

改进的 TOPSIS (逼近理想解排序方法) 在土体刚度参数反分析中的应用*

徐世祥¹ 万友生² 贺 烽² 覃 君³ 谢云杰³ 吴 波^{1,4} 郑卫强¹ 许 杰⁴

(1. 东华理工大学土木与建筑工程学院, 330013, 南昌; 2. 南昌轨道交通集团有限公司, 330038, 南昌;

3. 中铁二局第六工程有限公司, 610036, 成都; 4. 广西大学土木建筑工程学院, 530004, 南宁)

摘 要 [目的] 当采用反分析法确定土体参数时, 由现场实测得到的理想解一般为中间值, 无法使用传统的 TOPSIS (逼近理想解排序法) 进行计算。有必要改进传统 TOPSIS, 并与熵权法、数值分析法和正交试验法相结合, 应用于土体刚度参数反分析。[方法] 简述了传统 TOPSIS 的改进, 并与熵权法、数值分析和正交试验法相结合, 应用于富水砂层刚度参数反分析中。利用正交试验法建立了 25 个方案数值分析模型, 选取最大地面沉降、最大拱顶沉降、最大拱底隆起和最大净空收敛 4 个指标进行综合决策, 确定了适用于富水砂层土体硬化模型刚度参数的比例关系与大小。[结果及结论] 改进的 TOPSIS 能有效地与数值分析和正交试验法相结合进行反分析研究, 科学地对正交试验方案进行多指标决策, 为复杂岩土工程反分析理论提供了一种新的决策方法。富水砂层土体硬化模型刚度参数之间的比例关系为: 固结试验切线模量 $E_{\text{ref, oed}} = E_{\text{s}(0.1 \sim 0.2)}$ (0.1 ~ 0.2 MPa 围压下的压缩模量), 三轴固结排水剪切试验割线模量 $E_{\text{ref, 50}} = 1.4E_{\text{ref, oed}}$, 三轴固结排水卸载再加载试验的卸载再加载模量 $E_{\text{ref, ur}} = 2.0E_{\text{ref, 50}}$, 刚度应力相关指数为 0.6。

关键词 地铁隧道; 土体刚度参数反分析; 逼近理想解排序法; 正交试验; 富水砂层; 硬化土本构模型

中图分类号 TU411.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.04.025

Application of Improved TOPSIS in Back Analysis of Soil Stiffness Parameters

XU Shixiang¹, WAN Yousheng², HE Feng², QIN Jun³, XIE Yunjie³, WU Bo^{1,4}, ZHENG Weiqiang¹, XU Jie⁴

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, 330013, Nanchang, China; 2. Nanchang Railway Transit Group Co., Ltd., 330038, Nanchang, China; 3. China Railway Erju 6th Engineering Co., Ltd., 610036, Chengdu, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, 530004, Nanning, China)

Abstract [Objective] When the back analysis method is used to determine soil parameters, the ideal solution obtained from field measurements is generally an intermediate value, which cannot be calculated using the traditional TOPSIS (technique for order preference by similarity to solution). It is necessary to improve the traditional TOPSIS and combine it with the entropy weight method, numerical analysis method and orthogonal test method for back analysis of soil stiffness parameters. [Method] The improved traditional TOPSIS is briefly described and combined with entropy weight method, numerical analysis and orthogonal test method, then applied to the back analysis of stiffness parameters in water-rich sandy stratum. 25 numerical analysis models of the schemes are established with the orthogonal test method. Four indicators including maximum ground settlement, maximum arch crown settlement, maximum arch bottom uplift and maximum clearance convergence are selected for comprehensive decision-making, and the proportional relationship and size of the stiffness parameters of the HS (hardening soil) model suitable for water-rich sandy stratum are determined. [Result & Conclusion] The improved TOPSIS can effectively combine numerical analysis and orthogonal experiment method for back analysis research, and make multi-index decisions on orthogonal experiment schemes scientifically, providing a new decision-making method for the back analysis theory of complex geotechnical engineering. The proportional relations between the stiffness parameters of the HS model in water-rich sand stratum are: tangent modulus of consolidation test $E_{\text{ref, oed}} = E_{\text{s}(0.1 \sim 0.2)}$ (0.1 ~ 0.2 MPa compression modulus under ambient pressure), the cut line modulus of three-axis consolidation drainage shear test $E_{\text{ref, 50}} = 1.4E_{\text{ref, oed}}$, the unloading and reloading modulus of three-axis consolidation drainage unloading and reloading test $E_{\text{ref, ur}} = 2.0E_{\text{ref, 50}}$, the stiffness stress correlation index equals 0.6.

