弹簧来模拟，法向弹簧刚度系数根据地层抗力系数等效计算得到，切向抗力系数一般取为法向抗力系数

的 $1/3$ ^[4]。

表1 为水土分算与合算对应的荷载大小/区间。

表1 荷载大小/区间

Tab.1 Loads and load intervals kPa				
荷载模式	P_1	q_1 区间	q_2 区间	P_v
水土分算	1 660	[1 426, 1 498]	[1 647, 1 708]	1 759.14
水土合算	1 660	[1 080, 1 245]	[1 253, 1 445]	1 759.14

3 区间不确定性计算模型及求解方法

3.1 区间有限元模型

梁-弹簧计算模型的有限元控制方程可写为

$$\mathbf{K}(k_\theta, k_g) \mathbf{u} = \mathbf{F}(\lambda, H, H_w) \tag{10}$$

式中： $\mathbf{K}(k_\theta, k_g)$ 为整体刚度矩阵， k_θ 和 k_g 分别为接头等效抗弯刚度、地层抗力系数； $\mathbf{u}$ 为管片节点位移向量； $\mathbf{F}(\lambda, H, H_w)$ 为荷载向量。

式(10)可进一步写为

$$\mathbf{K}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{u} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) \tag{11}$$

其中 $\boldsymbol{\alpha} = (k_g \quad \lambda \quad k_\theta)^T$ ， $\boldsymbol{\beta} = (H \quad H_w)^T$ ，设 $\boldsymbol{\alpha}$ 为区间变量

$$\boldsymbol{\alpha} \in \boldsymbol{\alpha}^I = (\boldsymbol{\alpha}, \bar{\boldsymbol{\alpha}}) \tag{12}$$

其中 $\boldsymbol{\alpha}^I$ 为区间参数向量， $\boldsymbol{\alpha} = (\underline{k}_g \quad \underline{\lambda} \quad \underline{k}_\theta)^T$ 为区间下界， $\bar{\boldsymbol{\alpha}} = (\bar{k}_g \quad \bar{\lambda} \quad \bar{k}_\theta)^T$ 为区间上界。

对确定性问题，只需求解方程(11)即可得到管片上各个节点的位移响应，由位移可以计算管片的内力。对不确定性问题， $\mathbf{u}$ 是区间向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 的函数，式(11)的解应是一个集合^[25]：

$$\boldsymbol{\Gamma} = \{\mathbf{u} : \mathbf{u} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{K}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{u} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}), \boldsymbol{\alpha} \in \boldsymbol{\alpha}^I\} \tag{13}$$

一般而言，求解式(13)的解集是比较困难的^[25]，但通常只需关注 $\mathbf{u}$ 的上下界，即求解位移区间向量

$$\mathbf{u}^I = [\underline{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{u}}] = (\underline{u}_i^I) = ([\underline{u}_i, \bar{u}_i]) \tag{14}$$

其中 u_i 为向量 $\mathbf{u}$ 的第 i 个元素， u_i^I 的上下界 $\bar{u}_i$ 和 $\underline{u}_i$ 为

$$\begin{aligned} \bar{u}_i &= \max\{u_i : \mathbf{u} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{K}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{u} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}), \boldsymbol{\alpha} \in \boldsymbol{\alpha}^I\} \\ \underline{u}_i &= \min\{u_i : \mathbf{u} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{K}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{u} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}), \boldsymbol{\alpha} \in \boldsymbol{\alpha}^I\} \end{aligned} \tag{15}$$

3.2 求解方法

式(15)是一个极大/极小值问题，可利用最优化方法进行求解。但当问题比较复杂，计算自由度较大时，优化问题的求解将受到计算效率的制约^[26]。已有不少方法可对式(15)进行求解，如迭代方法、优化方法、区间截断法、组合法、Taylor级数展开法、区间摄动法，以及配点型区间有限元

法^[25-27]等.

在求解中需考虑的几个因素是:(1)尽量避免因元素间相关性造成的区间扩张;(2)注意 Taylor 展开类算法对于区间大小的限制;(3)尽量降低计算开销.

本文涉及的区间不确定性问题求解有两个特点:(1)3 个不确定参数的变化区间相对较大.若以区间中值为参考值,接头等效抗弯刚度的相对偏差达到了 $\pm 82\%$,水土分算时侧向土压力系数和地层抗力系数的相对偏差分别为 $\pm 22\%$ 和 $\pm 82\%$,水土合算时侧向土压力系数和地层抗力系数的相对偏差也分别达到了 7% 和 25% .(2)计算中假设图 1 中土体弹簧不能承受拉力,导致弹簧本构关系以及整个问题的非线性.

考虑到这两个特点,采用组合法求解是一个直接可行的选择.既可避免区间扩张,又不受展开类算法对区间大小的限制.由于梁-弹簧模型的计算规模不大,而且只有 3 个不确定性变量,即便样本点取得较多,也不会导致过大的计算量.

