

# 基于灰色关联理论的 Peck 法隧道 地表移动参数影响研究\*

秦拥军<sup>1</sup> 孟建宇<sup>1</sup> 谢良甫<sup>1</sup> 于广明<sup>2,3</sup>

(1. 新疆大学建筑工程学院, 830047, 乌鲁木齐; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 266033, 青岛;  
3. 青岛理工大学蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 266033, 青岛/第一作者, 教授)

**摘要** 在预测隧道施工引起地表变形的算法中, Peck 法发挥着重要作用。但该法对地表移动参数的研究往往依据经验, 只考虑了部分因素的作用。针对这种局限性, 在收集整理乌鲁木齐地铁 1 号线数据资料的基础上, 借助数值模拟手段, 运用灰色关联理论, 对 Peck 法中的地表移动参数(沉降槽宽度系数  $i$  和地层损失率  $\eta$ )进行了研究。选取了土体参数、隧道设计指标和监测指标中的 8 个影响因子, 计算其与  $i$  和  $\eta$  的关联性, 得到以下结论: 泊松比  $\mu$  对  $i$  的影响远远高于其他因素;  $\eta$  的取值与内摩擦角的关联性较小, 与其他 7 个影响因子的关联性差别不大, 通过经验法综合考虑所有因素的取值是合理的。

**关键词** 地铁隧道施工; Peck 法; 地表移动参数; 沉降槽宽度系数; 地层损失率

**中图分类号** U456.3+1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.007

## Surface Movement Parameters of Peck Method Tunnel Based on Gray Relational Theory

QIN Yongjun, MENG Jianyu, XIE Liangfu, YU Guangming

**Abstract** Peck method plays an important role in predicting the ground surface deformation caused by tunnel construction, but the method only considers some factors based on experiences while studying the ground surface movement parameters. In view of this limitation, on the basis of collecting and sorting out the data of Urumqi metro Line 1, the surface movement parameters of Peck method (settlement trough width coefficient  $i$  and stratum loss rate  $\eta$ ) are studied by means of numerical simulation and gray relational theory. 8 influencing factors about soil parameters, tunnel design index and monitoring index are selected to calculate the correlation between the factor influence, coefficient  $i$  and loss rate  $\eta$ . The result shows Poisson's ratio has a much higher influence on  $i$  than other factors, while

the value of  $\eta$  has little correlation with the angle of internal friction, showing no significant difference in correlation with the other 7 factors. Therefore, it is reasonable to consider all factors through experience method.

**Key words** metro tunnel construction; Peck method; surface movement parameters; settlement trough width coefficient; stratum loss rate

**First-author's address** College of Architecture Engineering, Xinjiang University, 830047, Urumqi, China

隧道工程的大量实践, 证明了 Peck 公式所代表的地表沉降槽曲线规律具有普遍适用性。众多学者将 Peck 经验公式在不同地区进行了适应性改进, 并对地表移动参数进行了大量的研究<sup>[1-8]</sup>。由于岩土工程建设环境的复杂性, 地层地质条件具有极高的随机性和不均匀性<sup>[9-13]</sup>, 目前的研究仍停留在半经验半理论阶段, 在参数中仅仅体现了少数因素的作用, 一般采用引入修正系数的方法来概括其他多种因素的复杂作用。本文针对目前 Peck 法研究的局限性, 以乌鲁木齐地铁 1 号线建设工程为依托, 采用灰色关联与数值模拟结合的方法, 分析了多种因素对地层损失率和沉降槽宽度系数的影响, 对公式中的地表移动参数进行了较全面的研究。

## 1 Peck 公式

Peck 公式是用来描述和计算隧道开挖引起的地表变形的公式, 如式(1)、式(2)所示。该方法基于地层损失概念并且假定土体不排水, 由此作出的沉降槽曲线(即 Peck 曲线)在水平方向上可由高斯分布拟合。

$$S(x) = S_{\max} \exp\left[-\frac{x^2}{2i^2}\right] \quad (1)$$

\* 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2017D01C078)

$$S_{\max} = \frac{\pi R^2 \eta}{i \sqrt{2\pi}} = \frac{A \eta}{i \sqrt{2\pi}}$$

(2)

式中：

$x$ ——地表坐标上的预测点；

$S(x)$ ——对应  $x$  位置的地面沉降量；

$S_{\max}$ ——沉降量的最大值，在轴线上面；

$R$ ——隧道半径；

$A$ ——隧道开挖断面面积；

$\eta$ 、 $i$ ——分别是地层损失率和沉降槽宽度系数。

这两个参数统称为地表移动参数。

2 灰色关联模型

2.1 灰色关联计算过程

灰色关联度法是用来计算一个复杂系统在变化中不同因素变化趋势相关性的方法，可以定量地评价不同自变量间相关性的关联度，对于系统中自变量和水平数较多且各自变量间联系不明确情况也同样适用。

