

管幕—箱涵顶进对地表变形的影响分析

Analysis of Influence of Curtain-box Culvert Jacking on Surface Deformation

袁齐虎¹, 张坤勇^{2,3}, 张兴其⁴, 张梦³, 沈小锐³

(1. 中铁四局集团第四工程有限公司, 安徽 合肥 230041; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 3. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024; 4. 合肥市市政设计研究总院有限公司, 安徽 合肥 230041)

摘要: 在城市交通快速发展的情况下, 大断面浅埋式立交通道已日益增多, 采用管幕箱涵法施工有着独特的优势。以某管幕箱涵工程为背景, 基于顶推力计算结果, 选取关键监测断面, 针对关键施工节点, 建立有限元模型, 对现有顶进方案进行模拟, 分析管幕箱涵顶进引起的地表沉降变形。对修正剑桥模型中离散较大的参数进行参数敏感性分析, 得到对土体变形影响较大的参数作为待反演参数。设计 25 组正交试验土体参数, 并代入二维模型进行计算, 构建训练数据。根据地表沉降监测数据, 利用 ISSA-ELM 网络模型反演得到五个工况下的土体参数, 并代入有限元模型中进行重新计算, 实现对后续工况的变形预测。结果表明: 本文方法符合工程实际规律, 对类似工程有较好的参考价值; 基于智能算法提出参数反演和变形预测方法得到的沉降最大值和最大值所处位置均比初始参数值结果更接近监测值, 说明进行参数反演具有实际意义和使用价值。

关键词: 管幕箱涵; 顶推力; 有限元; 敏感性分析; 变形预测

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0061-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.013

YUAN Qihu¹, ZHANG Kunyong^{2,3}, ZHANG Xingqi⁴, ZHANG Meng³, SHEN Xiaorui³

(1. The Fourth Engineering Co., LTD. Of Ctce Group, Hefei 230041, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Dam Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 4. Hefei Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Hefei 230041, China)

Abstract: Under the condition of the rapid development of urban traffic, the large section shallow buried underpass has been increasing day by day, the use of tube curtain box culvert construction has a unique advantage. In this paper, a curtain box culvert project is taken as the background, key monitoring sections are selected based on the jacking thrust calculation results, and a finite element model is established for key construction nodes to simulate the existing jacking scheme and analyze the surface settlement deformation caused by the jacking of curtain box culverts. Based on the sensitivity analysis of the parameters with large dispersion in the modified Cambridge model, the parameters with large influence on soil deformation are obtained as

作者简介: 袁齐虎 (1988—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地下隧道顶进施工研究。

收稿日期: 2023-04-19

岩土力学

the parameters to be inverted. 25 groups of orthogonal test soil parameters were designed and substituted into a two-dimensional model to construct the training data. According to the surface settlement monitoring data, soil parameters under five working conditions were obtained by using ISA-ELM network model inversion, and then recalculated into the finite element model to achieve deformation prediction under subsequent working conditions. The results show that the calculation method proposed in this paper is in line with the actual law of the project, and has a good reference value for similar projects; the locations of the maximum settlement and maximum value obtained by the proposed parameter inversion and deformation prediction method based on intelligent algorithm are closer to the monitoring value than the initial parameter value, which indicates that the parameter inversion has practical significance and value of use.

Keywords: curtain box culvert; top thrust; finite element; sensitivity analysis; deformation prediction

0 引言

在城市道路建设中,为不影响现有道路运行,出现了一种新的施工方法——管幕箱涵工法^[1-4],该工法凭借不影响地面交通、噪音小以及施工扰动小等优点,逐渐成为一种较为成熟的施工方法。胡瑞灵^[5]针对某立交工程,研究了箱涵顶进施工中的关键工序,提出有指导意义的工艺和措施;王滕等^[6]依托管幕-箱涵顶进施工建立数值模型,提出针对涵洞斜穿施工的地层沉降控制措施;王全峰等^[7]依托南水北调某工程穿越高速公路,介绍了管棚-箱涵法有限元模拟方法;周广友^[8]等采用 FLAC 3D 数值软件对某箱涵工程施工全过程进行了数值模拟,总结分析了路面沉降规律。