组合法求解中,假设有 n 个不确定性变量,对每个不确定性变量 α_j ($1 \leq j \leq n$),在其区间范围 $[\alpha_j, \bar{\alpha}_j]$ 内配置包括边界点在内的 m_j ($m_j \geq 2$) 个样本点 $\beta_{k_j}^{(j)}$ ($k_j = 1, 2, \dots, m_j$),令

$$\Theta_j^{m_j} = (\beta_1^{(j)} \quad \beta_2^{(j)} \quad \dots \quad \beta_{m_j}^{(j)}) \quad (16)$$

总体样本点组合的张量积为^[27]

$$\Theta = \Theta_1^{m_1} \times \Theta_2^{m_2} \times \dots \times \Theta_n^{m_n} \quad (17)$$

Θ 中的元素为 $(\beta_{k_1}^{(1)}, \beta_{k_2}^{(2)}, \dots, \beta_{k_n}^{(n)})$, 其中 $1 \leq k_1 \leq m_1, \dots, 1 \leq k_n \leq m_n$, 总体样本点的组合数目为

$$M = \prod_{j=1}^n m_j = m_1 \times m_2 \times \dots \times m_n \quad (18)$$

对集合 Θ 中的每一个元素 θ_l ($l = 1, 2, \dots, M$) 由式 (11) 求解 $\mathbf{u}^{(l)}$; 并通过 $\mathbf{u}^{(l)}$ 计算内力 $\mathbf{s}^{(l)}$ ($l = 1, 2, \dots, M$). 设集合 $\mathbf{U} = \{\mathbf{u}^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}, \dots, \mathbf{u}^{(M)}\}$, $\mathbf{S} = \{\mathbf{s}^{(1)}, \mathbf{s}^{(2)}, \dots, \mathbf{s}^{(M)}\}$, 则节点位移和内力的区间解可近似取为

$$\underline{u}_i = \min\{u_i; \mathbf{u} \in \mathbf{U}\} \quad (19)$$

$$\bar{u}_i = \max\{u_i; \mathbf{u} \in \mathbf{U}\}$$

$$\underline{s}_{ij} = \min\{s_{ij}; \mathbf{s} \in \mathbf{S}\} \quad (20)$$

$$\bar{s}_{ij} = \max\{s_{ij}; \mathbf{s} \in \mathbf{S}\}$$

其中内力 $\mathbf{s} = \{\mathbf{N}, \mathbf{M}\}$, $\mathbf{N}$ 和 $\mathbf{M}$ 分别为轴力和弯矩向量.

本文采用均匀配点:

$$\beta_{k_j}^{(j)} = \underline{\alpha}_j + \frac{k_j - 1}{m_j - 1}(\bar{\alpha}_j - \underline{\alpha}_j); \quad k_j = 1, 2, \dots, m_j \quad (21)$$

也可以采用其他的配点方式.

3.3 影响度计算

通过以上求解,可以得到位移与内力对区间不确定性参数的区间响应.若需了解某个不确定参数对位移或内力的影响程度,可借鉴 Hanss 等在研究模糊不确定性问题时提出的参数影响度计算方法^[28].

设 f 是 $\mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n)^T$ 的连续函数,则 $f(\mathbf{X})$ 在点 $\mathbf{X}^* = (x_1^* \quad x_2^* \quad \dots \quad x_n^*)^T$ 处的一阶 Taylor 级数展开为

$$f(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\mathbf{X}^*)}{\partial x_i} (x_i - x_i^*) + O^2(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (22)$$

忽略高阶项,

$$\Delta f = f(\mathbf{X}) - f(\mathbf{X}^*) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\mathbf{X}^*)}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (23)$$

其中 $\Delta x_i = x_i - x_i^*$, 式 (23) 可进一步写为

$$\Delta f = \sum_{i=1}^n x_i^* \frac{\partial f(\mathbf{X}^*)}{\partial x_i} \frac{\Delta x_i}{x_i^*} \quad (24)$$

令

$$\eta_i^* = x_i^* \frac{\partial f(\mathbf{X}^*)}{\partial x_i} \quad (25)$$

$$\rho_i^* = \eta_i^* / \sum_{k=1}^n \eta_k^* \quad (26)$$

则 ρ_i^* 为 x_i 对 f 的影响度因子^[28], 它反映了参数 x_i 的不确定性对 f 不确定性的相对影响程度, 并且有

$$\sum_{i=1}^n \rho_i^* = 1.$$

本文中共有 3 个不确定性变量,参考以上的定义方式有

$$\eta_1 = \frac{\alpha_1^* \sum_{j_2=1}^{m_2} \sum_{j_3=1}^{m_3} [s(\beta_{k_1}^{(1)}, \beta_{k_2}^{(2)}, \beta_{k_3}^{(3)}) - s(\beta_1^{(1)}, \beta_{k_2}^{(2)}, \beta_{k_3}^{(3)})]}{m_2 m_3 (\bar{\alpha}_1 - \underline{\alpha}_1)} \quad (27)$$

$$\eta_2 = \frac{\alpha_2^* \sum_{j_1=1}^{m_1} \sum_{j_3=1}^{m_3} [s(\beta_{k_1}^{(1)}, \beta_{k_2}^{(2)}, \beta_{k_3}^{(3)}) - s(\beta_{k_1}^{(1)}, \beta_1^{(2)}, \beta_{k_3}^{(3)})]}{m_1 m_3 (\bar{\alpha}_2 - \underline{\alpha}_2)} \quad (28)$$

$$\eta_3 = \frac{\alpha_3^* \sum_{j_1=1}^{m_1} \sum_{j_2=1}^{m_2} [s(\beta_{k_1}^{(1)}, \beta_{k_2}^{(2)}, \beta_{k_3}^{(3)}) - s(\beta_{k_1}^{(1)}, \beta_{k_2}^{(2)}, \beta_1^{(3)})]}{m_1 m_2 (\bar{\alpha}_3 - \underline{\alpha}_3)} \quad (29)$$

