

# 基于改进灰色关联度法对超小净距交叉隧道爆破施工研究

于 丽<sup>1,2</sup> 路 明<sup>1,2</sup> 王明年<sup>1,2</sup> 李泽星<sup>1,2</sup> 周振宇<sup>1,2</sup>

(1 西南交通大学土木工程学院,成都 610031; 2 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室,成都 610031)

**摘 要** 在超小净距交叉隧道爆破施工时,对既有隧道扰动大,而且损伤是不可逆的,施工风险极大。因此十分有必要对超小净距交叉隧道爆破施工进行研究。文章以围岩等级、炸药量、净距和交叉角度作为影响因素进行探讨,并提出符合超小净距交叉隧道爆破的控制标准。研究结果表明:(1)对超小净距交叉隧道爆破影响最大是炸药量和净距,其次是围岩等级,最后是交叉角度;(2)当净距小于 $2D$ 时,净距对既有隧道影响最大,当净距大于 $2D$ 时,炸药量对既有隧道影响最大;(3)超小净距交叉隧道爆破施工的控制标准为振速和既有隧道衬砌变形,其中振速控制标准为 $1.73\text{ cm/s}$ ,既有隧道衬砌变形控制标准为 $1.12\text{ mm}$ 。

**关键词** 隧道工程 超小净距 改进 TOPSIS 法 爆破施工

**中图分类号**:U455.6

**文献标识码**:A

## 1 引 言

近年,我国铁路的建设里程位居世界前列,而且还有大量工程在建设中。隧道是铁路的重要组成部分之一,两条隧道之间的相对位置关系各式各样,例如平行、重叠、上跨或者下穿等。其中超小净距交叉段的施工工艺最为复杂,在硬岩中多采用爆破施工,但爆破对既有隧道扰动大,损伤是不可逆的,施工风险极大,这也是大多学者或工程师的重点研究对象。

朱正国等<sup>[1]</sup>通过数值模拟提出不同围岩级别下,不同净距交叉隧道的爆破安全振速。叶培旭等<sup>[2]</sup>通过数值模拟提出既有隧道距离大于 $30\text{ m}$ 时,影响安全振速的主要因素是距离,小于 $30\text{ m}$ 时主要影响因素是距离和炸药量。张文新<sup>[3]</sup>通过现场测试提出既有隧道爆破振速应当控制在 $2.39\sim 10.85\text{ cm/s}$ ,衬砌变形控制在 $5\text{ mm}$ 内。仇文革等<sup>[4]</sup>通过数值模拟和现场试验研究引水隧洞爆破施工对既有铁路隧道的的影响,结果表明,采用分段起爆方式能有效的减小对既有隧道的的影响,最小振速为 $2.61\text{ cm/s}$ ,满足规范要求。罗 阳等<sup>[5]</sup>通过数

值模拟和现场监测研究小净距隧道爆破的影响,结果表明,萨道夫斯基公式中场地系数为 $8.73$ ,衰减系数为 $0.83$ ,当两隧道净距大于 $50\text{ m}$ 时,爆破振速小于 $1.5\text{ cm/s}$ 。黎蜀明等<sup>[6]</sup>通过优化炮孔分布位置、炸药量和引爆方式等,实现下穿既有地铁净距为 $3.2\text{ m}$ 时,爆破振速小于深圳地铁规定的 $2.5\text{ cm/s}$ 的要求,为超小净距隧道爆破施工项目提供借鉴。

根据爆破规范<sup>[7,8]</sup>规定:铁路单洞隧道爆破安全振速为 $6\text{ cm/s}$ ,但对于既有病害的铁路隧道爆破振速需进行专家论证;为既有高铁隧道时,安全振速应再减小 $10\%$ ,而且隧道服务年限每增加 $10$ 年,爆破振动允许值降低 $10\%$ 。大多设计院要求下穿或上跨既有病害的高速铁路隧道,常规手段采用机械开挖,非常规手段采用爆破,并规定振速不大于 $2\text{ cm/s}$ 。对于硬岩,采用机械施工速度极慢,采用爆破开挖,安全振速并未从实际的炸药量、净距、围岩等方面考虑。因此本文从围岩等级、炸药量、相对距离和交叉角度方面进行超小净距交叉隧道爆破施工的相关探讨。本文依托西南地区某引水隧洞下穿既有病害的改造高速铁路隧道项目进行研

修改稿返回日期:2021-10-15

作者简介:于 丽(1978-),女,博士,教授,主要从事隧道及地下工程研究工作,E-mail:22643123@qq.com.