目前在顶管工程中随着多孔、大跨、长距离箱涵的大量使用,顶推力设计值对工程其他参数确定和经济成本影响越来越大。当顶进距离较长时,主顶油缸的顶力可能储备不充分,需要采取注入减阻泥浆、设置中继间等措施减小顶进推力,以保证工程安全和施工进度。顶推力是顶管工程施工过程中最关键的参数,施工过程中需及时准确了解顶推力的变化规律,对长距离大断面管幕箱涵顶进工程的力学特性分析非常重要^[9],现阶段对于管幕箱涵工程中考虑不同地质条件不同减阻效果顶推力计算相对较少。赵旭峰等^[10]开展考虑顶管工程现场实测数据的泥岩地质条件下顶推力的理论计算,得出该地质条件下顶推力经验计算公式;顾翠莲等^[11]分析了管幕箱涵顶进中的阻力来源及计算方法,并根据不同的工况提出对应的计算公式。现有合肥膨胀土地区大断面管幕箱涵顶推力公式主要结合工程经验计算,导致计算结果与实际监测值差距较大,因此对

膨胀土地区大断面管幕箱涵顶进过程中的顶推力计算需要开展深入研究。

实际工程项目地质情况较为复杂,需要针对不同土层性质选取适合的本构模型及其参数,以保证有限元模拟结果的准确性。同时有限元模拟中很难完全真实反映实际施工情况,需要进行一定假设,去除次要影响因素。可以通过对离散程度较高的土体参数进行参数敏感性分析,选取合适的参数,开展后续的反演工作。张亚西^[12]利用 BP 神经网络进行最优值的选取,然后基于遗传神经网络中,建立了待反演参数和结构位移之间的模型,可用于后续位移的预测;李小彤等^[13]综合应用黄金分割法和数值仿真方法提出基于位移反分析理论的矩形顶管施工地表预测方法;李振涛等^[14]借助改进的遗传优化的神经网络算法得到较为准确的土体参数,并将其代入数值模型中进行计算验证;刘春等^[15]结合数值模拟构建了 LM-BP 位移反分析模型,实现了围岩关键物理力学参数的准确反演;凌同华等^[16]对粒子群算法进行改进并结合 BP 神经网络提出一种智能位移反分析方法,可实现隧道围岩力学参数的准确反演。因此需要开展适用于大断面管幕箱涵顶进施工的参数反演并提出变形控制方法。

依托合肥某大断面管幕箱涵顶进工程,建立箱涵顶推力计算公式,并将顶推力计算值与实测值进行对比,验证所提顶推力计算公式的合理性。针对本构模型进行参数敏感性分析,确定离散程度较大的待反演参数,并开展正交试验构建学习数据。基于智能算法反演得到土层参数,并将反演参数用于有限元模型进行正演,验证参数反演可提高计算结果的准确性,从而提出参数反演和变形预测方法。

1 工程概况

工程位于合肥市，隧道暗埋下穿骆岗机场主跑道段采用管幕箱涵法进行施工，穿越机场跑道下实际顶进长度为101.1 m，分3节，首节27.8 m，中节54 m，尾节19.3 m，依次顶进，直至贯通。路线平面位于直线段，由南向北下坡，结构纵坡为0.5%，隧道顶最小覆土深度5.1 m，最大6.3 m。

工程大断面隧道拟从北工作井向南接收井顶进。两侧洞口管幕圈梁宽度是1.25 m，高度是2 m，隧道涵段需在井内各预留0.5 m，穿越段隧道外包尺寸为29.5 m×9 m。水平钢管幕将内外水土隔离，同排钢管左右通过雌雄锁口相连接，前后焊接相连。然后在钢管幕的围护下顶进隧道，边开挖边顶进，最终形成大断面的地下空间，实现非开挖穿越。管幕箱涵断面图如图1所示。