其中 $s(\beta_{k_1}^{(1)}, \beta_{k_2}^{(2)}, \beta_{k_3}^{(3)})$ 为由 $u(\beta_{k_1}^{(1)}, \beta_{k_2}^{(2)}, \beta_{k_3}^{(3)})$ 计算得到的管片内力, $\alpha_i^* = (\alpha_i + \bar{\alpha}_i)/2$, $i = 1, 2, 3$ 为 3 个参数的区间中值,进而与 s 相关的影响度因子为

$$\rho_i = \eta_i / \sum_{q=1}^3 \eta_q; i=1,2,3 \tag{30}$$

以上的推导是基于一阶 Taylor 级数展开的一个近似,仅适于参数区间较小的情况,区间较大时可能会有较大误差。

4 区间结果及分析

4.1 内力区间上下界

计算中考虑 3 种工况:(1)工况 1:地层抗力系数与侧向土压力系数同时为区间变量,接头等效抗弯刚度为确定性变量;(2)工况 2:地层抗力系数与侧向土压力系数为确定性变量,接头等效抗弯刚度为区间变量;(3)工况 3:地层抗力系数、侧向土压力系数和接头等效抗弯刚度都为区间变量。

求解过程中地层抗力系数、侧向土压力系数和接头等效抗弯刚度按式(21)取点, m_1 、 m_2 和 m_3 都设为 11,则对应 3 种工况的样本点个数 M 分别为 121、11 和 1 331。计算中将各参数取区间中值的计算结果作为确定性解与区间解进行比较。得到管片的轴力和弯矩区间上下界沿管片环向的分布如图 3 和 4 所示。图中的 0° 和 180° 位置对应隧道的两侧, 90° 和 270° 位置对应隧道顶部和底部。

表 2、3 和 4 分别列出了 3 种工况下最大轴力、最大正/负弯矩与确定性解的对比。表 5 是工况 3 计算得到的隧道顶部、隧道底部和隧道侧面的位移区间。

结果分析表明:

(1)从图 3 和表 2 可以看出,3 个参数的不确定性对最大轴力的位置和大小影响都很小,最大轴力的最大相对变化量为 1.19%。

本文计算中垂直方向荷载是管片衬砌的主要荷载,主要由轴力承担。由于 3 个区间参数与垂直方向荷载大小无关,其不确定性对轴力的影响不大。

(2)从图 4 和表 3、4 的结果可以看出,无论是水土分算还是合算,当侧向土压力系数和地层抗力系数为区间变量时,与确定性解相比,最大正/负弯矩的位置和大小都产生了较大变化,当接头等效抗弯刚度单独为区间变量时,正/负弯矩的极值变化相对较小;另外,从表 3、4 来看,工况 2 水土合算得到的最大正/负弯矩比分算得到的结果变化更大。

