

基于现场测试的复合地层盾构隧道荷载反演分析*

王文和¹ 徐一帆^{2,3} 孙 彰¹ 何政树² 王士民² 陈 泽⁴

(1. 深圳地铁建设集团有限公司, 518026, 深圳; 2. 西南交通大学交通隧道教育部重点实验室, 610031, 成都;

3. 台州市交通工程管理中心, 317700, 台州; 4. 中国建筑第五工程局有限公司, 410001, 长沙)

摘 要 [目的] 当隧道穿越横向复合地层时, 荷载模式尚不明确, 最终内力设计值往往与实际值存在偏差, 因此有必要研究上软下硬复合地层中, 地铁盾构隧道管片与土体的相互作用关系。[方法] 以深圳地铁 13 号线留仙洞站—百旺港大站盾构穿越混合花岗岩区段为例, 分析主体结构的内力情况, 根据管片内力稳定后的现场实测值, 选取待反演参数, 定义优化目标函数。采用 QPSO(量子粒子群) 算法优化荷载参数, 反演分析上软下硬地层中荷载的合理参数取值和具体受荷情况。[结果及结论] 相比于 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》中的取值, 通过 QPSO 算法反演计算得到的荷载参数更适用于上软下硬地层, 所计算出的内力分布形式较为接近实际情况, 验证了所提分析方法的可行性与合理性。针对上软下硬的复合地层, 隧道上覆荷载可取塌落拱高度计算, 下层硬岩段侧压力系数应对地勘值进行适当放大。

关键词 盾构隧道; 结构内力; 现场测试; 反演分析

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.009

Inversion Analysis of Shield Tunnel Load in Composite Strata Based on Field Tests

WANG Wenhe¹, XU Yifan^{2,3}, SUN Zhang¹, HE Zhengshu², WANG Shimin², CHEN Ze⁴

(1. Shenzhen Metro Construction Group Co., Ltd., 518026, Shenzhen, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 3. Taizhou Traffic Engineering Management Center, 317700, Taizhou, China; 4. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., 410001, Changsha, China)

Abstract [Objective] Due to the unclear load pattern, the final internal force design value often deviates from the actual value when a tunnel crosses transverse composite strata. Therefore, it is necessary to study the interaction between the metro shield tunnel segments and the soil in composite strata with soft upper layers and hard lower layers. [Method] Taking the Liuxiandong Station to Baiwang HKU Station shield tunnel cross-

ing the mixed granite interval on Shenzhen Metro Line 13 as an example, the internal force situation of the main structure is analyzed. Based on the field-measured values after the segment internal force stabilizes, parameters for the inversion analysis are selected, and an optimization objective function is defined. The QPSO (quantum particle swarm optimization) algorithm is used to optimize the load parameters, and the reasonable parameter values and specific loading conditions in the upper-soft and lower-hard strata are obtained through inversion analysis.

[Result & Conclusion] Compared with the values in TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnels, the load parameters obtained through QPSO algorithm inversion calculation are more suitable for the upper-soft and lower-hard strata. The calculated internal force distribution is more similar to the actual situation, verifying the feasibility and rationality of the proposed analysis method. For composite strata with upper-soft and lower-hard layers, the tunnel overburden load can be calculated using the collapse arch height, and the lateral pressure coefficient of the lower hard rock section should be appropriately amplified for geological survey values.