* 国家自然科学基金项目(52168055, 52278397); 东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2023011)

Key words subway tunnel; back analysis of soil stiffness parameters; TOPSIS; orthogonal test; water-rich sandy stratum; HS constitutive model

岩土工程研究存在对象岩土体复杂、解析求解难的问题。岩土工程反分析法采用 TOPSIS (逼近理想解排序法) 对正交试验方案进行综合决策, 可以解决单一型或混合型多指标决策问题, 其优点是易于理解、计算简单、适用范围广、几何意义直观、结果合理等^[1]。文献[2]采用 AHP (层次分析法) 和客观计算法对评判指标进行综合赋权, 然后再利用 TOPSIS 进行采矿方法优选, 结果证明该评判方法合理可行。文献[3]采用熵权法确定权重, 使用改进了评价方法的 TOPSIS, 选取 16 个指标构建土地利用绩效评价框架。可见, 当前对 TOPSIS 的改进大多考虑了拓展决策环境、完善赋权方式、消除指标相关性影响的单一情况。

然而, TOPSIS 存在明显缺点: 其正理想解和负理想解只能为极值。当需要反分析时, 反分析通过现场实测得到的理想解一般为中间值, 而非极值, 此时 TOPSIS 无法计算。对此, 本文使用离差标准化方法对正交试验结果数据标准化, 利用熵权法确定最大地面沉降、最大拱顶沉降、最大拱底隆起、最大净空收敛等 4 个指标的权重, 改进 TOPSIS 正理想解和负理想解的评定公式, 使得 TOPSIS 同样适用于决策正理想解和负理想解为中间值的情形, 并将正交试验法、岩土工程反分析法和改进的 TOPSIS 相结合, 解决土体刚度参数适用性问题, 以期为复杂岩土工程反分析进行多指标决策提供新方法。

1 传统 TOPSIS 的改进

1.1 传统 TOPSIS

TOPSIS 基于加权决策矩阵, 定义多指标决策问题的正理想解和负理想解, 分别计算各评价方案同正理想解和负理想解的距离^[4], 之后计算其综合评价值, 根据综合评价值对各方案排序。若综合指标距离正理想解越近, 且距离负理想解越远, 则评价结果越优, 其方案越好。具体步骤如下:

步骤 1 确定正理想解 V^+ 和负理想解 V^- 。原始数据经标准化与客观赋权后, 得到加权决策矩阵, 则正理想解为:

$$V^+ = [v_1^+ \quad v_2^+ \quad \cdots \quad v_i^+ \quad \cdots \quad v_n^+] \quad (1)$$

式中:

v_i^+ ——正理想解矩阵的第 i 个阵列。

负理想解为:

$$V^- = [v_1^- \quad v_2^- \quad \cdots \quad v_j^- \quad \cdots \quad v_n^-] \quad (2)$$

式中:

v_j^- ——负理想解矩阵的第 j 个阵列。

步骤 2 计算方案 p 到正理想解的距离 D_p^+ 和到负理想解的距离 D_p^- :

$$D_p^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij,p} - v_i^+)^2} \quad (3)$$

$$D_p^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij,p} - v_j^-)^2} \quad (4)$$

式中:

$v_{ij,p}$ ——方案 p 的加权标准化矩阵。

步骤 3 计算方案 p 的相对贴近度 C_p :