水土分算与合算在垂直方向的荷载是相同的,但侧向土压力系数不同,导致水平侧向荷载不

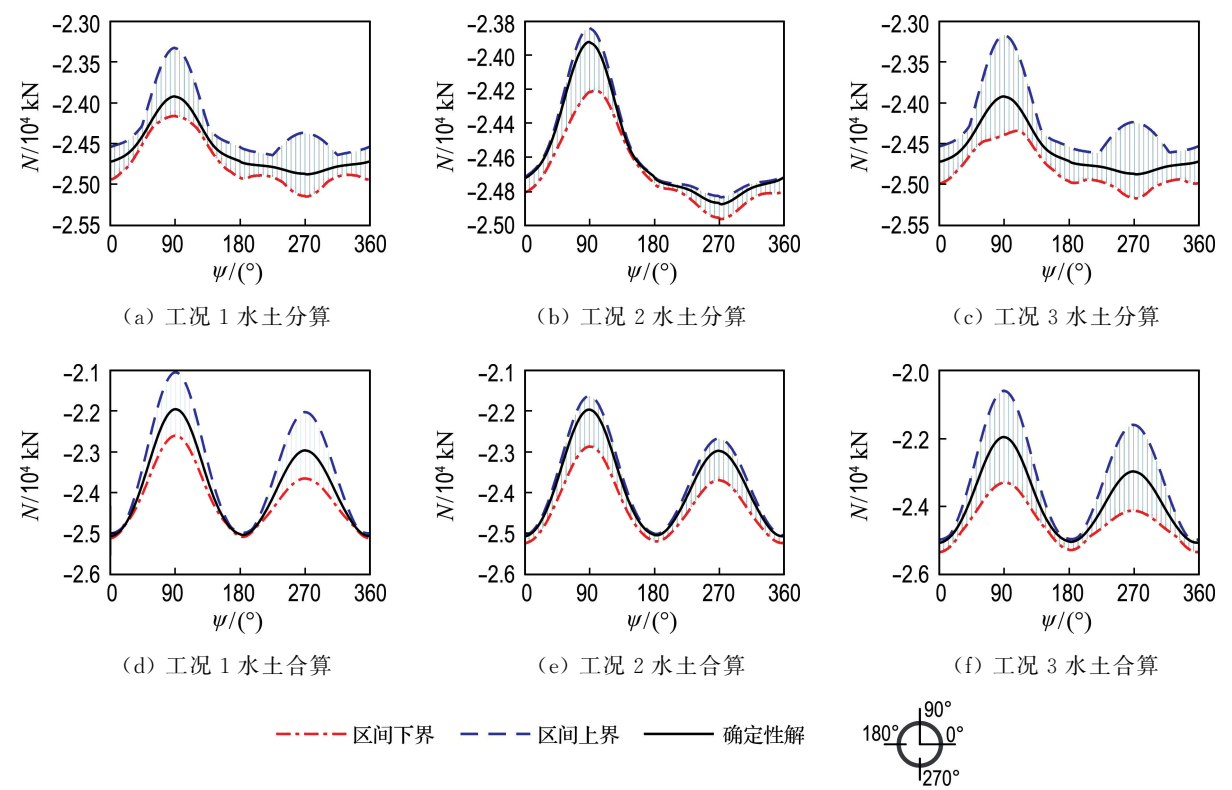


图 3 轴力区间上下界

Fig. 3 Upper and lower bounds of axial force

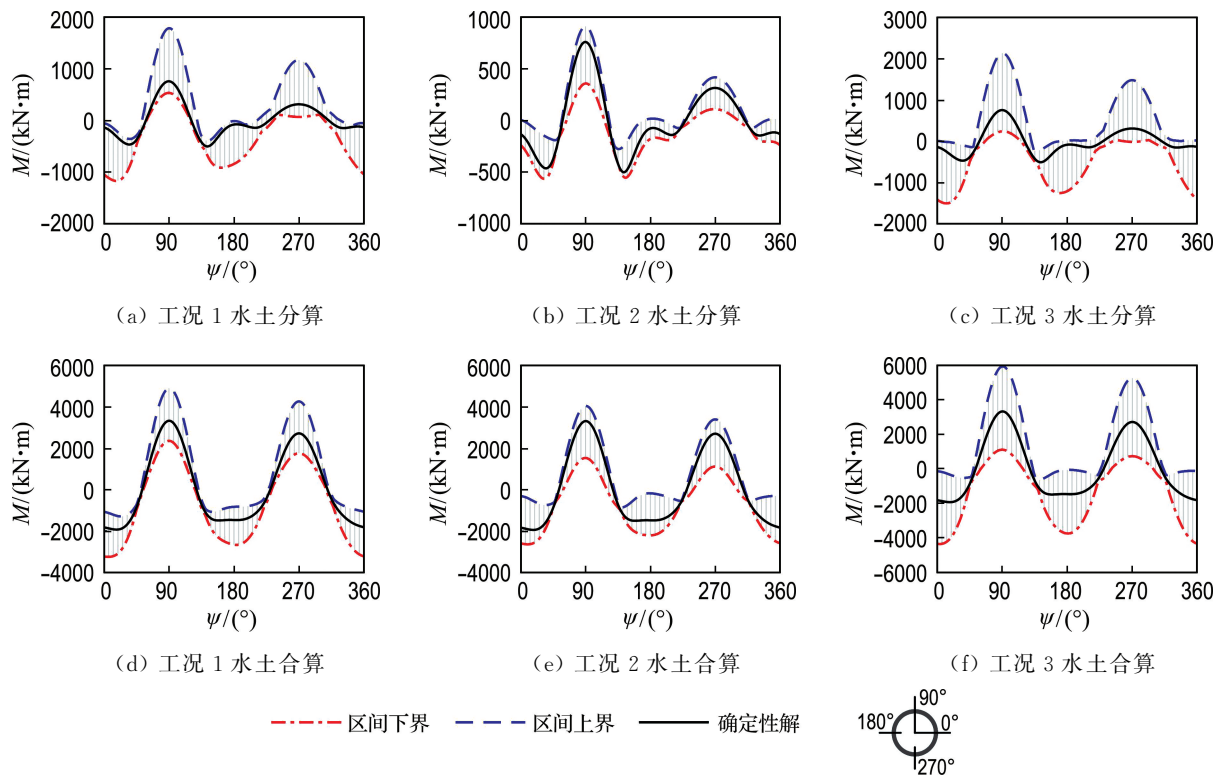


图 4 弯矩区间上下界

Fig. 4 Upper and lower bounds of bending moment

表 2 最大轴力对比

Tab. 2 Comparison of maximum axial force

荷载模式	确定性解/ kN	工况 1		工况 2		工况 3	
		最大轴力/kN	增加百分比/%	最大轴力/kN	增加百分比/%	最大轴力/kN	增加百分比/%
水土分算	-24 877	-25 149	1.09	-24 965	0.35	-25 172	1.19
水土合算	-25 062	-25 115	0.21	-25 228	0.66	-25 340	1.11

表 3 最大正弯矩对比

Tab. 3 Comparison of maximum positive bending moment

荷载模式	确定性解/ (kN · m)	工况 1		工况 2		工况 3	
		最大弯矩/ (kN · m)	增加百分比/%	最大弯矩/ (kN · m)	增加百分比/%	最大弯矩/ (kN · m)	增加百分比/%
水土分算	763	1 792	134.95	914	19.77	2 140	180.53
水土合算	3 315	4 885	47.34	4 047	22.06	5 922	78.62

表 4 最大负弯矩对比

Tab. 4 Comparison of maximum negative bending moment

荷载模式	确定性解/ (kN · m)	工况 1		工况 2		工况 3	
		最大弯矩/ (kN · m)	增加百分比/%	最大弯矩/ (kN · m)	增加百分比/%	最大弯矩/ (kN · m)	增加百分比/%
水土分算	-501	-1 169	133.37	-564	12.68	-1 499	199.31
水土合算	-1 942	-3 255	67.63	-2 636	35.75	-4 366	124.85

同,如表 1 所示.侧向水平荷载不同,对管片侧向变形的约束不同,也因此改变了变形、弯矩的大小与分布.水土合算对应的水平荷载比分算对应水平荷载小,因此对应的变形明显大于分算的变形,

如表 5 所示,二者所得弯矩的计算结果相差也较大.另一方面,地层弹簧、接头等效抗弯刚度主要与变形、弯矩相关,因此与轴力相比,3 个参数的不确定性对变形、弯矩的影响更明显.