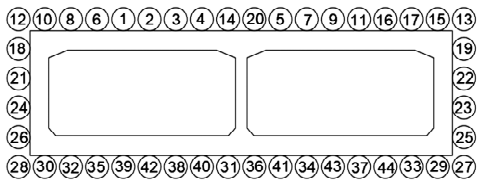
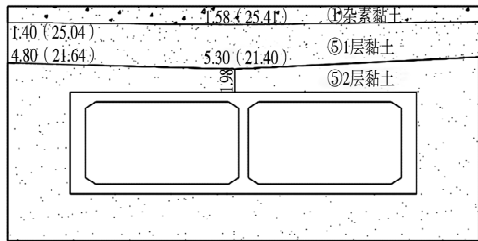


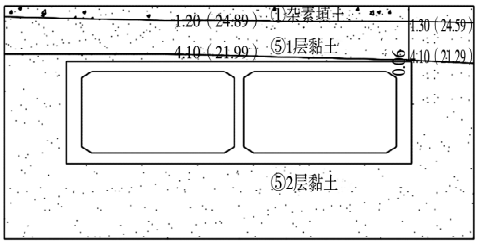
图1 管幕箱涵断面图
Fig. 1 Section of pipe curtain box culvert

2 工程地质条件

工程沿线地形尚平缓，局部因沟、塘高及填土区分布，高差较大，总体为北高南低，场地地面高程为13.70~27.80 m，最大高差约14.1 m。主要由填土、第四纪冲洪积黏性土、粉土构成上覆主要地层，下伏白垩系（K）棕红、紫红色泥质砂岩风化带，场地覆盖层厚度（至岩层中风化面）30~52 m左右。场地地下水类型可分为上层滞水和承压水。管幕穿越起点和终点的地质情况如图2所示。



(a) 起点



(b) 终点

图2 管幕暗挖起点终点地质情况
Fig. 2 The starting point and the end point of the pipe curtain crossing

3 有限元计算模型

3.1 计算设置

计算模型的侧面边界施加X向位移约束。底面边界施加X、Y向位移约束。上部边界为自由边界，不施加约束。地基初始应力场由自重确定，初始渗流场由地下水位确定。有限元分析典型断面选取的工程地质剖面距隧道管幕施工起点的距离为68 m，该断面为管幕箱涵顶进施工全过程中地表沉降最大处。计算过程中，填土1、全风化土4、风化岩5共3个土层采用修正摩尔－库仑模型。黏土2和黏土3共2个土层采用修正剑桥模型，混凝土和钢采用弹性模型。具体参数见表1~3。

表1 各土层修正剑桥模型参数表 Table 1 Parameters of the modified Cambridge model for each soil layer									
序号	名称	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	K_0	ν	e_0	OCR	λ	κ	M
1	黏土2	19.8	0.50	0.33	0.73	1	0.17	0.02	1.37
2	黏土3	20.0	0.44	0.31	0.70	1	0.15	0.05	1.20

表2 各土层修正摩尔－库仑模型参数表 Table 2 Parameters of modified Mohr－Coulomb model for each soil layer									
序号	名称	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	ν	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e_0	c/kPa	$\varphi/^\circ$		
1	填土1	19.0	0.35	19.6	0.907	10.0	8.0		
2	全风化土4	21.3	0.28	19.2	0.692	29.7	15.9		
3	风化岩5	23.0	0.23	23.4	0.628	12.0	48.0		

表3 结构材料参数 Table 3 Structural material parameters			
结构	容重/ (kN/m^3)	弹性模量/GPa	泊松比
箱涵	25.0	34.5	0.167
钢管	78.5	210.0	0.300

3.2 顶进阻力分析

在假设箱涵和钢管管道与周围土体完全接触的情况下，管幕箱涵推进过程中的顶进力等于管幕箱涵所受摩阻力，其由两部分组成：一部分是迎面阻

岩土力学

力,由管幕箱涵外壁阻力和支撑掌子面的前方顶力组成;另一部分是管幕箱涵外壁与周围土体之间由于管节运动产生的动摩阻力,主要是由管幕箱涵周围土体和箱涵自重与周围土层产生的摩擦阻力。