$$C_p = \frac{D_p^-}{D_p^+ + D_p^-} \quad (5)$$

步骤 4 按照相对贴近度进行方案优劣排序。一般情况下, $C_p \in (0, 1)$, 且 C_p 值越大, 方案越优。

1.2 改进 TOPSIS

由于 TOPSIS 本身无法对指标进行赋权, 故采用熵权法对指标进行客观赋权, 得到加权决策矩阵。先将已知的反分析实测值作为正理想解, 再取距离正理想解最远的指标为负理想解。设反分析实测值为 $V^+ = [v_1^+ \quad v_2^+ \quad \cdots \quad v_i^+ \quad \cdots \quad v_n^+]$, 其中, $v_i^+ = [v_1^+ \quad v_2^+ \quad \cdots \quad v_i^+ \quad \cdots \quad v_n^+]$ 。由于正理想解并非极值, 故设置 2 个负理想解。令方案的加权标准化矩阵为 v_{ij} , 则负理想解 1 为 $V_1^- = [v_{1,1}^- \quad v_{1,2}^- \quad \cdots \quad v_{1,j}^- \quad \cdots \quad v_{1,n}^-]$, 其中, 当 $\max_{1 \leq j \leq n} (v_{ij} - v_{1,j}^-)$ 时, 取 $v_{1,j}^- = v_{ij}$; 负理想解 2 为 $V_2^- = [v_{2,1}^- \quad v_{2,2}^- \quad \cdots \quad v_{2,j}^- \quad \cdots \quad v_{2,n}^-]$, 其中, 当 $\min_{1 \leq j \leq n} (v_{ij} - v_{2,j}^-)$ 时, 取 $v_{2,j}^- = v_{ij}$ 。

利用 2 个负理想解, 可计算得到 2 个负距离, 负距离平均值即为所求负距离解。计算各方案的相对贴近度, 并按照相对贴近度进行方案优劣排序, 即可得到最优方案。

2 模型建立

富水砂层承载能力低、渗透系数大、自稳能力差, 在盾构施工过程中极易产生地面塌陷、沉降过大等问题^[5]。为保证盾构施工的安全性, 须对适用于描述富水砂层的 HS (硬化土本构) 模型的参数进行研究。本文以福州地铁 6 号线壶井站—万寿站区间 (以下简称“壶万区间”) 盾构施工项目为案例建

立模型。该区间沿线下穿农田、水塘和小河涌,如图1所示。壶万区间地层主要为填土、粉细砂、(含泥)中细砂、(含泥)中粗砂、强风化花岗岩。盾构主要穿过富水的粉细砂层和(含泥)中细砂层,其地质剖面图如图2所示。

2.1 HS模型及材料参数

仅考虑强度参数或采用MC(摩尔-库伦)模型无法很好地描述砂土特性,因此本研究采用HS模型进行分析^[6],其中需要重点考虑刚度参数。刚度

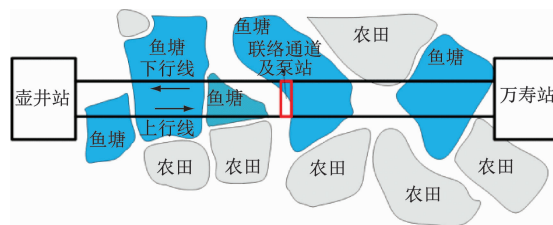


图1 壶万区间平面图

Fig. 1 Plan diagram of Hujing Station-Wanshou Station interval

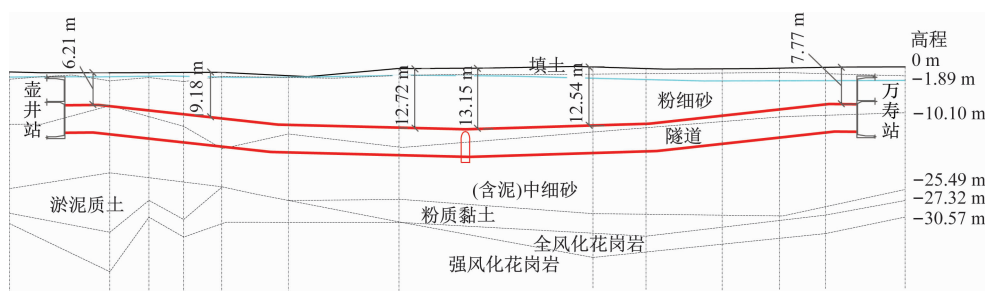


图2 壶万区间地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of Hujing Station-Wanshou Station interval