计算关联度时，首先需要确定灰色关联模型中表征系统行为的评价指标序列  $X_0$ （因变量）和影响系统行为的影响因子序列  $X_i$ （自变量），评价指标序列的选取直接决定关联度计算结果的合理性。

灰色关联模型中，各因子的物理意义以及单位量纲不同，为了解决量纲差异带来的各因子数据无法共同处理的问题，需要将原始数据进行无量纲标准化处理，本文采用极差变换法进行操作。

经无量纲处理后得到的数据按照下述式(3)计算各影响因子序列与评价指标序列所对应的绝对差值，记做  $\Delta_i(k)$ 。其中各序列绝对差的最大值、最小值分别记做  $\Delta_{\max}$ 、 $\Delta_{\min}$ ，按照式(4)计算得到关联系数  $L_{0i}^{(k)}$ ，其中： $k$  为序列编号； $\rho$  为分辨率，一般取 0.5。

$$\Delta_i(k) = |x_0^{(k)} - x_i^{(k)}| \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

(3)

$$L_{0i}^{(k)} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho \Delta_{\max}}$$

(4)

每个序列计算后都会得到一个关联系数序列。对关联系数序列取平均值，作为对应比较序列与参考序列的关联度，记为  $R_{0i}$ 。 $R_{0i}$  越接近 1，则关联性越大。

2.2 灰色关联模型指标的确定

从隧道工程实践积累的大量资料和现有研究中发现，地表移动参数  $i$  和  $\eta$  与包括地质水文、隧道设计在内的工程条件有密切关系，已有的成果也都

肯定了这一点。用部分工程条件指标作为关键参数定义  $i$  和  $\eta$  是不准确的，必须在此基础上综合多种因素的影响，依据地区经验引入修正系数用以模糊这些影响因素的具体作用。本文针对依据地区经验取值和引入修正系数的局限性，较全面地考虑各因素对地表移动参数的影响，土层按莫尔—库伦本构，选取了弹性模量、泊松比、重度、粘聚力、内摩擦角、隧道直径、隧道埋深以及隧道轴线地表沉降等共计 8 个因素作为影响因子序列（自变量），如图 1 所示。此外，本文将地表移动参数  $i$  和  $\eta$  作为评价指标序列（因变量）。

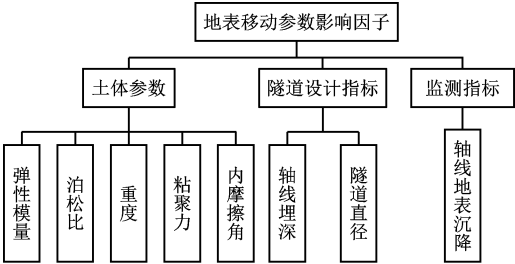


图 1 地表移动参数的影响因子

3 地表移动参数影响因子的关联度计算

乌鲁木齐地铁 1 号线穿越复合地层，地质条件复杂，不同地层具有不同的岩土体参数。由于岩土体材料的随机性和不均匀性，即使在同一地层的不同位置，其土体参数也不尽相同，这样导致了难以根据岩土体参数来分析地表移动参数。为了保证各因素的分析具有普遍意义，需要有足够多样的取值数据。本文收集整理了乌鲁木齐地铁 1 号线的数 据资料，对实际工程进行简化，建立了数值模型。模型中各因素的取值范围结合实际情况确定，在该范围内生成包含足够多数据的随机数列作为取值结果。为了便于计算分析，数值模型按单一地层考虑，隧道截面取圆形。

3.1 试验方案确定

岩土体参数取值范围依据实际工程资料确定。同时，为了获得更好的计算结果，在模型生成的随机数列中，剔除极小和极大值情况后，选取了 13 组试验组进行研究。这些数据均满足隧道拱顶埋深不小于 7 m，隧道直径不小于 10 m 的要求。将各组自变量值代入模型中运算，在隧道轴线上方的地表处( $S_0$ )、地表上与隧道轴线水平距离为 3 m 处( $S_3$ )

