

文章编号: 1002-0268 (2008) 08-0001-05

# 基于灰靶理论的隧道路面结构类型选择

黄晓明<sup>1</sup>, 许涛<sup>1</sup>, 曾磊<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 广州珠江黄埔大桥建设有限公司, 广东 广州 510080)

**摘要:** 为了选择适合于隧道工作环境与交通条件的路面结构类型, 提高隧道路面的使用性能延长使用寿命, 在广泛调研的基础上, 采用灰靶理论从整体刚度、耐久性、平整度、抗滑性能、耐磨性能、修复与重建难度 6 个方面系统地比较了水泥混凝土与沥青混凝土两种常用的路面结构类型在隧道内的适用性。分析结果表明, 采用灰靶理论评判模型选择隧道路面结构类型在一定程度上克服了选择过程的主观因素, 使隧道路面的选择结果更具有客观性; 在隧道内特殊的工作环境及交通条件下沥青路面的性能更加优越, 具有更好的适用性, 能提高隧道路面抗滑性能, 降低噪音, 改善行车舒适性, 维修、养护简便, 保证隧道营运通畅, 为实体工程路面结构类型选择提供依据。

**关键词:** 道路工程; 路面结构; 灰靶理论; 路面类型选择; 公路隧道

**中图分类号:** U416.22

**文献标识码:** A

Choice of Pavement Structure in Road Tunnel Based on Grey Target Theory

HUANG Xiao-ming<sup>1</sup>, XU Tao<sup>1</sup>, ZENG Lei<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2. Guangzhou Pearl River Huangpu Bridge Construction Co. Ltd., Guangzhou Guangdong 510080, China)

**Abstract:** In order to choose the pavement structure type which is fit for working environments and traffic conditions in road tunnel to improve pavement performance and prolong its service years, grey target theory was adopted to compare the applicability of concrete pavement and asphalt pavement in aspects of whole rigidity, durability, flatness, anti-slipping performance, wear resistant, difficulty of repair and reconstruct systemically based on comprehensive questionnaire. Analytic results indicate that (1) some subjective factors can be eliminated to a certain extent based on evaluation model of grey target theory in the course of pavement type choice, which make the choice result more objective; (2) the asphalt pavement is more applicable for especial tunnel working environment to enhance surface anti-slipping performance, reduce noises, improve comfort, make maintenance expediently and keep the traffic open. It offers a reference for the choice of pavement structure in road tunnel.

**Key words:** road engineering; pavement structure; grey target theory; pavement type choice; road tunnel

## 0 引言

我国是一个多山的国家, 随着公路建设事业的迅速发展, 公路隧道因具有提高线路标准、缩短运营里程、保护生态环境等优点而越来越受到人们的青睐。到 2005 年底, 全国公路隧道达 2 889 处 (152.70 万延米)。隧道作为高速公路的咽喉部位, 对公路网交通

具有控制作用, 隧道路面使用状况直接影响了行车舒适性、安全性。由于隧道路面处于相对封闭的环境内, 直接受外界自然因素影响较少, 隧道内温度、湿度、基础强度与一般公路差别大<sup>[1]</sup>, 且渠化交通严格、加减速频繁, 隧道路面的使用性能及荷载作用下的力学响应也有其自身的特点。因此, 不同隧道路面结构类型决定了其使用性能差别也较大<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2007-04-27

基金项目: 广东省交通科学研究计划资助项目 (GCKY-1-24)

作者简介: 黄晓明 (1963-), 男, 江苏常州人, 教授, 博士生导师, 从事路基路面研究。(huangxm@seu.edu.cn)

目前,国内外关于隧道工程的研究主要集中在隧道洞体的结构设计、施工技术、通风、照明、安全等方面,而隧道和道路工程中对隧道路面的研究都较少涉及,更缺乏针对大型隧道路面结构类型选择方面的研究<sup>[3~5]</sup>。在隧道路面结构设计时通常套用公路或城市道路设计规范,造成了目前隧道路面结构类型多样、使用性能差别较大的现状。可见,根据隧道路面的具体工作环境,选择合适的隧道路面结构类型,对提高隧道路面舒适、安全、耐久等性能具有现实意义。本文在广泛调研的基础上,采用灰靶分析方法对隧道路面结构类型选择进行了研究,为实体工程路面结构类型选择提供依据。

## 1 灰靶理论

灰靶理论<sup>[6]</sup>是一种处理模式序列的灰关联分析理论。按命题信息域的要求,在一组模式序中,找出最靠近子命题目标值的数据构造标准模式,然后各模式与标准模式一起构成灰靶,则标准模式便是灰靶的靶心,按子命题的含义,远离靶心的模式为靶边,往上远离的模式称上靶边(数据大),往下远离的模式称下靶边(数据小)。每一个灰关联差异信息空间中的模式与靶心的灰关联度称靶心接近度,简称靶心度。最后可根据靶心度计算综合系数,综合系数值越大则相对应的选择方案越具优势。