参数测定费用昂贵且测试过程复杂,采用数值分析和反分析的手段来研究刚度参数是可行的。对于砂土、粉土,刚度应力相关指数 m 一般取0.5,对于黏土一般取 $m=0.4\sim 0.7$ ^[6]。在与刚度有关的参数中,通常认为三轴固结排水剪切试验割线模量 $E_{\text{ref},50}$ 、固结试验切线模量 $E_{\text{ref},\text{oed}}$ 及三轴固结排水卸载再加载试验的卸载再加载模量 $E_{\text{ref},\text{ur}}$ 存在如下关系: $E_{\text{ref},\text{oed}}=(1\sim 2)\times E_{\text{s}(0.1\sim 0.2)}$, $E_{\text{ref},50}=E_{\text{ref},\text{oed}}$, $E_{\text{ref},\text{ur}}=(2\sim 4)\times E_{\text{ref},50}$ ^[7]。由于岩土工程的复杂性较高,不同土层的刚度参数之间关系往往也不同^[8],为此本研究根据埋深为12 m的盾构隧道施工时最大地面沉降、最大拱顶沉降、最大拱底隆起、最大净空收敛等现场监测数据,利用正交试验和反分析方法,对除全风化闪长岩外地层的刚度参数进行反演,求出适合富水砂层的HS模型主要刚度参数关系。采用四因素五水平正交试验,设 $E_{\text{ref},\text{oed}}=\alpha E_{\text{s}(0.1\sim 0.2)}$, $E_{\text{ref},50}=\beta E_{\text{ref},\text{oed}}$, $E_{\text{ref},\text{ur}}=\lambda E_{\text{ref},50}$, $m=\eta$,其中 α 、 β 、 λ 、 η 为不同的刚度因数,取值如表1所示,并根据 $L_{25}(5^4)$ 正交表进行试验。

2.2 数值分析模型

采用Midas(迈达斯)有限元软件进行数值模拟分析。利用圣维南原理消减边界效应,建立尺寸为80 m(长) \times 60 m(宽) \times 60 m(高)的模型。为简化计算,将物理力学性质和参数相近的地层合并为一

表1 正交试验的刚度因数取值表

Tab. 1 Stiffness parameter factors value table of orthogonal test

刚度因数	不同水平的刚度因数取值				
	水平1	水平2	水平3	水平4	水平5
α	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
β	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
λ	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
η	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3

种地层计算。简化后模型有5个地层:填土层、粉细砂层、(含泥)中细砂层、中粗砂层、全风化闪长岩层。土体采用HS模型。数值模型边界条件除地面为自由边界外,其余采用法向约束。数值模型中:盾构外径为6.2 m,内径为5.5 m;管片厚度为0.35 m,每环管片宽度为1.2 m,共50环管片。有限元模型与网格划分如图3所示。

3 计算分析

3.1 改进的TOPSIS计算

现场盾构机平均推进速度为10 m/d,选取埋深约为12 m右线隧道的最大地面沉降、最大拱顶沉降、最大拱底隆起、最大净空收敛(取相邻3个断面监测数据的平均值)作为反分析指标,应用改进的TOPSIS在25个方案数值分析模型中,选取同样的监测值,获得决策矩阵,找到最适合描述富水砂层