布置测点,获得地表沉降值。试验的自变量取值、测点沉降及地表移动参数如表 1 所示。

表 1 灰色关联模型测量及计算结果

| 序号 | 影响因子集    |      |                         |        |          |        |        | 地表沉降/mm          |                  | 评价指标集  |       |
|----|----------|------|-------------------------|--------|----------|--------|--------|------------------|------------------|--------|-------|
|    | 弹性模量/MPa | 泊松比  | 重度/(kN/m <sup>3</sup> ) | 粘聚力/kN | 内摩擦角/(°) | 轴线埋深/m | 隧道直径/m | S <sub>0</sub> 处 | S <sub>3</sub> 处 | i/m    | η/%   |
| 1  | 42.5     | 0.08 | 19.0                    | 0      | 24       | 20     | 10.5   | 1.46             | 1.13             | 4.191  | 0.018 |
| 2  | 67.5     | 0.14 | 19.0                    | 23     | 9        | 21     | 14.0   | 28.40            | 26.00            | 7.139  | 0.238 |
| 3  | 47.5     | 0.13 | 23.1                    | 12     | 9        | 22     | 13.0   | 16.50            | 16.20            | 15.660 | 0.421 |
| 4  | 62.5     | 0.19 | 22.0                    | 5      | 30       | 20     | 13.0   | 6.96             | 6.54             | 8.503  | 0.112 |
| 5  | 70.0     | 0.21 | 21.7                    | 27     | 34       | 18     | 15.5   | 8.90             | 7.83             | 5.927  | 0.100 |
| 6  | 57.5     | 0.25 | 19.3                    | 32     | 2        | 19     | 14.0   | 16.80            | 16.40            | 13.665 | 0.305 |
| 7  | 62.5     | 0.32 | 23.5                    | 9      | 15       | 21     | 11.5   | 12.80            | 12.50            | 13.775 | 0.287 |
| 8  | 75.0     | 0.05 | 17.7                    | 9      | 28       | 12     | 17.5   | 21.60            | 12.10            | 2.787  | 0.145 |
| 9  | 57.5     | 0.06 | 23.1                    | 25     | 28       | 18     | 14.0   | 4.73             | 3.69             | 4.257  | 0.049 |
| 10 | 55.0     | 0.31 | 20.9                    | 5      | 20       | 22     | 11.0   | 8.51             | 8.24             | 11.814 | 0.105 |
| 11 | 50.0     | 0.19 | 18.1                    | 21     | 11       | 17     | 15.5   | 16.50            | 14.10            | 5.351  | 0.144 |
| 12 | 55.0     | 0.30 | 20.2                    | 14     | 3        | 21     | 10.0   | 11.30            | 11.00            | 12.932 | 0.385 |
| 13 | 60.0     | 0.08 | 23.1                    | 22     | 12       | 18     | 17.5   | 51.40            | 40.50            | 4.345  | 0.297 |

3.2 地表移动参数计算

隧道轴线上方地表沉降值最大,即 S<sub>0</sub> 测点值最大,将 S<sub>0</sub>、S<sub>3</sub> 测点沉降值代入式(1)计算得到沉降槽宽度系数*i*,再由式(2)求得地层损失率η,计算结果见表 1。

3.3 基于 MATLAB 计算关联度

MATLAB 软件矩阵运算优势明显,将上述灰色关联算法步骤在 MATLAB 中编程实现,代入各序列数据,计算结果如表 2 所示。

表 2 地表移动参数影响因子关联度计算结果

| 评价指标 | 土体参数  |       |       |       |       | 设计指标  |       | 监测指标   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|      | 弹性模量  | 泊松比   | 重度    | 粘聚力   | 内摩擦角  | 轴线埋深  | 隧道直径  | 轴线地表沉降 |
| i/m  | 0.633 | 0.748 | 0.640 | 0.617 | 0.605 | 0.611 | 0.597 | 0.646  |
| η/%  | 0.620 | 0.642 | 0.651 | 0.635 | 0.520 | 0.629 | 0.623 | 0.715  |

4 地表移动参数分析

4.1 沉降槽宽度系数*i*

在查阅文献过程中发现,国内大多采用以下公式来计算*i*:

$$i = \frac{z}{\sqrt{2\pi} \tan(45^\circ - \varphi/2)}$$
 (5)

$$i = Kz$$
 (6)

$$\beta = 45^\circ - \varphi/2$$
 (7)

式中:

*K*——根据经验或计算结果所取的系数;

*z*——轴线埋深;

*β*——主动土压力影响角;

*φ*——内摩擦角。

式(5)和式(6)在计算*i*时仅考虑了*z*和*φ*的作用。经验证,式(5)计算产生的*i*值所反映的规律在某些情况下与实际不符。文献[18]在计算土压力时引入了*β*,且*β*值越大,则影响范围越大,即*i*值越大。而式(5)表现的规律恰恰相反,这说明了式(5)的不合理性。对于式(6)建立*i*与轴线埋深*z*的关系,分析文献[5]的计算结果可知,即使在轴线埋深相近的情况下,对实测数据进行 Peck 公式拟合,得到不同断面*i*值的差别也十分大,可见式(6)中*z*与*i*值的关联度也并不准确。