箱涵总顶力主要由迎面阻力和总摩阻力组成,并按照下式计算:

$$F = P_y + F_f \quad (1)$$

式中: P_y 为箱涵机的迎面阻力, kN; F_f 为矩形箱涵总摩阻力, kN。

由箱涵顶推力计算公式可知,箱涵顶进过程中的顶推力需要克服掌子面的迎面阻力和箱涵周围的摩擦力,迎面阻力主要由对应顶进深度下的土压力引起,如果土层分布确定,顶深一定时,顶管机的迎面阻力通常是一个定值,目前已有相关规范对其作出规定。故本文假定迎面阻力为定值。

(1) 迎面阻力 P_y

$$P_y = \gamma H_0 K_a B_1 H_1 \quad (2)$$

式中: γ 为土的重度, kN/m³; H_0 为箱涵顶至原状土地面覆土层的厚度, m; K_a 为主动土压力系数; H_1 为矩形管外边高, m; B_1 为矩形管外边宽, m。工程各参数取值如表 1~3。根据式 (1) 计算得到迎面阻力 $P_y = 15\,267.6$ kN。

$$\sigma_z = \gamma z K_0 \quad (3)$$

式中: σ_z 为土层自重应力; z 为土层厚度; K_0 为静止土压力系数。

根据式 (1) 计算各层土的自重应力, ⑤杂素填土土层底部自重应力为 18.5 kPa; ⑤1 层黏土土层顶部自重应力为 14.3 kPa; ⑤1 层黏土土层底部自重应力为 30.1 kPa。

$$E_0 = \frac{1}{2} K_0 \gamma H^2 \quad (4)$$

根据式 (3)、式 (4) 计算前两种土层总土压力为 58.3 kN/m; 再分别计算箱涵顶进 20 m 与箱涵完全顶进两种状态下的上覆土压力: 20 m 长箱涵上覆土压力 1 167.1 kN, 101.1 m 长箱涵上覆土压力为 5 825.4 kN。

(2) 总摩阻力 F_f

箱涵的断面面积为 156.4 m², 总顶进长度为 101.1 m, 总自重为 395 301 kN, 顶进 20 m 时的自重为 78 200 kN; 单根钢管截面积为 0.08 m², 管节之间

为焊接链接, 钢管总长度为 102 m, 箱涵顶部钢管根数为 16 根, Q235 钢容重为 78.5 kN/m³, 总自重为 10 249 kN, 顶进 20 m 时自重为 2 009.6 kN。

根据摩擦力计算公式:

$$F_f = \mu F_p \quad (5)$$

式中: μ 为摩擦力系数 (箱涵与顶管之间的摩擦系数取 0.4); F_p 为接触面压力。

根据式 (4) 计算摩阻力:

①箱涵顶进 20m: 箱涵顶部摩阻力为 1 270.1 kN; 箱涵底部摩阻力为 32 550.1 kN; 总摩阻力为 33 820.2 kN; 总顶力为 4 908.8 t。

②箱涵完全顶进: 箱涵顶部摩阻力为 7 757.3 kN; 箱涵底部摩阻力为 164 162.3 kN; 总摩阻力为 171 919.5 kN; 总顶力为 18 718.7 t。

(3) 顶力计算效果分析

根据施工现场反馈的千斤顶总顶力监测结果, 并与理论计算值对比, 结果如图 3 所示。理论计算得到顶进 20 m 的顶力值和完全顶进时最大的顶力值均在实际监测的顶力值范围内, 理论计算的顶力增长趋势与实际监测的顶力增长趋势在顶进里程的前 60 m 段较为贴近。理论计算值在合理范围之内, 本文计算方法对该工程和类似的工程有较好的实际参考价值。