表 5 管片变形区间
Tab. 5 Interval of segment deformation mm

	水土分算			水土合算		
	下界	上界	确定性解	下界	上界	确定性解
顶部	11.0	63.8	16.3	46.2	163.5	74.1
底部	7.1	36.0	10.7	37.4	120.2	60.4
侧面	1.1	34.8	4.3	32.2	112.7	56.0
最大	11.4	70.6	17.3	47.7	180.9	77.8

4.2 样本点数量影响

在基于组合法的区间不确定性分析中,样本点数量的选取需兼顾计算精度与计算开销.增加样本点个数 m_i ,将提高区间估计的准确性,同时也将增大计算开销量.表 6 给出对应工况 3 当 m_i 取 2、3、6 和 11 时,水土合算模式下管片环某些截面上轴力或弯矩上下界的对比.在这些截面上,轴力/弯矩的区间上下界几乎没有受到 m_i 的影响,对其他截面,及水土分算模式下也有类似结果.

表 6 不同样本点数量的结果比较
Tab. 6 Comparison of results with different m_i

位置		轴力/kN			
		$m_i=2$	$m_i=3$	$m_i=6$	$m_i=11$
90°	下界	-23 296	-23 296	-23 296	-23 296
	上界	-20 591	-20 591	-20 591	-20 591
135°	下界	-24 297	-24 297	-24 297	-24 297
	上界	-23 035	-23 035	-23 035	-23 035
180°	下界	-25 268	-25 268	-25 268	-25 268
	上界	-24 948	-24 948	-24 948	-24 948

位置		弯矩/(kN·m)			
		$m_i=2$	$m_i=3$	$m_i=6$	$m_i=11$
135°	下界	-976	-976	-992	-992
	上界	-429	-429	-429	-429
180°	下界	-3 757	-3 757	-3 757	-3 757
	上界	-61	-61	-61	-61
225°	下界	-667	-667	-682	-684
	上界	-127	-127	-127	-127

对梁-弹簧模型计算而言,地层弹簧单元是非线性的,而其余相关部分都是线性的.由计算结果推测,地层弹簧的非线性在所涉及的计算中影响较小,整个问题基本是线性的,因而管片上轴力和

弯矩的极值可能都在不确定参数区间的端点附近取得.

4.3 影响度分析

同时取侧向土压力系数、地层抗力系数和接头等效抗弯刚度为区间变量,考虑这些参数的不确定性对管片最大轴力和最大弯矩的区间影响度,计算结果列于表 7.

表 7 区间参数的影响度
Tab. 7 The degrees of influence of interval parameters

参 数	最大轴力 影响度		最大正弯矩 影响度		最大负弯矩 影响度	
	水土 分算	水土 合算	水土 分算	水土 合算	水土 分算	水土 合算
k_g	6.74	2.86	21.58	15.45	10.23	20.93
λ	87.30	90.20	54.73	73.60	71.12	64.66
k_θ	5.96	6.94	23.69	10.95	18.65	14.41

式(26)定义的影响度因子仅适用于参数区间变化较小的情况,因此 3 个参数的区间半径取中值偏差 $\pm 1\%$ 进行计算,3 个参数的区间分别为 0.445 5~0.454 5、27 225~27 775 kN/m³ 和 217 800~222 200 kN·m/rad.

从表 7 可以看出:无论采用水土分算还是合算,侧向土压力系数对轴力与弯矩的影响度都相对较大,这可能主要是因为侧向土压力系数直接影响着垂直荷载与水平荷载的比例,约束着横向变形的大小.

4.4 安全系数的区间分析

获取管片轴力和弯矩的区间解后,可进一步开展相关的安全性分析.根据我国的公路和铁路隧道设计规范^[29-30],混凝土矩形截面偏心受压构件的抗压强度和抗拉强度应分别按式(31)和式(32)计算:

$$KN=\varphi\alpha R_s b h \tag{31}$$

$$KN=\varphi \frac{1.75R_l b h}{\frac{6e_0}{h}-1} \tag{32}$$

当偏心距 $e_0\leqslant 0.2h$ 时,由抗压强度控制承载力;当 $e_0>0.2h$ 时,由抗拉强度控制承载力.其中 K 为安全系数; N 为截面所受轴力; φ 为构件纵向弯曲系数(这里取 $\varphi=1$); R_s 和 R_l 分别为混凝土的抗压和抗拉极限强度; b 为截面宽度; h 为衬砌截面厚度; $e_0=M/N$ 为轴力偏心距, M 为截面所受弯矩; α 为轴力偏心影响系数,按下式计算:

$$\alpha=1+0.648\frac{e_0}{h}-12.569\left(\frac{e_0}{h}\right)^2+15.444\left(\frac{e_0}{h}\right)^3$$

(33)

取侧向土压力系数、地层抗力系数和接头等效抗弯刚度同时为区间变量,C70 混凝土的 R_a 为 31.8 MPa, R_l 为 2.14 MPa^[23],不考虑配筋,按混凝土矩形截面偏心受压构件来计算管片衬砌的安全系数区间.安全系数是通过计算所有有限元节点的安全系数并取其中最小值得到的.