Key words shield tunnel; structural internal force; field test; inversion analysis

盾构隧道管片结构设计时主要采用的结构内力计算模型为: 荷载-结构模型和地层-结构模型, 其中荷载-结构模型由于概念清楚、荷载明确、计算简单等优点, 在工程界获得了广泛的应用。而合理确定地下结构上的荷载大小及分布是确保地下结构安全的关键问题。

目前, 针对复杂地质条件、高水压力、大直径盾构问题, 其理论计算公式中各参数的选取难度较大, 仅能凭借经验确定参数取值。为了解决上述问题, 采用衬砌结构应变或内力反演结构荷载是一种可行的方法^[1], 已有学者开展了关于地下工程反分

* 国家自然科学基金重大项目(51991394); 中国博士后科学基金会项目(2019M663901XB); 住房和城乡建设部 2020 年科学技术计划项目(2020-K-140)

析问题的研究。文献[2]结合越江隧道工程,采用全面试验法对大直径水下隧道结构水土压力、侧压力系数进行反演分析,提出深埋与浅埋隧道的水土压力取值方法。文献[3]基于盾构管片内力现场实测值,采用正交试验设计分析方法,反演分析黄土地层中管片衬砌结构设计荷载的合理计算参数,降低了数值模拟计算次数,并验证了所提方法的合理性。

上述研究主要集中于对围岩参数、水土计算高度的反演,针对盾构穿越上软下硬复合地层的研究较少,其荷载模式尚不明确。本文基于深圳地铁 13 号线留仙洞站—百旺港大站(以下简称“留百区间”)上软下硬区段的管片内力实测数据与水土压力现场测试数据,以控制荷载大小的力学参数作为反演参数,通过 QPSO(量子粒子群)算法反演计算参数,比较分析反演荷载与实测荷载的精确程度,提出符合本工程的荷载模型取值。本文研究可为其他类似工程提供经验与借鉴。

1 工程概况

深圳地铁 13 号线留百区间全长 4 610 m,区间场地内发育的岩土层主要为:第四系全新统人工填土 Q_4^m (素填土为主)、硬塑砂质黏性土、全风化混合花岗岩、强风化混合花岗岩、中风化混合花岗岩、微风化混合花岗岩。各地层物理力学参数如表 1 所示。

表 1 各地层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of each stratum layer

名称	重度/ (kN/m^3)	内摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力/ kPa	侧压力 系数
素填土	16.7	8.0	12	0.48
硬塑砂质黏性土	18.6	18.5	27	0.40
全风化混合花岗岩	18.5	27.0	18	0.37
强风化混合花岗岩	19.3	27.0	18	0.35
中风化混合花岗岩	25.0	58.0	—	0.23
微风化混合花岗岩	27.0	68.0	—	0.20

依据隧址区地质资料、水文地质条件及地铁盾构隧道的施工进度,选取留仙洞站中间风井区左线里程桩号 ZDK10+580.935(335 环) 断面进行试验研究。该断面隧道顶部埋深约为 39.8 m,水位埋深为 6.1 m,洞身穿越上软下硬地层,隧道上部 3.0 m

处于强风化土状混合花岗岩中,下部 3.7 m 处于中风化与微风化混合花岗岩中,岩层性质差异大。测试断面地质剖面示意图如图 1 所示。

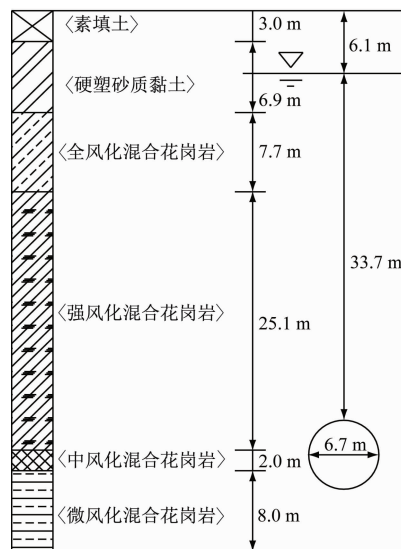


图 1 测试断面地质剖面示意图

Fig. 1 Diagram of test section geological profile

结构现场试验均采用钢弦式传感器,对该断面分别进行管片拼装、脱环、同步注浆等过程时的管片衬砌外部水土压力、管片轴力和管片弯矩进行监测。通过振弦频率仪采集量测数据,管片测点布置示意图如图 2 所示,其中,土压力盒与水压力计的位置相同。管片所受内力需要进一步换算可得,在进行内力换算时,假设:① 盾构管片为线弹性材料;② 盾构管片受力形式处于平面应变受力状态;③ 管片受力截面满足材料力学平截面假定;④ 管片内钢筋与混凝土处于变形协调关系,钢筋不发生滑移。