通过作者:路 明(1993-),男,博士研究生,主要从事隧道及地下工程研究工作,E-mail:13125741711@163.com.

究,采用组合赋权-灰色关联度法研究各影响因素对超小净距交叉隧道爆破施工的影响程度。

2 灰色关联分析原理

2.1 灰色关联法

(1)评价指标矩阵

按照灰色关联分析法,假设评价系统中有  $m$  个评价指标, $n$  个试验方案,则评价指标矩阵  $A$  为:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2)数据归一化

在系统的各评价指标中,越小越优指标如下:

$$r_{ij} = \frac{\max(a_{1j}, a_{2j}, \cdots, a_{nj}) - a_{ij}}{\max(a_{1j}, a_{2j}, \cdots, a_{nj}) - \min(a_{1j}, a_{2j}, \cdots, a_{nj})} \quad (2)$$

其中  $i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m$ 。

根据式(2)处理后,矩阵  $A$  变为  $R$ 。

(3)关联系数矩阵计算

$$\zeta_{ij} = \frac{\min_i(\min_j |k_j - r_{ij}|) - \rho \max_i(\max_j |k_j - r_{ij}|)}{|k_j - r_{ij}| + \rho \max_i(\max_j |k_j - r_{ij}|)} \quad (3)$$

式中, $\rho$  为分辨系数,且  $\rho \in [0,1]$ ,本文中取 0.5,经过式(3)处理后得到关联系数矩阵  $\zeta$ 。

$$\zeta = \begin{pmatrix} \zeta_{11} & \zeta_{12} & \cdots & \zeta_{1m} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \cdots & \zeta_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \zeta_{n1} & \zeta_{n2} & \cdots & \zeta_{nm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.2 组合赋权

组合赋权采用层次分析法进行主观赋权,采用熵值法进行客观赋权,两者结合作为综合的赋权系数,步骤如下:

对矩阵  $A$  进行归一化处理:

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (5)$$

各指标的信息熵:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m a'_{ij} \ln a'_{ij} \quad (6)$$

熵值法权重:

$$\alpha_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^m 1 - e_j} \quad (7)$$

采用层次分析法进行主观赋权;本文将按照式(8)进行组合赋权;

$$\omega_j = \frac{\alpha_j \beta_j}{\sum_{i=1}^m \alpha_j \beta_j} \quad (8)$$

式中: $\alpha$  是客观权重; $\beta$  是主观权重; $\omega$  是组合赋权。

按公式(9)计算灰色关联度:

$$\lambda = \zeta \omega \quad (9)$$

式中, $\lambda$  是灰色关联度。

3 正交试验

3.1 数值模型计算

本文采用 Midas-GTS 软件进行数值模拟,两隧道净距为  $L$ ,炸药量为  $m$ ,角度为  $\alpha$ ,围岩等级为  $R$ ,数值计算模型如图 1 所示。围岩采用摩尔-库仑本构,支护采用弹性本构。

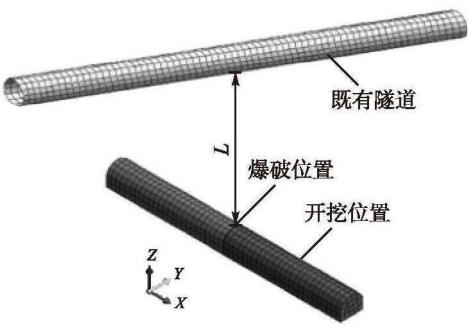


图 1 数值计算模型

Fig. 1 Numerical calculation model

围岩和支护参数根据《TB 10003—2016 铁路隧道设计规范》<sup>[11]</sup>选取,如表 1 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Parameters of materials