表 8 给出了安全系数区间的上下界,以及用 3 个参数的区间中值计算得到的确定性安全系数.

表 8 安全系数区间

Tab.8 Interval of safety factor

荷载模式	区间求解		确定性安全系数
	下界	上界	
水土分算	1.73	1.81	1.80
水土合算	0.17	1.79	0.81

由表 8 的结果可以看出:

(1)采用水土分算时,安全系数区间上下界相差比较小,主要是因为水土分算时管片弯矩比较小,最大偏心距为 0.092 3 m,没有超过 0.2*h*,所以都是按抗压强度控制承载力并计算安全系数.安全系数按式(31)计算,只与轴力及 R_a 有关,而轴力区间变化较小,所以安全系数区间较小.

(2)水土合算时,安全系数区间较大,且安全系数下界只有 0.17.这主要是水土合算时既会出现 $e_0\leqslant0.2h$ 的情况,也会出现 $e_0>0.2h$ 的情况,这时需由抗拉强度控制承载力,混凝土抗拉强度较低且没有考虑配筋,因而导致安全系数的下界较低且安全系数区间较大.

规范^[29-30]对各种荷载情况下隧道衬砌结构按抗压/拉极限强度设计时的最小安全系数做了不同的规定,若假设最小安全系数为 2.4,则由表 8 可以看出,在本文给定的荷载条件下,如不考虑配筋,0.7 m 的衬砌厚度是不符合设计要求的.

现保持衬砌内径和荷载不变,取不同的衬砌厚度,计算两种荷载模式下的确定性安全系数,以及侧向土压力系数、地层抗力系数和接头等效抗弯刚度同时为区间变量时的安全系数上下界,如表 9、10 所示,其中荷载模式 1 表示水土分算,荷载模式 2 表示水土合算.对表 9、10 中的数据进行光滑化处理,可得到确定性安全系数以及安全系数上下界与衬砌厚度的关系曲线,如图 5 所示.

表 9 不同衬砌厚度的安全系数(荷载模式 1)

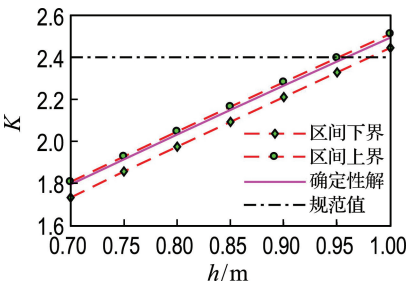
Tab.9 Safety factor of different lining thicknesses (loading mode 1)

<i>h</i> /m	最大偏心距/m		安全系数		
	下界	上界	下界	上界	确定性
0.70	0.010	0.092	1.73	1.81	1.80
0.75	0.010	0.097	1.86	1.93	1.92
0.80	0.010	0.100	1.98	2.05	2.03
0.85	0.010	0.104	2.09	2.17	2.15
0.90	0.010	0.106	2.21	2.28	2.27
0.95	0.010	0.109	2.33	2.40	2.38
1.00	0.010	0.111	2.44	2.51	2.49

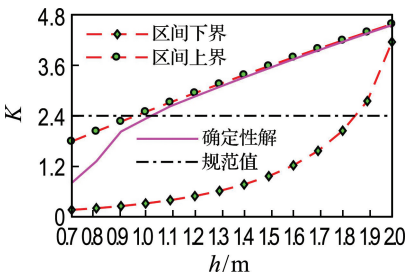
表 10 不同衬砌厚度的安全系数(荷载模式 2)

Tab.10 Safety factor of different lining thicknesses (loading mode 2)

<i>h</i> /m	最大偏心距/m		安全系数		
	下界	上界	下界	上界	确定性
0.70	0.047	0.288	0.17	1.79	0.81
0.80	0.047	0.316	0.21	2.03	1.32
0.90	0.047	0.337	0.26	2.26	2.03
1.00	0.047	0.352	0.32	2.49	2.33
1.10	0.047	0.364	0.40	2.72	2.63
1.20	0.047	0.372	0.50	2.94	2.86
1.30	0.047	0.378	0.62	3.15	3.08
1.40	0.047	0.382	0.78	3.37	3.31
1.50	0.046	0.385	0.97	3.58	3.53
1.60	0.046	0.387	1.23	3.78	3.74
1.70	0.046	0.389	1.57	3.99	3.95
1.80	0.046	0.390	2.05	4.18	4.15
1.90	0.045	0.391	2.75	4.38	4.35
2.00	0.045	0.391	4.15	4.57	4.55



(a) 荷载模式 1



(b) 荷载模式 2

图 5 安全系数随衬砌厚度的变化

Fig. 5 Variations of safety factors with lining thicknesses

由图5中的曲线可确定两种荷载模式下安全系数为2.4时的衬砌厚度。水土分算时,确定性计算为0.96 m,与区间上界基本相同,与区间下界0.98 m也相差不大;水土合算时,确定性计算为1.03 m,与区间下界1.85 m相差较大。

5 结 论

(1)建议采用区间变量描述侧向土压力系数、地层抗力系数和接头等效抗弯刚度的不确定性,考虑到初始设计阶段各关键参数的先验信息往往较少且难以获得,以只需上下界表达的区间模型来描述影响管片衬砌的不确定性因素,是一种合理的选择。

(2)建立了基于梁-弹簧有限元模型的管片衬砌结构区间不确定性数值分析模型,实现了对管片衬砌结构轴力、弯矩、位移及安全系数的区间不确定性分析,并通过与确定性分析结果的比对,讨论了参数区间不确定性对轴力、弯矩及安全系数的影响。