根据以上假设,可由混凝土应变计测得管片内弧面钢筋应变 ε_1 和外弧面钢筋应变 ε_2 。根据叠加原理,管片实际的应变等效为纯轴心受压(拉)与纯弯应变组成,则纯压(拉)和纯弯作用下产生的钢筋应变 ε_N 和 ε_M ,与 ε_1 、 ε_2 的关系式为:

$$\varepsilon_N = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (1)$$

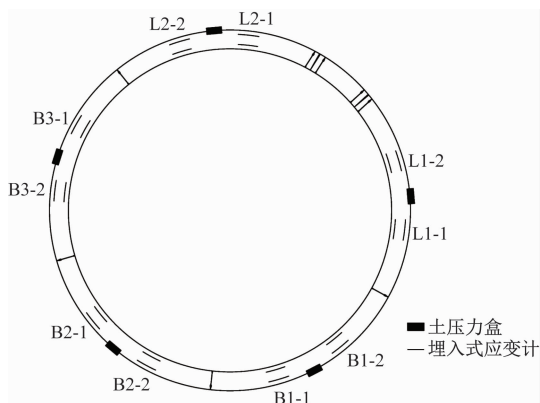
$$\varepsilon_M = \frac{h}{2h_0}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (2)$$

式中:

h ——管片厚度,单位 m;

h_0 ——内、外弧钢筋形心间距离,单位 m。

通过式(1)和式(2)计算获得轴向应变与纯弯应变后,管片所受的轴力 N 与弯矩 M 可以表示为:



注:L1-1 表示 1 号邻接块的 1 号测点;B1-1 表示 1 号标准块的 1 号测点;余类同。

图 2 管片测点布置示意图

Fig. 2 Layout diagram of segment measuring points

$$N = \varepsilon_N EA \quad (3)$$

$$M = \frac{2\varepsilon_M EI_z}{h} \quad (4)$$

式中:

E ——管片弹性模量,单位 MPa;

A ——管片横截面积,单位 m^2 ;

I_z ——管片横截面对 z 轴的惯性矩,单位 m^4 。

2 荷载反演分析

本文基于稳定阶段下的衬砌结构内力实测值,结合水土压力,以荷载曲线控制点作为反演参数的反演模型和管片内力正演计算模型。基于管片内力计算值与实测值的相对误差评价计算结果,将 QPSO 算法作为优化方法,对目标函数的相关参数进行迭代优化,获得反演参数的最优解,即与实际结果最为吻合的荷载值。

2.1 荷载反演参数

基于文献[4]的复合地层荷载计算公式,假设上部软弱地层荷载为梯形荷载,下部坚硬岩层按均布力简化。对于隧道底部地基反力,底部坚硬围岩强度能承受因两侧竖向压力产生的侧向力,故仅考虑围岩的被动抗力,水压力按照径向施加。

荷载计算式如下:

$$\begin{cases} p_1 = p_s \\ q_1 = \lambda_1 p_s \\ q_2 = \lambda_1 (p_s + \gamma'_1 h_1) \\ q_3 = \lambda_2 (p_s + \gamma'_1 h_1 + \gamma'_2 h_2) \\ W_1 = p_w \\ W_2 = p_w + \gamma_w D \end{cases} \quad (5)$$

式中:

p_s ——拱顶垂直土压力;

p_w ——水压力;

λ_1, λ_2 ——上层软弱岩层侧压力系数、下层坚硬岩层侧压力系数;

D ——隧道开挖直径;

γ'_1, γ'_2 ——隧道上、下层围岩的浮重度;