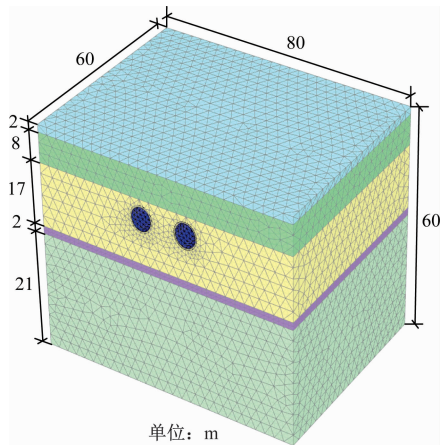


图3 有限元模型与网格划分

Fig. 3 Finite element model and meshing

的 HS 模型刚度参数之间的关系。试验方案指标如表 2 所示。

表 2 各正交试验方案的指标

Tab. 2 Indicators of each orthogonal test scheme

试验 方案	α	β	λ	η	最大地 面沉降 P_1/mm	最大拱 顶沉降 P_2/mm	最大拱 底隆起 P_3/mm	最大净 空收敛 P_4/mm
S ₁	1	1	1	1	-59.75	20.52	22.34	1.83
S ₂	1	2	2	2	-51.68	12.99	14.60	1.55
S ₃	1	3	3	3	-57.79	8.03	9.69	1.47
S ₄	1	4	4	4	-59.50	4.74	6.53	1.52
S ₅	1	5	5	5	-58.06	2.86	4.80	1.56
S ₆	2	1	2	3	-46.82	8.40	10.04	1.52
S ₇	2	2	3	4	-44.21	4.50	6.10	1.33
S ₈	2	3	4	5	-43.03	2.44	4.23	1.34
S ₉	2	4	5	1	-45.66	2.51	3.99	1.11
S ₁₀	2	5	1	2	-42.64	4.82	6.22	1.12
S ₁₁	3	1	3	5	-36.75	3.65	5.25	1.31
S ₁₂	3	2	4	1	-39.22	3.37	4.75	1.06
S ₁₃	3	3	5	2	-37.12	1.69	3.11	1.01
S ₁₄	3	4	1	3	-35.89	3.37	4.77	1.07
S ₁₅	3	5	2	4	-33.63	1.67	3.25	1.04
S ₁₆	4	1	4	2	-34.47	3.07	4.46	1.07
S ₁₇	4	2	5	3	-31.64	1.37	2.92	0.99
S ₁₈	4	3	1	4	-31.05	2.70	4.21	1.06
S ₁₉	4	4	2	5	-28.91	1.16	2.71	0.98
S ₂₀	4	5	3	1	-31.03	1.31	2.70	0.83
S ₂₁	5	1	5	4	-28.69	1.43	2.97	1.01
S ₂₂	5	2	1	5	-27.88	2.46	4.00	1.07
S ₂₃	5	3	2	1	-29.90	2.26	3.64	0.88
S ₂₄	5	4	3	2	-27.23	0.87	2.29	0.78
S ₂₅	5	5	4	3	-23.83	0.20	1.37	0.74

1) 利用熵权法对评价指标进行赋权。首先,利用离差标准化方法对原始指标进行标准化处理;然后,利用熵权法对指标进行客观赋权,计算得到各指标的客观权重,如表 3 所示。

表 3 各指标的客观权重

Tab. 3 Objective weights of each indicator

指标	客观权重/%
P_1	47.10
P_2	13.44
P_3	13.45
P_4	26.01

2) 将得到的权重与相对应的指标相乘,构建加权决策矩阵,如表 4 所示。

表 4 加权决策矩阵

Tab. 4 Weighted decision matrix

方案	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	P_4/mm
S ₁	-25.30	-2.69	1.48	2.84
S ₂	-21.88	-1.99	1.07	2.51
S ₃	-24.47	-1.52	0.77	2.40
S ₄	-25.19	-1.29	0.59	2.35
S ₅	-24.58	-1.26	0.51	2.04
S ₆	-19.82	-1.59	0.84	2.41
S ₇	-18.72	-1.43	0.65	2.36
S ₈	-18.22	-1.43	0.57	2.09
S ₉	-19.33	-1.52	0.57	1.84
S ₁₀	-18.05	-1.63	0.69	1.87
S ₁₁	-15.56	-1.39	0.63	2.32
S ₁₂	-16.61	-1.47	0.61	1.89
S ₁₃	-15.72	-1.71	0.59	1.59
S ₁₄	-15.20	-1.73	0.68	1.79
S ₁₅	-14.24	-1.98	0.68	1.50
S ₁₆	-14.59	-1.47	0.60	1.89
S ₁₇	-13.40	-1.78	0.61	1.48
S ₁₈	-13.15	-1.78	0.68	1.73
S ₁₉	-12.24	-2.04	0.68	1.30
S ₂₀	-13.14	-2.06	0.67	1.24
S ₂₁	-12.15	-1.69	0.60	1.55
S ₂₂	-11.80	-1.80	0.69	1.77
S ₂₃	-12.66	-1.81	0.66	1.52
S ₂₄	-11.53	-2.09	0.67	1.14
S ₂₅	-10.09	-2.43	0.72	1.06

3) 确定正理想解和负理想解。由现场实测数

据可得用于反分析的指标,即正理想解为: $P_1 = -41.57 \text{ mm}$, $P_2 = 3.28 \text{ mm}$, $P_3 = 5.62 \text{ mm}$, $P_4 = 1.60 \text{ mm}$ 。按客观权重加权后的指标分别为: $[-19.58 \quad 0.44 \quad 0.76 \quad 0.42]$ 。计算得到:负理想解1为 $[-28.14 \quad 2.76 \quad 3.01 \quad 0.48]$,负理想解2为 $[11.22 \quad 0.03 \quad 0.18 \quad 0.19]$ 。