(3)探讨了不同荷载模式(水土分算与水土合算)对不确定性分析的影响,计算结果表明:不同的荷载模式将导致结果相差较大,因此在设计中应妥善考虑。

(4)本文是在管片直径/管片厚度、水深/埋深为确定性的前提下展开的,但所提方法也可方便地将管片直径/管片厚度、水深/埋深作为区间不确定性参数进行分析。

从作者目前查阅的盾构隧道管片衬砌相关文献来看,似还未见到与本文工作直接相关的报道。本文虽是基于梁-弹簧有限元模型展开的,但对区间不确定性问题的处理方法,可推广到更复杂的结构计算模型。目前尚未考虑配筋、接头细节以及管片衬砌材料非线性等影响,还需要更进一步的研究工作以便为管片衬砌结构安全性设计提供更细节、更有价值的参考。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015 [J]. 中国公路学报, 2015, **28**(5):1-65.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research: 2015 [J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2015, **28**(5):1-65. (in Chinese)

[2] 封 坤,刘四进,邱 月,等. 盾构隧道地层抗力系数的修正计算方法研究 [J]. 铁道工程学报, 2014(7):62-67.
FENG Kun, LIU Sijin, QIU Yue, *et al.* Research on the modified calculation method for ground resistance coefficient of shield tunnel [J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2014(7):62-67. (in Chinese)

[3] 王俊杰,郝建云. 土体静止侧压力系数定义及其确定方法综述 [J]. 水电能源科学, 2013, **31**(7):111-114.
WANG Junjie, HAO Jianyun. Definition of coefficient of earth pressure and methods review [J]. **Water Resources and Power**, 2013, **31**(7):111-114. (in Chinese)

[4] 小泉淳. 盾构隧道管片设计——从容许应力设计法到极限状态设计法 [M]. 官林星,译. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
KOIZUMI A. **Shield Tunnel Design: From Allowable Stress Design Method to Limit State Design Method** [M]. GUAN Linxing, trans. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)

[5] 李术才,徐帮树,李树忱. 海底隧道衬砌结构选型及参数优化研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(21):3894-3902.
LI Shucai, XU Bangshu, LI Shuchen. Lining structure type of subsea tunnel and its support parameters optimizing [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, **24**(21):3894-3902. (in Chinese)

[6] NGOC-ANH D, DIAS D, ORESTE P, *et al.* 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior [J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2013, **37**(6):115-127.

[7] 郭 瑞,何 川,封 坤,等. 大断面水下盾构隧道管片接头抗弯刚度及其对管片内力影响研究 [J]. 中国铁道科学, 2013, **34**(5):46-53.
GUO Rui, HE Chuan, FENG Kun, *et al.* Bending stiffness of segment joint and its effects on segment internal force for underwater shield tunnel with large cross-section [J]. **China Railway Science**, 2013, **34**(5):46-53. (in Chinese)

[8] 何 川,周济民,封 坤,等. 基于接头非线性抗弯刚度的盾构隧道迭代算法的实现与应用 [J]. 土木工程学报, 2012, **45**(3):166-173.
HE Chuan, ZHOU Jimin, FENG Kun, *et al.* An iterative algorithm based on segment joint stiffness