γ_w ——水的重度;

h_1 ——上层软弱岩层在隧道直径范围内的高度;

h_2 ——下层坚硬岩层在隧道直径范围内的高度。

复合地层荷载模式示意图如图 3 所示。由于监测过程中,衬砌结构所承受的水压力近似等于静水压力值,因此选取 p_s 为基本待反演参数,为了描述上、下层岩体荷载的差异情况,同时考虑地勘报告提供的岩土参数建议取值与实际情况的差异,选取 λ_1, λ_2 为待反演参数,以提高反演模型的准确性。

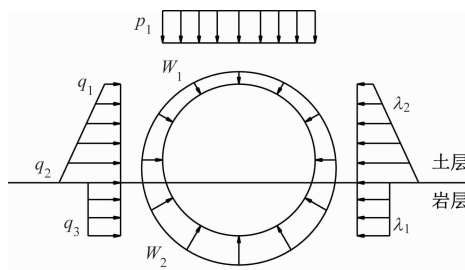


图 3 复合地层荷载模式示意图

Fig. 3 Diagram of composite stratum load mode

2.2 正演模型

采用 Abaqus 有限元软件进行建模计算。采用 S4R 单元模拟管片衬砌,管片重度取为 25 kN/m^3 ,弹性模量取为 34.5 GPa ,泊松比为 0.2 。采用 Connector 单元模拟管片接头,根据文献[5]对接头参数的研究结果,同时结合本工程实际情况,接头弹簧基本参数如表 2 所示。采用互相作用模组中的 Link 单元模拟地层弹簧,上层土体弹簧刚度为 80 MPa/m ,下层土体弹簧刚度为 600 MPa/m 。本文共模拟目标环及其前、后环共计 3 环管片,管片计算模型如图 4 所示。采用压强荷载模拟水压力,稳定段静水压力取为 337 kPa ,采用表面荷载模拟土压力,其表达式采用解析场表示,建立荷载与参数变量 $p_s, \lambda_1, \lambda_2$ 之间的关系。

2.3 反演分析

目前,我国对盾构隧道荷载模式反演分析计算

表 2 接头弹簧基本参数

Tab. 2 Basic parameters of joint spring

项目	参数	取值
环内弹簧刚度/(kN/m)	轴向压缩刚度	2.0×10^{10}
	径向剪切刚度	2.0×10^{10}
	轴向剪切刚度	2.0×10^{10}
	正向转动刚度	4.0×10^5
	负向转动刚度	2.4×10^5
环间弹簧刚度/(kN/m)	轴向压缩刚度	4.0×10^5
	径向剪切刚度	6.0×10^4
	轴向剪切刚度	2.0×10^{10}
	正向转动刚度	—
	负向转动刚度	—

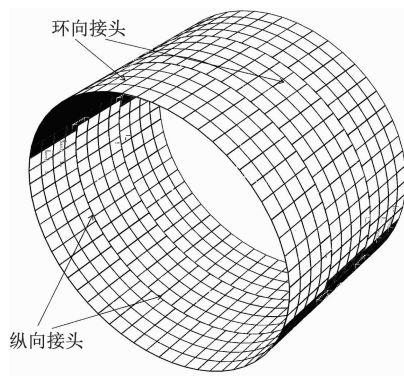


图 4 管片计算模型

Fig. 4 Segment calculation model

普遍采用的是最优化方法,即计算 1 组最优的待反演参数,在这组参数下,通过有限元计算得到的结构内力或位移值与实测值最吻合。本文采用 ε 约束法(ε 为约束范围,用于控制目标函数的权重,将多目标优化问题转化为单目标优化问题),由于衬砌结构配筋受弯矩影响较大,且在反演试算中出现了轴力拟合优于弯矩拟合的情况,因此将弯矩损失函数作为参考目标,轴力损失函数限制为不大于 ε 的约束,则最终的目标函数为:

$$\begin{cases} \min J_M(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - M_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n M_i^{*2}} \\ J_N(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - N_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n N_i^{*2}} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