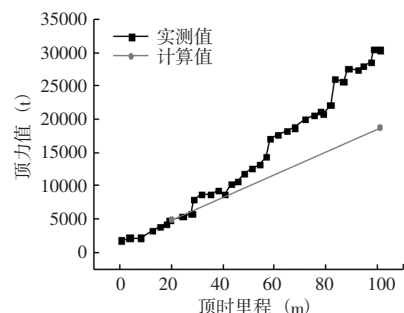


图 3 顶力实测值与理论值对比
Fig. 3 Comparison between measured and theoretical values of jacking force

3.3 模型建立

依据实际施工现场的大小, 并综合管幕箱涵顶进施工对周边环境影响的工程经验, 有限元计算区域取为 130 m × 60 m。对于顶进施工过程中涉及的土体开挖、钢管幕顶进、箱涵顶进的设置进行了管幕箱涵横断面的二维建模。为平衡计算精度和计算资源的矛盾, 地基远处采用较大的网格, 结构及与土

岩土力学

体接触局部范围将网格适度加密。

在实际工程中，土层分布比较复杂，各土层厚度不均匀，埋深不一致，土层界线不明显，即使是同一土层，其性质也不一定相同，因此有必要简化模型土层，有限元模型如图 4 所示。

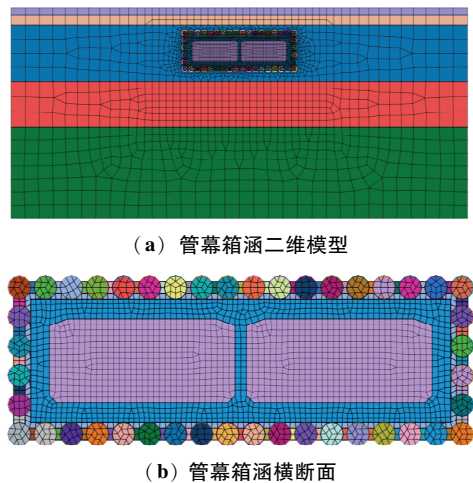


图 4 管幕箱涵横断面有限元模型示意图
Fig. 4 Schematic of finite element model of pipe curtain box culvert cross section

3.4 施工过程模拟

首先建立初始应力场，位移清零，作为开挖前的初始状态；钝化结构物占据土体单元，模拟顶进过程中的土体开挖；激活结构物单元，模拟钢管或箱涵的顶进。钢管按图 1 标注顺序顶进：第一阶段：1→2→3→4→5→6（7）→8（9）→10（11）→12（13）→14（15）→16；第二阶段：17（18）→19→20（21）；第三阶段：22→23→24→25（26）→27（28）；第四阶段：29（30、31）→32（33、34）→38→35（37）→36→39→40（41），实际施工没有顶进 42、43、44 钢管。上述括号表示钢管同时顶进。箱涵沿顶进方向，按超挖 8 m 的形式顶进。

主要对以下 5 个工况进行分析：工况一：对应第 16 根钢管顶进结束；工况二：对应第 21 根钢管顶进结束；工况三：对应第 28 根钢管顶进结束；工况四：对应第 41 根钢管顶进结束；工况五：对应箱涵顶进结束。

4 反演分析

4.1 参数敏感性分析

管幕箱涵工程中，对地表变形的影响因素众多，多种因素共同作用的结果决定系统发展的态势。需

要在众多影响因素中区分主要因素和次要因素。基于实际工程所获取的数据起伏波动频繁，采用数理统计方法难以奏效，而灰色关联分析模型应用面广，且计算量小，使用方便，所以，采用灰色关联模型分析参数敏感性。

二维平面应变的模型大小约为 130 m×60 m，箱涵结构大小为 29.4 m×8.75 m，钢管直径为 1.6 m，采用分步顶进施工工况，依次顶进各钢管、箱涵。模型尺寸示意图如图 5 所示。利用灰色关联分析得到管幕箱涵顶进施工引起地表沉降的多因素的影响程度为 $\kappa > \lambda > e_0 > M > \nu > K_0$ ，限于篇幅，具体过程不作展示。