参数类别	弹性模量 / GPa	泊松比	粘聚力 / kPa	摩擦角 / (°)	容重 / (kN / m³)
II	60	0.2	1 500	50	25
III	18	0.25	700	39	23
IV	3.9	0.3	200	27	20
V	3	0.35	50	20	17
支护	31.5	0.2	—	—	25

3.2 正交试验设计

通过广泛调研可知,围岩等级、炸药量、交叉隧道的净距以及交叉隧道的夹角对交叉隧道爆破影响最大。因此,采用 $L_{16}(4 \times 4)$ 正交表进行正交试验设计,各水平因素如表2所示。既有隧道跨度为6.2 m,爆破施工隧道跨度为9.5 m,两隧道隧道轮廓如图2所示。

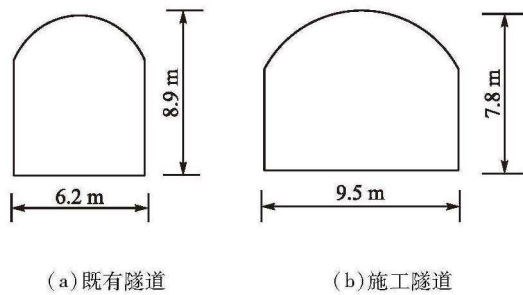


图2 隧道轮廓  
Fig.2 Contour of tunnel

表2 各水平因素  
Table 2 Factors at various levels

$R$	$m / \text{kg}$	$\alpha / (^\circ)$	$L$
II	0.5	0	1D
III	1	30	2D
IV	2	60	3D
V	3	90	4D

注:其中D为施工隧道净空跨度。

3.3 结果分析

正交试验结果如表3所示。从表中分析可知,围岩等级越差,炸药量越高,净距越小,爆破振速和既有衬砌变形越大,交叉角度对振速和既有衬砌变形无明显规律。当炸药量大于2 kg,净距小于2D组合工况时,爆破振速都很大,衬砌变形也很大;然而当炸药量小于2 kg,净距大于2D组合工况时,振速和衬砌变形都很小。最大振速和最大衬砌变形均来自工况16,振速为10.7 cm/s,衬砌变形为6.23 mm。工况5的振速最小,值为0.07 cm/s;工况13的衬砌变形最小,值为0.01 mm。

根据式(4)~式(8)可得出组合赋权的权重,其中振速的权重为0.746,衬砌变形的权重为0.254,把权重带入式(9)计算灰色关联度,结果如表4所示。从表中可知,围岩等级越高,炸药量越小,净距

越大,灰色关联度越大;交叉角度对灰色关联度无明显规律。工况16的灰色关联度最小,为0.333 3,说明工况16的施工组合最差,不满足施工要求。工况5的灰色关联度为0.999,是16组工况里最优的组合。

表3 正交试验方案和结果  
Table 3 Orthogonal test scheme and results

序号	$R$	$m / \text{kg}$	$L$	$\alpha / (^\circ)$	$v / (\text{cm} / \text{s})$	$\delta / \text{mm}$
1	II	0.5	1D	0	0.47	0.35
2	II	1	2D	30	0.44	0.32
3	II	2	3D	60	0.28	0.34
4	II	3	4D	90	0.14	0.07
5	III	0.5	4D	30	0.07	0.02
6	III	1	3D	60	0.35	0.35
7	III	2	2D	90	1.23	1.42
8	III	3	1D	0	4.6	2.43
9	IV	0.5	1D	60	1.7	0.49
10	IV	1	2D	90	0.74	0.75
11	IV	2	3D	0	1.54	1.43
12	IV	3	4D	30	2.67	2.22
13	V	0.5	4D	90	0.18	0.01
14	V	1	3D	0	1.32	0.32
15	V	2	2D	30	1.26	0.98
16	V	3	1D	60	10.7	6.23