式中:

X ——荷载反演参数向量, $X = [p_s \lambda_1 \lambda_2]$;

n ——管片结构内力监测点数量;

$J_N(\cdot)$ 、 $J_M(\cdot)$ ——轴力和弯矩的目标函数;

N_i 、 N_i^* ——第 i 个监测点轴力的计算值与实测值;

M_i 、 M_i^* ——第 i 个监测点弯矩的计算值与实测值。

根据反演试算,此处 ε 取 0.10。

目标函数求解结果示意图如图 5 所示。对求解合适的荷载参数直接进行多目标优化,将得到一系列的 Pareto 最优解集,而实际工程中仅需一个确切的值,需要再对 Pareto 最优解集中的解进行筛选,过程较为麻烦。考虑到衬砌结构配筋受弯矩影响较大,本文设置了一条 $J_N(X) = \varepsilon$ 的虚线作为分界线,在分界线左侧为轴力拟合满足工程需要的解集,此时将满足 $J_M(X)$ 最小的解作为最优荷载参数(见图 5 点 B)。

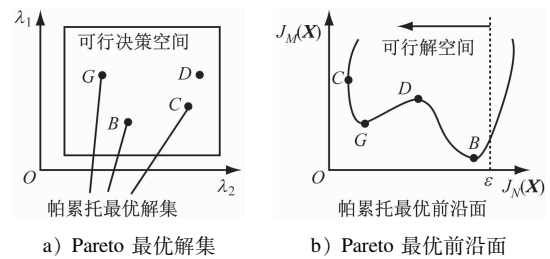


图 5 目标函数求解结果示意图

Fig. 5 Diagram of objective function solution results

在梁-弹簧模型中,土压力荷载应大于 0,因此土压力荷载下限值为 0,为了保证反演结果的合理性,规定土压力荷载的上限值为全土柱压力。对于土体侧压力系数,通常情况下,地勘报告建议取值与实际值误差不超过 20%。因此,本文待反演参数的取值范围可以表示为:

$$\begin{cases} 0 \leq p_s \leq p_s^* \\ 0.8\lambda_1^* \leq \lambda_1 \leq 1.2\lambda_1^* \\ 0.8\lambda_2^* \leq \lambda_2 \leq 1.2\lambda_2^* \end{cases}$$

其中: p_s^* 为拱顶理论全土柱压力; λ_1^* 、 λ_2^* 为上层软弱地层侧压力系数和下层坚硬岩层侧压力系数理论值。

为了找出一组最优荷载参数,使得上述目标函数最小,通常采用数值解法,其计算步骤为:从一个初始参数点开始向周围进行迭代搜索,直至找出模型最优解。但传统的数值解法容易陷入局部最优

的情况,难以获得全局最优解。而现代优化算法在非线形最优化问题上获得了广泛应用,并取得较好的结果。因此,本文采用现代优化算法中 QPSO 算法搜索参数空间,以寻求最优的荷载参数。

2.4 QPSO 算法

QPSO 算法是由文献[6]提出的具有量子行为的粒子群优化算法。该算法不同于普通粒子群算法,其粒子的更新与之前的运动形式没有关系,随机性较强,不容易出现陷入局部最优解的情况。QPSO 算法具有控制参数更少、收敛速度快、寻优能力强等优点。

在整个参数空间中,每个粒子的位置对应参数空间中的一个点,即代表一组荷载取值。在迭代更新过程中,每个粒子遇到使目标函数最优的点为当前迭代粒子的最优解,记为 T_{pBest} 。整个粒子种群在更新过程中的最优点为当前迭代种群的最优解,记为 T_{gBest} 。平均粒子最优解为 T_{pBest} 的平均值,记为 T_{mBest} ,可以表示为:

$$T_{mBest} = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^Q T_{pBest,j} \quad (7)$$

式中:

Q ——粒子群大小;