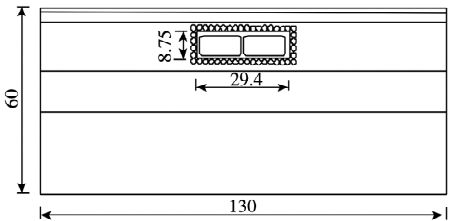


图 5 模型尺寸示意图
Fig. 5 Schematic of model size

4.2 待反演参数的确定

在修正剑桥模型中， λ 、 κ 、 M 三个模型参数对结果影响较大，通过敏感性分析得出初始孔隙比 e_0 对修正剑桥模型的影响也较大。选择管幕箱涵顶进穿越的黏土层作为研究土层，选取土层的超固结线坡度 κ 、初始孔隙比 e_0 、临界状态线比率 M 、正常固结线坡度 λ 四个参数进行反演。

4.3 正交试验

项目顶进工程中，主要针对管幕箱涵顶进穿越的黏土层的 4 个修正剑桥模型参数进行反演，每个参数取 5 个水平，选择 $L_{25}(5^4)$ 设计正交试验。待反演参数基础取值见表 4，将每个参数上下浮动 25%，设置 5 个水平，待反演参数水平见表 5。

表 4 待反演参数基础取值 Table 4 Base values of parameters to be inverted			
e_0	λ	κ	M
0.70	0.15	0.05	1.2

表 5 待反演参数水平 Table 5 Parameter levels to be inverted				
水平	e_0	λ	κ	M
1	0.40	0.075	0.025	0.6
2	0.50	0.113	0.038	0.9
3	0.60	0.150	0.050	1.2
4	0.70	0.188	0.063	1.5
5	0.80	0.225	0.075	1.8

岩土力学

将上述 25 组正交设计试验数据代入有限元模型计算,提取各工况下地表沉降值作为训练数据。对于管幕箱涵顶进穿越黏土层的 4 个修正剑桥模型参数,设计 4 因素 5 水平共 25 组正交试验,并将 25 组土体参数代入二维模型进行计算,提取 5 个工况下地表沉降值,应用有限元模拟地表沉降值、4 个待反演参数、实际监测数据构建训练数据,将前 23 组数据进行训练,后 2 组数据进行测试。

4.4 基于 ISSA - ELM 的参数反演及沉降预测

(1) 反演参数值结果分析

将地表沉降值作为输入数据,4 个修正剑桥模型参数作为输出数据,建立 ISSA - ELM 网络模型^[17-18],根据已经建立的 ISSA - ELM 模型,将 5 个工况下地表沉降的监测值代入模型,得出 5 个工况下黏土的土层参数,见表 6。

表 6 土层参数反演结果
Table 6 Inversion results of soil parameters

工况	e_0	λ	κ	M
工况一	0.676	0.153	0.055	1.175
工况二	0.698	0.162	0.059	1.128
工况三	0.695	0.155	0.054	1.213
工况四	0.718	0.177	0.056	1.181
工况五	0.682	0.164	0.058	1.105

将反演值代入模型进行计算,提取工况五竖向位移分布,如图 6 所示。

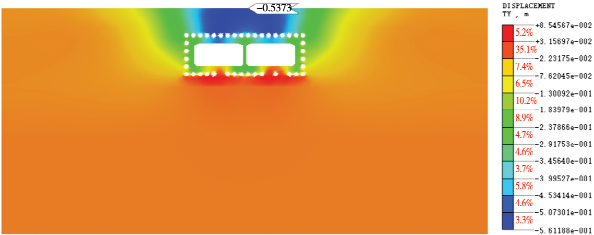


图 6 反演参数计算竖向位移
Fig. 6 Inversion parameters to calculate vertical displacement

管幕箱涵顶进施工结束后,顶进过程中土体的最大沉降约为 54 cm,在箱涵正上方中轴线土体处;顶进过程中土体的最大隆起约为 7 cm,在箱涵左侧洞口底部正下方中轴线处。在顶进过程中,地表最大沉降位于箱涵正上方,地表沉降值随距箱涵正上方中轴线距离的增大而减小。由于下排有 3 根钢管未顶进,加之钢管顶进顺序的影响,箱涵两个洞口与管幕之间的间隙土体处产生了差异沉降,下排管幕未顶进钢管处出现差异隆起现象。