- nonlinearity and application for shield tunnel structures [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, **45**(3):166-173. (in Chinese)
- [9] 朱 伟, 钟小春, 秦建设. 盾构衬砌管片接头力学分析及双直线刚度模型研究 [J]. 岩土力学, 2006, **27**(12):2154-2158.
- ZHU Wei, ZHONG Xiaochun, QIN Jianshe. Mechanical analysis of segment joint of shield tunnel and research on bilinear joint stiffness model [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, **27**(12):2154-2158. (in Chinese)
- [10] 师永翔, 赵武胜. 大直径盾构隧道管片接头抗弯性能研究 [J]. 现代隧道技术, 2013, **50**(1):115-122, 133.
- SHI Yongxiang, ZHAO Wusheng. Research on flexural rigidity of the segment joint of a large-diameter shield tunnel [J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2013, **50**(1):115-122, 133. (in Chinese)
- [11] 吴兰婷, 兰 宇, 曾东洋. 盾构隧道衬砌接头刚度有限元分析 [J]. 山西建筑, 2013, **39**(10):181-183.
- WU Lanting, LAN Yu, ZENG Dongyang. Finite element analysis on masonry joint rigidity of shield tunnel [J]. **Shanxi Architecture**, 2013, **39**(10):181-183. (in Chinese)
- [12] 唐元松, 余海见. 盾构隧道衬砌结构接头处刚度削弱效应的试验研究 [J]. 港工技术, 2013, **50**(3):48-50.
- TANG Yuansong, YU Haijian. Experimental research of stiffness weakening effect on joint of shield tunnel lining structure [J]. **Port Engineering Technology**, 2013, **50**(3):48-50. (in Chinese)
- [13] 封 坤, 何 川, 肖明清. 高轴压作用下盾构隧道复杂接缝面管片接头抗弯试验 [J]. 土木工程学报, 2016, **49**(8):99-110, 132.
- FENG Kun, HE Chuan, XIAO Mingqing. Bending tests of segment joint with complex interface for shield tunnel under high axial pressure [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2016, **49**(8):99-110, 132. (in Chinese)
- [14] 陈必光, 陈卫忠, 郭小红. 盾构隧道纵缝接头抗弯计算模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(s1):2953-2959.
- CHEN Biguang, CHEN Weizhong, GUO Xiaohong. Study on calculation model of flexural behavior of shield segment joint [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, **35**(s1):2953-2959. (in Chinese)
- [15] COLEMAN H W, STEELE W G. **Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers** [M]. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 1999.
- [16] HADIDI R, GUCUNSKI N. Probabilistic approach to the solution of inverse problems in civil engineering [J]. **Journal of Computing in Civil Engineering**, 2008, **22**(6):338-347.
- [17] ODEN J T, BELYTSCHKO T, BABUSKA V, *et al.* Research directions in computational mechanics [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2003, **192**(7/8):913-922.
- [18] ZANG T A, HEMSCH M J, HILBURGER M W, *et al.* Needs and opportunities for uncertainty-based multidisciplinary design methods for aerospace vehicles; NASA/TM-2002-211462 [R]. Virginia: Langley Research Center, 2002.
- [19] FARKAS L, MOENS D, VANDEPITTE D, *et al.* Fuzzy finite element analysis based on reanalysis technique [J]. **Structural Safety**, 2010, **32**(6,SI):442-448.
- [20] 陈 馈. 琼州海峡隧道超大直径盾构新技术展望 [J]. 隧道建设, 2014, **34**(7):603-607.
- CHEN Kui. Prospects on new technologies of super-large diameter shield machine for Qiongzhou Strait tunnel [J]. **Tunnel Construction**, 2014, **34**(7):603-607. (in Chinese)
- [21] 赵武胜, 何先志, 陈卫忠, 等. 盾构隧道与竖井连接处管片及接头震害分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(s2):3847-3854.
- ZHAO Wusheng, HE Xianzhi, CHEN Weizhong, *et al.* Analysis of seismic damage of segments and joints at the junction of shield tunnel and shaft [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, **31**(s2):3847-3854. (in Chinese)
- [22] 拓勇飞, 舒 恒, 郭小红, 等. 超高水压大直径盾构隧道管片接缝防水设计与试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(s1):227-231.
- TUO Yongfei, SHU Heng, GUO Xiaohong, *et al.* Design and experimental study on waterproof gasket of large-diameter shield tunnel under ultra-high water pressure [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, **35**(s1):227-231. (in Chinese)
- [23] 程文灏, 颜德姮, 王铁成, 等. 混凝土结构(上册): 混凝土结构设计原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- CHENG Wenrang, YAN Deheng, WANG Tiecheng, *et al.* **Concrete Structure (Vol. I)**:

Concrete Structural Design Principle [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)

[24] 郭 陕 云. 琼州海峡盾构隧道方案工程技术要点 [J]. 隧道建设, 2010(s1):1-7.
GUO Shanyun. Shield tunnel scheme for Qiongzhou Strait: key technologies of the project [J]. **Tunnel Construction**, 2010(s1):1-7. (in Chinese)

[25] 黄 仁,邱志平. 结构静力分析的区间摄动有限元法 [J]. 工程力学, 2013, **30**(12):36-42.
HUANG Ren, QIU Zhiping. Interval perturbation finite element method for structural static analysis [J]. **Engineering Mechanics**, 2013, **30**(12):36-42. (in Chinese)

[26] 苏静波,邵国建. 基于区间分析的工程结构不确定性研究现状与展望 [J]. 力学进展, 2005, **35**(3): 338-344.
SU Jingbo, SHAO Guojian. Current research and prospects on interval analysis in engineering structure uncertainty analysis [J]. **Advances in Mechanics**, 2005, **35**(3):338-344. (in Chinese)

[27] WANG Chong, QIU Zhiping, YANG Yaowen. Collocation methods for uncertain heat convection-diffusion problem with interval input parameters [J]. **International Journal of Thermal Sciences**, 2016, **107**:230-236.

[28] HANSS M, KLIMKE A. On the reliability of the influence measure in the transformation method of fuzzy arithmetic [J]. **Fuzzy Sets & Systems**, 2004, **143**(3):371-390.

[29] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范: JTG D70—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Chongqing Communications Technology Research & Design Institution. Code for Design of Road Tunnel: JTG D70-2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)

[30] 铁道第二勘察设计院. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2005 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
China Railway Second Survey and Design Institute. Code for Design on Tunnel of Railway: TB 10003-2005 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese)

**Interval uncertainty analysis on mechanical behavior
of segmental lining of shield tunnel**

RAN Chunjiang^{1,2}, YANG Haitian^{* 1,2}, TAO Yue^{1,2}

(1.Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2.State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, China)

Abstract: With the consideration of the uncertainty of parameters concerned with the preliminary design of segmental lining of Qiongzhou Strait shield tunnel, the coefficients of lateral earth pressure, subgrade reaction and the equivalent flexural rigidity of segment joints are regarded as interval uncertain variables, and a beam-spring finite element model based numerical framework is built up for the interval uncertainty analysis. A formula to estimate the degree of influence of interval parameters is derived. Upper and lower bounds of axial force, bending moment and safety factor are provided, and the impact of an individual interval variable uncertainty on the mechanical behavior of segmental lining is evaluated by utilizing numerical analysis. Numerical results indicate that the axial force of the segmental lining is less impacted by uncertainty of considered coefficients, but the deformation and bending moment are considerably impacted. In addition, a significant difference between intervals of safety factors of segment given by two loading modes is observed, and is necessarily taken into account in design. The work presented is hopefully valuable for the robust optimization design of segmental lining.

Key words: shield tunnel; segmental lining; beam-spring model; interval uncertainty