4) 使用式(3)、式(4)计算得到方案到正理想解的距离和到负理想解的距离,并利用式(5)计算得到相对贴近度,结果如表5所示。

表5 各方案的距离和相对贴近度
Tab.5 Distance and relative closeness of each scheme

方案	D^+	D^-	相对贴近度
S ₁	9.152	8.688	1.053
S ₂	5.083	8.710	0.584
S ₃	7.688	9.319	0.825
S ₄	8.445	9.914	0.852
S ₅	7.763	9.786	0.793
S ₆	2.634	8.733	0.302
S ₇	1.257	8.787	0.143
S ₈	0.728	8.826	0.082
S ₉	1.941	8.888	0.218
S ₁₀	0.564	8.757	0.064
S ₁₁	2.270	8.715	0.261
S ₁₂	1.123	8.748	0.128
S ₁₃	2.141	8.762	0.244
S ₁₄	2.684	8.715	0.308
S ₁₅	3.761	8.725	0.431
S ₁₆	3.355	8.708	0.385
S ₁₇	4.702	8.714	0.540
S ₁₈	4.964	8.692	0.571
S ₁₉	5.980	8.698	0.688
S ₂₀	4.995	8.711	0.573
S ₂₁	6.086	8.693	0.700
S ₂₂	6.454	8.685	0.743
S ₂₃	5.510	8.691	0.634
S ₂₄	6.784	8.692	0.780
S ₂₅	8.391	8.690	0.966

3.2 结果分析

影响盾构隧道稳定性的因素中,权重由大到小顺序为:地面沉降值>净空收敛>拱底隆起>拱顶沉降,地面沉降值权重为47.10%,因此地面沉降最

能反映盾构隧道施工围岩稳定性。

使用改进的 TOPSIS 进行多指标决策,按相对贴近度大小将方案由优至劣排序为:S₁₀、S₈、S₁₂、S₇、S₉、S₁₃、S₁₁、S₆、S₁₄、S₁₆、S₁₅、S₁₇、S₁₈、S₂₀、S₂、S₂₃、S₁₉、S₂₁、S₂₂、S₂₄、S₅、S₃、S₄、S₂₅、S₁。

由上述结果可见,改进 TOPSIS 结合正交试验法及反分析法的使用,可以很好地对试验方案进行多指标决策,并选出最优方案。

改进 TOPSIS 相对贴近度最小值为0.064,对应S₁₀方案。可见,HS 模型能很好地描述富水砂层盾构地面沉降变化规律。结合表2可知,最适合富水砂层的刚度参数关系为: $E_{\text{ref},\text{oed}} = E_{s(0.1-0.2)}$, $E_{\text{ref},50} = 1.4E_{\text{ref},\text{oed}}$, $E_{\text{ref},\text{ur}} = 2E_{\text{ref},50}$, $m = 0.6$ 。

3.3 反分析结果验证

为检验改进 TOPSIS 理论反分析得到的 HS 模型刚度参数合理性,将上述刚度参数应用于福州地铁6号线壶万区间盾构施工项目埋深为6m的数值分析中,仍使用“三阶段固结法”,采用原构建的80m×60m×60m模型,模拟计算其40m处断面的最大地面沉降、最大拱顶沉降、最大拱底隆起和最大净空收敛,并与现场监测数据进行对比分析。地面沉降的模拟值与现场监测值如图4所示,各指标的模拟值与现场监测值如表6所示。

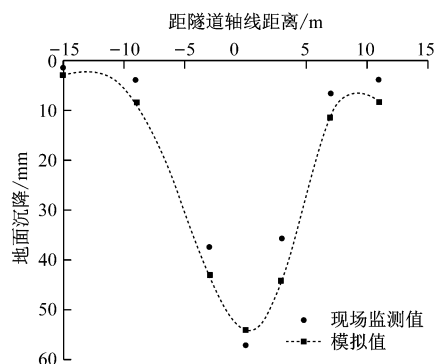


图4 地面沉降的模拟值与现场监测值

Fig. 4 Simulated values and on-site monitoring values of land subsidence

从图4和表6中可以看出:模拟值与现场监测数据较接近,其中最大地面沉降的模拟值与现场监测值仅相差2.96mm;数值模拟得到的地面沉降槽形状及数据均同现场监测结果相近。由此可见,反分析得到的刚度参数是合理可靠的,改进的 TOPSIS 在岩土工程反分析中有很好的应用。