本文建立灰色关联模型,计算了土体参数弹性模量、泊松比、重度、粘聚力、内摩擦角,隧道直径、埋深以及隧道轴线地表沉降等参数与沉降槽宽度系数  $i$  的关联度。研究发现,泊松比对  $i$  的影响远高于其他因素。而现有公式计算中考虑的轴线埋深、内摩擦角对  $i$  的影响较小,且没有超过土体弹性模量和重度这 2 个参数对  $i$  的影响。 $i$  值用来衡量地表变形横向影响的范围,而泊松比恰好是反映土体横向变形性质的参数,直接影响  $i$  的取值。本文灰色关联计算的结果证明了这一点。

## 4.2 地层损失率 $\eta$

比较轴线地表沉降与  $i$  和  $\eta$  的关联度发现,轴线地表沉降与  $\eta$  的关联性明显高于  $i$ 。地表沉降是隧道工程与岩土体共同作用的最终结果表现,隧道轴线上地表沉降作为地表移动参数的影响因子,这说明  $\eta$  对地表最大沉降的影响性要高于  $i$ ,同时可以将地表最大沉降值作为判断  $\eta$  大小的指标。

由图 1 可知,将土体参数、隧道设计指标和监测指标作为一级影响因子,按表 2 从左到右将各二级影响因子进行排序,采用式(7)、式(8)来计算一级影响因子的影响性。

$$R_{o\text{土体参数}} = \left( \sum_{i=1}^5 R_{oi} \right) / 5 \quad (8)$$

$$R_{o\text{设计指标}} = \left( \sum_{i=6}^7 R_{oi} \right) / 2 \quad (9)$$

式中:

$R_{o\text{土体参数}}$ ——在一级影响因子中土体参数的关联度;

$R_{o\text{设计指标}}$ ——在一级影响因子中设计指标的关联度;

$R_{oi}$ ——所对应的二级影响因子的关联度。

计算可得,  $R_{o\text{土体参数}} = 0.630$ ,  $R_{o\text{设计指标}} = 0.626$ 。该计算结果表明,土体参数和隧道设计指标对  $\eta$  的影响差别不大,可以说  $\eta$  值由工程地质、隧道设计等工程条件共同决定,这与通过经验法对  $\eta$  取值的观点一致。但是,通过计算也可以发现内摩擦角对  $\eta$  的影响远小于其他因素。

## 5 结论

通过上述研究得出以下结论:

1) 泊松比对  $i$  的影响远远高于其他因素。现

有公式计算中轴线埋深、内摩擦角这 2 个参数对  $i$  的影响较小,且没有超过土体弹性模量和重度对  $i$  的影响。在计算  $i$  值中引入泊松比,可作为下一步工作的重点。

2) 轴线地表沉降与  $\eta$  关联性明显高于  $i$ 。 $\eta$  对地表最大沉降的决定性要高于  $i$ ,同时可以将地表最大沉降值作为判断  $\eta$  大小的指标。

3)  $\eta$  的取值与工程条件各因素的关联性差别不大,通过经验法综合考虑所有因素的取值是合理的。

## 参考文献

- [1] 韩焯,李宁,Standing J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 23.
- [2] 周健,陆丽君,贾敏才. 基于 FLAC2D 数值方法的盾构隧道地层损失率研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 902.
- [3] 冯亮,巫锡勇,牟迪,等. 成都砂卵石地层双线隧道 Peck 公式参数取值研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(1): 100.
- [4] 赵军. 杭州地区某盾构区间施工地表变形预测参数的分析与确定[J]. 隧道建设, 2015, 35(10): 1003.
- [5] 魏纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1354.
- [6] 冯晓光,任建喜,王金华. 西安黄土地层盾构施工的 Peck 公式修正[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32(3): 343.
- [7] 姚爱军,卢健,邱忠旺,等. 土岩复合地层中地铁施工 Peck 沉降预测公式改进[J]. 铁道建筑, 2016(6): 83.
- [8] 郑馨,麻凤海. 长春地层地铁隧道施工的 Peck 公式改进[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(3): 732.
- [9] 张俾元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社, 2009:34.
- [10] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2010: 70.
- [11] 工程地质手册编委会. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018: 112.
- [12] 刘佑荣,唐辉明. 岩体力学[M]. 北京:化学工业出版社, 2008: 9.
- [13] Tan W L, Ranjith P G. Parameters and Considerations in Soft Ground Tunneling[J]. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2003, 8(4): 1.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 重力式码头设计与施工规范: JTS 167-2—2009[S]. 北京:人民交通出版社, 2009: 2.

(收稿日期:2019-07-28)