初始参数、反演参数沉降计算值与监测值对比如图 7 所示。在工况五情况下,反演参数所得沉降数值模拟结果比初始参数值的结果更贴近实测值,无论在数值上、最大值出现的位置上以及分布规律上均与监测值更加接近,说明进行参数反演的科学性和正确性。

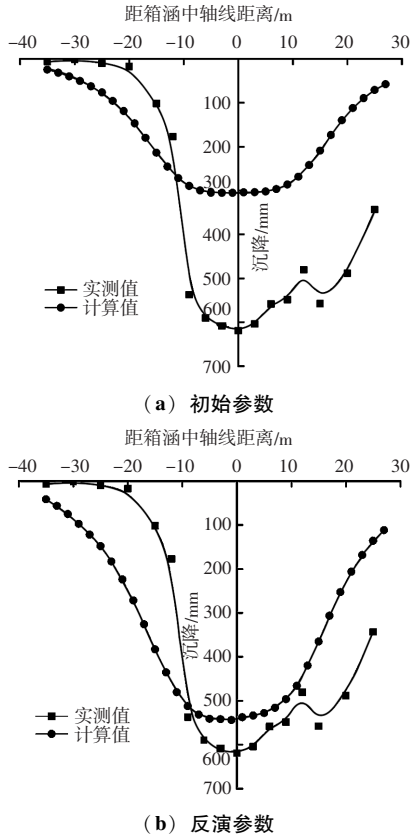


图 7 初始参数、反演参数沉降计算值与监测值对比
Fig. 7 Comparison of calculated and monitored values of initial and inversion parameter settlement

(2) 对后续工况的预测

为了对后续开挖工况进行预测,将上述第一和第五工况下的土层参数值代入箱涵横截面有限元模型中正演,具体如图 8 所示。

将工况一所得反演参数代入模型进行计算,得到工况五地表竖向位移预测值,简称工况一反演分析预测值;将工况五所得反演参数代入模型进行计算,得到工况五地表竖向位移预测值,简称工况五反演分析预测值;将初始参数代入模型计算得到工况五地表竖向位移,简称初始参数计算值;实际施工中,根据监测所得的工况五地表竖向位移值称为监测值,简称工况五地表竖向位移实测值。

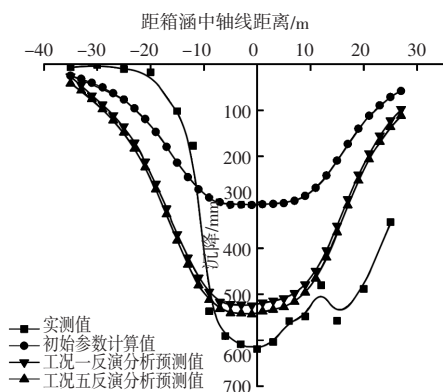


图8 反演参数沉降计算值与监测值对比
Fig. 8 Comparison of calculated and monitored values of inversion parameter settlement

工况一反演分析预测值最大值为 524.55 mm，工况五反演分析预测值最大值为 543.95 mm，初始参数计算值最大值为 305.97 mm；工况五地表竖向位移监测最大值为 619.17 mm。由此可得，工况一反演分析预测值与工况五地表竖向位移监测值的相对误差为 15.3%，工况五反演分析预测值与工况五地表竖向位移监测值的相对误差为 12.1%，初始参数计算值与工况五地表竖向位移监测值的相对误差为 50.1%。

结果表明，所得反演参数相较初始参数有较好的预测效果，后续工况下的反演分析预测值比前面反演分析预测值更接近监测值，说明数据更新能让反演和预测过程更加准确，施工过程要不断进行监测，保证数据的不断更新。

5 结论

土体本构模型的参数对有限元模拟的精确度影响较大，需建立基于现场监测和数值模拟等的参数反演方法。依托某大断面管幕箱涵顶进施工项目，针对本构模型参数开展参数敏感性分析和正交试验，并构建学习数据。通过改进智能算法反演得到各工况下土体参数，并将反演参数代入有限元模型进行正演，实现对后续工况的变形预测。主要结论如下：