$T_{pBest,j}$ ——当前迭代中第 j 个粒子的最优解。

QPSO 算法中,不同粒子位置的更新可以表示为:

$$\begin{cases} P_j(t) = \varphi T_{pBest,j}(t) + (1 - \varphi) T_{gBest,j}(t) \\ x_j(t+1) = P_j(t) \pm \alpha |T_{mBest}(t) - x_j(t)| \ln(1/u) \end{cases} \quad (8)$$

式中:

t ——当前迭代步数;

P_j ——第 j 个粒子的位置更新值;

x_j ——第 j 个粒子的位置;

φ, u ——在 $(0,1)$ 区间内的均匀分布函数;

α ——创新系数。

需要注意的是, $\alpha |T_{mBest}(t) - x_j(t)| \ln(1/u)$ 在迭代过程中取正和取负的概率为 0.5。通过不停地迭代计算粒子位置,最终能够获得参数空间的最优解,并输出。

反演过程的具体步骤为:

步骤 1 在 Abaqus 软件中建立正演模型;

步骤 2 通过 Python 程序随机生成粒子群位置,并输入监测断面的内力信息,构建相应的适应

度函数;

步骤 3 根据粒子位置生成相应的荷载函数,代入 Abaqus 软件的正演模型中进行计算;提取计算结果中相应切面的轴力与弯矩,输出至 Python 程序;

步骤 4 将每个粒子反馈的内力信息代入适应度函数计算适应度,产生当前迭代步中的 T_{pBest} 、 T_{gBest} 、 T_{mBest} ,并更新粒子位置;

步骤 5 判断是否达到迭代上限,或适应度长时间未变化;若满足上述条件,则退出程序,输出 T_{gBest} ,及其对应的管片内力值;否则返回步骤 3。

3 结果分析

设置粒子种群规模为 10,创新系数为 0.4,对上软下硬地层的荷载参数进行寻优。目标函数值随迭代次数的变化情况如图 6 所示。在迭代过程中,由 QPSO 算法反演的轴力计算值与实测值拟合较好,而弯矩计算值与实测值拟合较差;在迭代 25 次后,荷载反演目标函数计算值完全由弯矩误差决定。在迭代初期,目标函数值迅速下降,当迭代次数约为 100 次时,粒子群开始趋于稳定,并在最优适应度附近轻微变化。

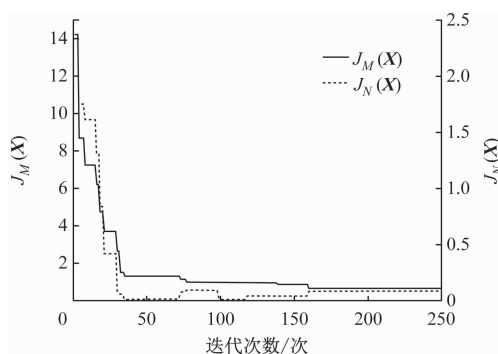


图 6 目标函数值随迭代次数的变化情况

Fig. 6 Variation of objective function value with the number of iterations

由 QPSO 算法荷载反演得到的最优荷载参数所对应的轴力和弯矩目标函数分别约为 0.086 5 和 0.668 7,最优 QPSO 对应的竖向土压力为 128.47 kPa,下层坚硬围岩侧压力系数为 0.178,上层软弱围岩侧压力系数为 0.382。

对比不同荷载计算方法的荷载基本参数,结果如表 3 所示。其中:现场实测的土压力由土压力盒测量获得,侧压力系数采用地勘报告中的数值;TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》的土压力根据塌

表 3 不同荷载计算方法的荷载基本参数

Tab.3 Basic load parameters by different load calculation methods

荷载计算方法	p_s/kPa	λ_1	λ_2
现场实测	113.00	0.350	0.210
《铁路隧道设计规范》中方法	168.48	0.250	0.150
反演分析	128.74	0.382	0.178