注: $v$ 代表振速, $\delta$ 代表变形。

4 影响因素分析

利用主效应分析来研究交叉隧道爆破施工参数对既有衬砌最大变形 $\delta$ 、最大振速 $v$ 和灰色关联度的影响规律。图3所示为 $R$ 、 $m$ 、 $L$ 和 $\alpha$ 单独变化时的变化趋势,其中 $X$ 轴表示每个工艺参数的4个水平, $Y$ 轴表示每个响应的数值大小,虚线代表平均值。

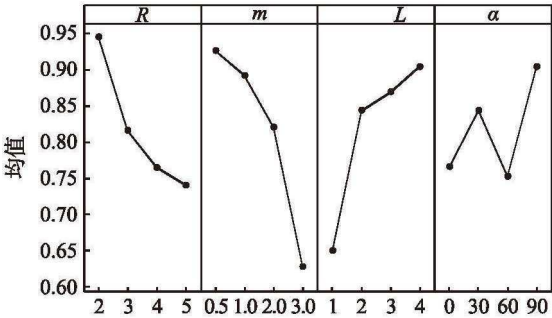
由图3(a)可知,对于灰色关联度 $\lambda$ , $m$ 对 $\lambda$ 的影响最大,其次是 $L$ 和 $R$ , $\alpha$ 对 $\lambda$ 的影响最小。其中,距离 $L$ 在2D以下时对 $\lambda$ 的影响最大,炸药量 $m$ 在2 kg以上时对 $\lambda$ 的影响最大。要使灰色关联度 $\lambda$ 最大, $R$ 取水平1, $m$ 取水平1, $L$ 和 $\alpha$ 取水平4,即 $R = \text{II}$ , $m = 0.5 \text{ kg}$ , $L = 4D$ , $\alpha = 90^\circ$ ,称为 $\text{max} - \lambda$ 参数组合。

表 4 灰色关联度分析结果  
Table 4 Results of grey relational analysis

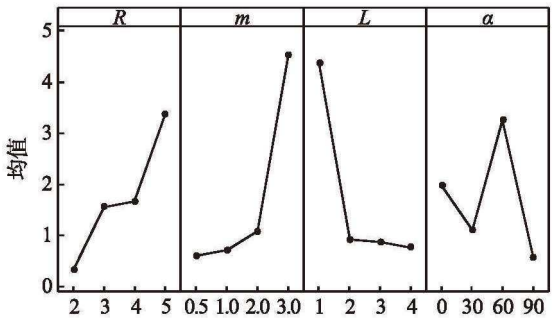
工况	R		$\zeta$		$\lambda$
	$R_v$	$R_\delta$	$\zeta_v$	$\zeta_\delta$	
1	0.962 4	0.945 3	0.930 1	0.901 4	0.921 3
2	0.965 2	0.950 2	0.934 9	0.909 4	0.927 1
3	0.980 2	0.946 9	0.961 9	0.904	0.944 2
4	0.993 4	0.990 4	0.987	0.981 2	0.985 2
5	1	0.998 4	1	0.996 8	0.999
6	0.973 7	0.945 3	0.95	0.901 4	0.935 2
7	0.890 9	0.773 3	0.820 9	0.688	0.780 4
8	0.573 8	0.610 9	0.539 8	0.562 4	0.546 7
9	0.846 7	0.922 8	0.765 3	0.866 3	0.796 1
10	0.937	0.881	0.888 1	0.807 8	0.863 6
11	0.861 7	0.771 7	0.783 3	0.686 5	0.753 8
12	0.755 4	0.644 7	0.671 5	0.584 6	0.645
13	0.989 7	1	0.979 8	1	0.986
14	0.882 4	0.950 2	0.809 6	0.909 4	0.84
15	0.888 1	0.844 1	0.817 1	0.762 3	0.800 4
16	0	0	0.333 3	0.333 3	0.333 3