(1) 随着顶入里程的增加，理论计算得到的顶力值增长趋势与工程实际的监测值的增长趋势大致一致，说明本文所提计算方法符合工程实际规律，对类似工程有较好的参考价值。

(2) 以地表沉降作为因变量，通过参数敏感性分析，选择黏土的 κ 、 λ 、 e_0 、 M 共 4 个参数作为待反演参数，利用灰色关联分析得到管幕箱涵顶进施工引起地

表沉降的多因素的影响程度为 $\kappa > \lambda > e_0 > M > \nu > K_0$ 。

(3) 初始参数值和反演参数值代入有限元模型计算结果表明，初始参数值的竖向位移云图不合理，反演参数计算得到的沉降最大值和最大值所处位置都比初始参数值结果更接近监测值，说明进行参数反演具有实际意义和使用价值。本文所提出的参数反演及变形预测方法可为类似工程提供指导。

参考文献

- [1] 姚大钧, 吴志宏, 张郁慧. 软弱黏土中管幕工法之设计与分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004 (增刊2): 4999-5005.
- [2] 万敏, 白云, 陈文财. 管幕箱涵顶进施工中迎面土压力研究 [J]. 土木工程学报, 2007 (6): 59-63.
- [3] 李耀良, 张云海, 李伟强. 软土地区管幕法工艺研究与应用 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7 (5): 962-967.
- [4] 陈立生, 程池浩, 葛金科, 等. 管幕箱涵法隧道在软土地层中的应用技术研究 [J]. 中国市政工程, 2016 (增刊1): 12-15, 14.
- [5] 胡瑞灵. 软土地区箱涵顶进施工关键技术探讨 [J]. 资源环境与工程, 2011, 25 (3): 215-221.
- [6] 王滕, 王秀英, 谭忠盛, 等. 管幕-箱涵下穿运营铁路地层变形分析及控制技术 [J]. 北京交通大学学报, 2017, 41 (3): 84-89.
- [7] 王全锋, 郑微微. 南水北调配套供水工程高速公路箱涵顶进关键技术 [J]. 中国给水排水, 2021, 37 (3): 74-78.
- [8] 周广友, 李聪, 胡勇, 等. 箱涵顶进施工过程中路面沉降的数值模拟分析 [J]. 公路工程, 2020, 45 (3): 29-37.
- [9] 毕见山. 大型顶进箱涵施工技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [10] 赵旭峰, 王春苗, 孔祥利. 泥岩中顶管施工顶推力计算的理论分析 [J]. 岩土工程技术, 2006 (1): 42-44.
- [11] 顾翠莲, 夏才初, 李向阳, 等. 软土地层管幕-箱涵推进工法阻力计算研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2007 (1): 128-131.
- [12] 张亚西. 海相软土地质深基坑土体参数反演及基坑动态开挖预测 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [13] 李小彤, 张万志, 徐帮树, 等. 矩形顶管施工多测点位移反分析方法 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (24): 10498-10505.
- [14] 李振涛, 姜磊, 刘宇, 等. 砂土区间地铁盾构施工土体参数反演及其验证 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10 (3): 630-634.
- [15] 刘春, 周义舒, 刘海壮, 等. 基于改进 BP 神经网络的隧道位移反分析研究 [J]. 公路, 2021, 66 (9): 385-392.
- [16] 凌同华, 秦健, 宋强, 等. 基于改进粒子群算法和神经网络智能位移反分析法及其应用 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17 (9): 2181-2190.
- [17] SUN H, WANG J, CHEN C, et al. ISSA-ELM: A Network Security Situation Prediction Model. Electronics, 2023, 12: 25.
- [18] 江圣青, 史彬. 基于 ISSA-ELM 模型的含腐蚀缺陷管道失效压力预测 [J/OL]. 热加工工艺: 1-7 [2023-04-18].