落拱高度计算获得,侧压力系数根据围岩等级确定。以现场实测值为基础,土压力反演值比实测值高 13.9%,而 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》的土压力理论值比实测值高 49.1%。由此可知,针对盾构隧道穿越上软下硬复合地层,采用塌落拱高度计算上覆土体荷载会导致荷载值偏大,结构内力趋于不均匀,在设计上是偏于安全的。此

外,上层软弱岩层侧压力系数反演值大于实测值,下层坚硬岩层侧压力系数反演值小于实测值。根据 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》中的侧压力系数,两侧围岩侧压力系数均小于实测值。

基于正演模型,采用不同荷载计算方法的轴力及弯矩分布示意图,如图 7 所示。内力反演值在监测点位置与实测值的差距较小;由 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》理论计算得到的轴力与实测值有显著差异。在上部软弱岩层中,轴力设计值的变化规律基本与实测值类似;在下部硬岩段,轴力设计值均大于轴力实测值。由 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》理论计算得到的弯矩分布与实测值差异尤其明显。

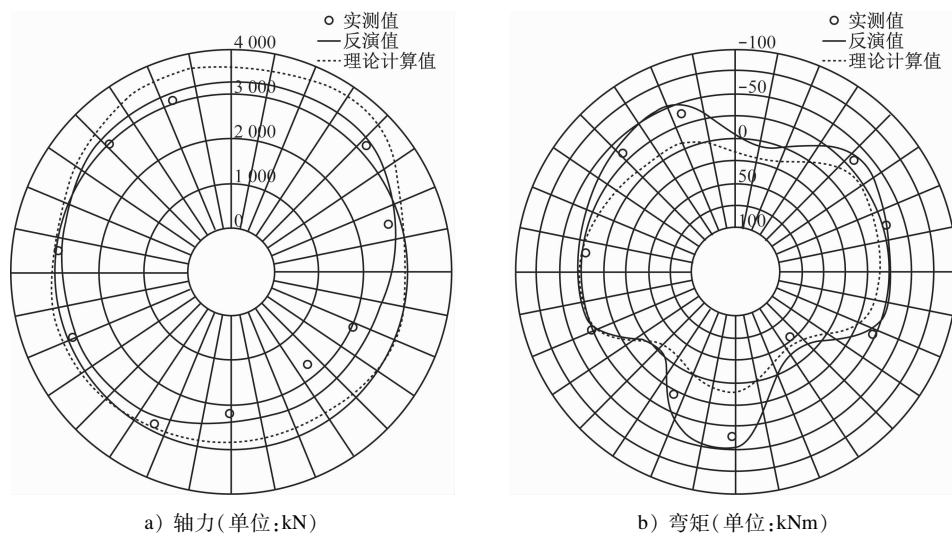


图 7 采用不同荷载计算方法的结构轴力及弯矩分布示意图

Fig.7 Diagram of structural axial force and bending moment distribution with different load calculation methods

4 结语

本文以深圳地铁 13 号线留百区间盾构隧道稳定状态下的管片结构弯矩和轴力现场测试值为例,基于 QPSO 算法,结合 Abaqus 有限元软件,在量测管片轴力与弯矩的基础上,提出了确定盾构衬砌管片受力设计模型和压力荷载分布模式的反演分析方法。主要获得以下结论:

1) 当盾构隧道穿越上软下硬复合地层时,可选取上覆土压力和地层侧压力系数作为反演参数, QPSO 算法能够在 100 次迭代步内获得较优解。

2) 反演过程中,轴力目标函数普遍小于弯矩目标函数,这主要是由于弯矩自身数量级小于轴力数量级。随着荷载参数的变化,有限元计算模型中的

弯矩变化幅度大于轴力变化幅度。

3) 当盾构隧道穿越上软下硬复合地层时,上覆土压力可根据塌落拱高度计算,此时上覆土压力大于实测值与反演值,取值偏于安全。软岩段侧压力系数可根据地勘报告选取,而硬岩段侧压力系数应对地勘值进行适当的放大。

参考文献

- [1] 邓之友. 浅埋偏压隧道结构荷载反分析研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
DENG Zhiyou. Back analysis of structural load of shallow-buried unsymmetrical pressure tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2012.