由图 3(b)可知,16 组工况平均振速为 1.73 cm/s,对于振速  $v$ , $L$  和  $m$  对  $v$  的影响最大, $R$  和  $\alpha$  对  $v$  的影响较小。其中,当净距小于  $2D$  时,对振速影响最大的是净距  $L$ ;当净距大于  $2D$  时,对振速影响最大的是炸药量  $m$ 。要使振速  $v$  最小, $R$  取水平 1, $m$  取水平 1, $L$  和  $\alpha$  取水平 4,即  $R = \text{II}$ , $m = 0.5 \text{ kg}$ , $L = 4D$ , $\alpha = 90^\circ$ ,称为  $\text{min}-v$  参数组合,并把平均振速 1.73 cm/s 作为超小净距隧道施工的控制标准,满足规范要求。

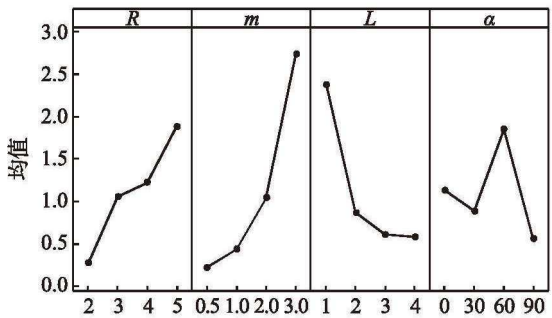
由图 3(c)可知,16 组工况平均衬砌变形为 1.12 mm,对于衬砌变形  $\delta$ , $L$  和  $m$  对  $\delta$  的影响最大, $R$  和  $\alpha$  对  $\delta$  的影响较小。其中,当净距小于  $2D$  时,对衬砌变形影响最大的是净距  $L$ ;当净距大于  $2D$  时,对衬砌变形影响最大的是炸药量  $m$ 。要使衬砌变形  $\delta$  最小, $R$  取水平 1, $m$  取水平 1, $L$  和  $\alpha$  取水平 4,即  $R = \text{II}$ , $m = 0.5 \text{ kg}$ , $L = 4D$ , $\alpha = 90^\circ$ ,称为  $\text{min}-\delta$  参数组合,并把平均衬砌变形 1.12 mm 作为超小净距隧道施工的控制标准,满足规范要求。



(a) 灰色关联度  $\lambda$  主效应图



(b) 振速  $v$  主效应图



(c) 衬砌变形  $\delta$  主效应图

图 3 主效应图

Fig. 3 Diagram for main effect

5 结 论

(1) 本文提出影响交叉隧道爆破施工的因素分别为:围岩等级、角度、炸药量、净距等,本文根据组合赋权-灰色关联度法进行计算得出影响程度为:炸药量 > 净距 > 围岩等级 > 交叉角度。

(2) 当交叉段的净距小于  $2D$  时,影响振速最大的因素是净距,当大于  $2D$  时,影响振速最大的因素是炸药量,因此可以根据此结论来进行控制爆破,确保既有隧道的振速满足要求。