表 6 各指标的模拟值与现场监测值

Tab.6 Simulated values and on-site monitoring values of each indicator

指标	模拟值/mm	现场监测值/mm
最大地面沉降	54.20	57.16
最大拱顶沉降	5.48	5.24
最大拱底隆起	8.45	6.08
最大净空收敛	1.82	0.58

4 结语

本研究将正交试验、反分析法和改进的 TOPSIS 进行结合使用,实现优势互补,并依托福州地铁 6 号线盾构施工项目,对富水砂层的 HS 模型刚度参数进行研究,得到的主要结论如下:

1) 利用熵权法对各指标进行赋权,根据所获得有效信息量的多少,综合客观地衡量指标的客观权重,弥补了 TOPSIS 本身不能考虑指标的权重的缺点,并且熵权法得到的权重具有较大的区分度。

2) 对 TOPSIS 进行改进,使得该方法不仅适用于决策正理想解和负理想解为极值的情形,也适用于决策正理想解和负理想解为中间值的情形。该方法可以很好地和反分析方法相结合,对多指标进行决策,可选出最适合的试验方案。

3) 使用改进的 TOPSIS 对最适用于富水砂层的 HS 模型刚度参数进行决策,得出相对贴程度最小值为 0.064,最适用的 HS 模型刚度参数为 $E_{\text{ref, oed}} = E_{s(0.1 \sim 0.2)}$, $E_{\text{ref, 50}} = 1.4E_{\text{ref, oed}}$, $E_{\text{ref, ur}} = 2E_{\text{ref, 50}}$, $m = 0.6$ 。由应用结果,本方法可以对正交试验方案进行多指标综合评价,得出最贴近理想解的合理科学的方案,在正交试验方案评价中具有一定的推广应用价值。

参考文献

- [1] 李远富, 蒋频, 樊敏, 等. TOPSIS 在山区铁路线路方案比选中的二次改进[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(2): 253.
LI Yuanfu, JIANG Pin, FAN Min, et al. Optimal selection of mountain railway location design based on twice-improved TOPSIS method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(2): 253.
- [2] 马少维. 基于改进型 AHP-TOPSIS 评判模型的采矿方法优选[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(10): 1.

MA Shaowei. Optimization of mining method based on improved AHP-TOPSIS evaluation model[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(10): 1.

- [3] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 217.
LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al. Evaluation and correlation analysis of land use performance based on entropy-weight TOPSIS method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 217.
- [4] ASSARI A. Role of public participation in sustainability of historical city: usage of TOPSIS method[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2012, 5(3): 1.
- [5] 陈相宇, 阳军生, 梁禹, 等. 富水砂层泥水盾构施工孔隙水压反应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 1064.
CHEN Xiangyu, YANG Junsheng, LIANG Yu, et al. Research on pore pressure reaction caused by slurry shield tunneling in watery sandy stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(4): 1064.
- [6] 许超, 赵志伟. 北京地区土体硬化模型参数的试验研究及工程应用[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 2017 年全国工程地质学术年会论文集. 北京: 中兵勘察设计研究院, 2017: 143.
XU Chao, ZHAO Zhiwei. Experimental study and engineering application of soil hardening model parameters of Beijing[C]//The Engineering Geology Professional Committee of the Geological Society of China. 2017 National Annual Conference on Engineering Geology. Beijing: China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute, 2017: 143.
- [7] 王海波, 宋二祥, 徐明. 地下工程开挖土体硬化模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(3): 351.
WANG Haibo, SONG Erxiang, XU Ming. Hardening-soil-model for underground construction[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(3): 351.
- [8] 薛清鹏. 基于土体硬化模型的紧邻铁路基坑变形分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(2): 39.
XUE Qingpeng. Analysis of the deep excavations deformation close to the existing operating railway based on hardening-soil model[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(2): 39.

· 收稿日期:2023-01-05 修回日期:2024-10-21 出版日期:2025-04-10
Received:2023-01-05 Revised:2024-10-21 Published:2025-04-10
· 第一作者:徐世祥,讲师,603559081@qq.com
通信作者:郑卫强,博士研究生,369681005@qq.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