(下转第 67 页)

二安全主机的安全性减少幅度小。

4 结语

本文提出一种融合 Markov 法与 GO 法的安全主机安全性计算方法,以安全主机各组成模块为研究对象,采用 Markov 模型对单模块进行安全性时变分析,采用 GO 模型对安全主机系统整体进行安全性时变分析,避免了 Markov 模型在系统整体建模时模型复杂、转移状态复杂、计算量大等缺点,克服了 GO 模型中单模块状态变化考虑欠缺的不足。

参考文献

- [1] 申竹林,代飞. 轨道交通安全计算机可靠性分析[J]. 机车电传动, 2021(1): 151.
SHEN Zhulin, DAI Fei. Reliability analysis of vital computer in railway[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(1): 151.
- [2] 施玲. 城轨车辆制动系统故障及可靠性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
SHI Ling. Fault and reliability analysis of braking system of urban rail vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [3] 董皓,王何斐,雷佳祺. 基于马尔可夫链的旅游轨道交通客流分配模型[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 38.
DONG Hao, WANG Hefei, LEI Jiaqi. Passenger flow assignment model of tourist rail transit based on Markov chain[J]. Urban

Mass Transit, 2022, 25(9): 38.

- [4] 沈祖培,高佳. GO 法原理和改进的定量分析方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(6): 16.
SHEN Zupei, GAO Jia. Principle of GO method and improved quantitative analysis method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(6): 16.
- [5] 赵云云,李海燕,靳守杰,等. 基于 GO 法的广州某地铁同相牵引供电系统可靠性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 162.
ZHAO Yunyun, LI Haiyan, JIN Shoujie, et al. Reliability analysis of cophase traction power supply system of Guangzhou metro based on GO method[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 162.
- [6] 赵志博,多依丽,王博,等. 基于 GO 法与 DBN 的冗余系统可靠性分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(5): 66.
ZHAO Zhibo, DUO Yili, WANG Bo, et al. Reliability analysis of redundant systems based on GO method and DBN[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2020, 40(5): 66.

· 收稿日期:2022-10-03 修回日期:2023-02-21 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-03 Revised:2023-02-21 Published:2024-12-10
· 通信作者:潘洪亮,副研究员,12139@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 60 页)

- [2] 李策,王士民,王承震,等. 基于实测内力的大直径水下盾构隧道荷载反演分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 103.
LI Ce, WANG Shimin, WANG Chengzhen, et al. Back analysis of load of large underwater shield tunnel based on measured internal force[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 103.
- [3] 周济民,何川,方勇,等. 黄土地层盾构隧道受力监测与荷载作用模式的反演分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 165.
ZHOU Jimin, HE Chuan, FANG Yong, et al. Mechanical property testing and back analysis of load models of metro shield tunnel lining in loess strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 165.
- [4] 肖明清,封坤,李策,等. 复合地层盾构隧道围岩压力计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1836.
XIAO Mingqing, FENG Kun, LI Ce, et al. A method for calculating the surrounding rock pressure of shield tunnels in compound strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

2019, 38(9): 1836.

- [5] 石少刚. 施工荷载下盾构隧道管片力学响应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
SHI Shaogang. Mechanical response analysis of shield tunnel segment under construction load[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [6] 孙俊. 量子行为粒子群优化算法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
SUN Jun. Research on quantum behavior particle swarm optimization algorithm[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.

· 收稿日期:2022-10-23 修回日期:2023-05-02 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-23 Revised:2023-05-02 Published:2024-12-10
· 第一作者:王文和,高级工程师,wangwenhe@shenzhenmc.com
通信作者:徐一帆,助理工程师,swjtuxyf@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license