(3) 本文提出超小净距交叉隧道爆破控制标准

振速为 1.73 cm/s,衬砌变形为 1.12 mm,这样能更有效地保证既有隧道的安全。

## 参考文献

## References

- [1] 朱正国,杨利海,王道远,等. 立体交叉隧道爆破动力响应和安全范围研究[J]. 铁道工程学报,2019,36(1):59-64.  
ZHU Zhengguo, YANG Lihai, WANG Daoyuan, et al. Analysis of Dynamic Response and Safety Range of Crossing Tunnel Based on Blasting Vibration[J]. Journal of Railway Engineering Society. 2019,36(1):59-64.
- [2] 叶培旭,杨新安,凌保林,等. 近距离交叉隧洞爆破对既有隧道的振动影响[J]. 岩土力学,2011,32(2):537-541.  
YE Peixu, YANG Xin'an, LING Baolin, et al. Vibration Effects on Existing Tunnel Induced by Blasting of an Adjacent Cross Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics. 2011,32(2):537-541.
- [3] 张文新. 既有隧道衬砌结构在引水洞爆破施工中的安全性分析[J]. 现代隧道技术,2016,53(4):154-158.  
ZHANG Wenxin. Safety Analysis of an Existing Tunnel Lining Structure during Water Diversion Tunnel Blasting Construction[J]. Modern Tunnelling Technology. 2016,53(4):154-158.
- [4] 仇文革,凌昊,龚伦,等. 引水隧洞下穿既有铁路隧道爆破施工振动影响及对策[J]. 中国铁道科学,2009,30(6):46-53.  
QIU Wenge, LING Hao, GONG Lun, et al. Vibration Influence on the Existed Railway Tunnel by Blasting Construction of Underpass Diversion Tunnel and Countermeasures[J]. China Railway Science, 2009,30(6):46-53.
- [5] 罗阳,杨建辉,胡东荣. 小净距隧道围岩的爆破振动影响规律研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(4):1309-1313+1336.  
LUO Yang, YANG Jianhui, HU Dongrong. Study on the Impact of Blasting Vibration on Surrounding Rock of Small Clearance Tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021,17(4):1309-1313+1336.
- [6] 黎蜀明,樊荆连,陈新华,等. 下穿既有地铁隧道电子雷管网路施工技术[J]. 工程爆破,2021,27(1):105-108.  
LI Shuming, FAN Jinglian, CHEN Xinhua, et al. Construction Technology of Electronic Detonator Network Underpassing Existing Subway Tunnel[J]. Engineering Blasting, 2021,27(1):105-108.
- [7] 中国铁道科学研究院集团有限公司. 铁路工程爆破振动安全技术规程:TB10313—2019[S]. 北京:中国铁道出版社有限公司,2019.  
China Academy of Railway Sciences Corporation Limited. Safety Technical Specification for Blasting Vibration of Railway Engineering:TB10313—2019[S]. Beijing:China Railway Publishing House Co., Ltd., 2019.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 爆破安全规程:GB6722—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2015.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Safety Regulations for Blasting:GB6722—2014[S]. Beijing:China Standard Press, 2015.
- [9] 吴波,路明,吴昱芳,等. 基于改进TOPSIS法研究隧道施工时空效应[J]. 铁道工程学报,2020,37(5):42-46+64.  
WU Bo, LU Ming, WU Yufang, et al. Research on the Time and Space Effect of Tunnel Construction Based on Improved TOPSIS Method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020,37(5):42-46+64.
- [10] WU Bo, LU Ming, HUANG Wei, et al. A Case Study on the Construction Optimization Decision Scheme of Urban Subway Tunnel Based on the TOPSIS Method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020,24:3488-3500.
- [11] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路隧道设计规范:TB10003—2016[S]. 北京:中国铁道出版社有限公司,2017.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Code for Design of Railway Tunnel:TB10003—2016[S]. Beijing:China Railway Publishing House Co. Ltd., 2017.

## Study on Blasting Construction of Super-closely-spaced Cross Tunnel Based on Improved Grey Relational Analysis

YU Li<sup>1,2</sup> LU Ming<sup>1,2</sup> WANG Mingnian<sup>1,2</sup> LI Zexing<sup>1,2</sup> ZHOU Zhenyu<sup>1,2</sup>

(1 School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2 Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

**Abstract** The blasting construction of a super-closely-spaced cross tunnel may pose disturbance to the existing tunnel, of which the damage is irreversible and the construction risk is great. So, it is very necessary to study the blasting construction of a super-closely-spaced cross tunnel. In this paper, the influencing factors of surrounding rock grade, explosive charge, spacing and intersection angle were investigated to put forward the control standards for blasting in the super-closely-spaced cross tunnel. The results indicate that: (1) the maximum influence on the blasting in the super-closely-spaced cross tunnel is explosive charge and spacing, followed by surrounding rock grade and finally crossing angle; (2) the spacing has the greatest impact on the existing tunnel when it is less than  $2D$  and the explosive charge has the greatest impact on the existing tunnel when the spacing is greater than  $2D$ ; (3) the control standards for blasting construction of the super-closely-spaced cross tunnel were vibration speed and deformation of existing tunnel lining, of which the control standard for vibration speed is  $1.73 \text{ cm/s}$  and that for deformation of existing tunnel lining is  $1.12 \text{ mm}$ .

**Keywords** Tunnel engineering; Super-close spacing; Improved TOPSIS method; Blasting construction