## 2 基本模型的建立

### 2.1 灰模式

灰模式实际上是一个指标序列,是某一命题的某一种解决方案的关键因素序列。

$$\omega = (\omega(1), \omega(2), \dots, \omega(n)),$$

$$\forall \omega(k) \in \omega \Rightarrow k \in K = \{1, 2, \dots, n\},$$

$$i \in I = \{1, 2, \dots, m\},$$

式中, $\omega$ 为多极性指标序列,为命题 $P$ 的下灰模式; $\omega(k)$ 为 $i$ 模式 $k$ 指标的数据; $K = \{1, 2, \dots, n\}$ 为指标分布。

$\exists k^*, s^* \in K \Rightarrow POL\omega_i(k^*) \neq POL\omega_i(s^*)$ ,即任意两指标列不恒具相同极性。称 $\omega(k) = (\omega_1(k), \omega_2(k), \dots, \omega_m(k))$ 为 $k$ 指标模式列,简称 $k$ 指标列。

### 2.2 标准模式

标准模式即靶心,是命题意欲达到的最高目标。

对于 $\omega = (\omega(1), \omega(2), \dots, \omega(n))$ ,

$$\forall \omega(k) \in \omega \Rightarrow k \in K = \{1, 2, \dots, n\},$$

$$i \in I = \{1, 2, \dots, m\},$$

$$\omega(k) = (\omega_1(k), \omega_2(k), \dots, \omega_m(k)),$$

$$\forall \omega(k) \in \omega \Rightarrow i \in I = \{1, 2, \dots, m\}。$$

令 $POL(max)$ 、 $POL(min)$ 、 $POL(mem)$ 分别为极大值极性、极小值极性、适中值极性,则

当 $POL\omega(k) = POL(max)$ 时,取 $\omega_0(k) = \max_i \omega_i(k), \omega_i(k) \in \omega(k)$ ;

当 $POL\omega(k) = POL(min)$ 时,取 $\omega_0(k) = \min_i \omega_i(k), \omega_i(k) \in \omega(k)$ ;

当 $POL\omega(k) = POL(mem)$ 时,取 $\omega_0(k) = u_0$ (指定值),或 $\omega_0(k) = \text{avg} \omega_i(k), \omega_i(k) \in \omega(k)$ 。

则称序列 $\omega_0 = (\omega_0(1), \omega_0(2), \dots, \omega_0(n))$ 为标准模式。

### 2.3 灰靶变换

若 $\tau\omega_i(k) = x_i(k)$ ,

$$\tau\omega_i(k) = \frac{\min\{\omega_i(k), \omega_0(k)\}}{\max\{\omega_i(k), \omega_0(k)\}},$$

称 $T$ 为灰靶变换; $x_i(k)$ 为统一测度变换值。

### 2.4 灰关联因子集与灰关联差异信息空间

灰关联因子集为:

$$@_{GRF} = \{x_i | i \in I, x_i = \tau\omega_i, \omega_i \in @_{NU}\}。$$

灰关联差异信息空间为:

$$\Delta_{GR} = (\Delta, \zeta, \Delta_{0i}(max), \Delta_{0i}(min)),$$

$$\Delta = \{\Delta_{0i}(k) | i \in I = \{1, 2, \dots, m\}, k \in K = \{1, 2, \dots, n\},$$

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)| = |1 - x_i(k)|,$$

$$x_0(k) \in x_0 \Rightarrow x_0 = \tau\omega_0\},$$

$$\zeta = 0.5,$$

$$\Delta_{0i}(max) = \max_i \max_k \Delta_{0i}(k) = \max_i \max_k |1 - x_i(k)|,$$

$$\Delta_{0i}(min) = \min_i \min_k \Delta_{0i}(k) = \min_i \min_k |1 - x_i(k)|。$$

### 2.5 靶心系数

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{0i}(k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}{\Delta_{0i}(k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}。$$

### 2.6 靶心度

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k)),$$

式中, $\alpha_k$ 为权重系数。

### 2.7 综合系数

$$\Psi = \sum_{i=1}^m \gamma(x_0, x_i)。$$

## 3 原始序列的确定

此灰靶分析的命题为隧道路面结构类型的选择。分析的模式,也即对比的方案主要有:沥青混凝土路

面 and 水泥混凝土路面。根据隧道在路网中的重要地位及隧道路面特殊的工作环境,为了最大限度地满足隧道路面舒适、安全、耐久的需要,隧道路面应具有如下各项性能。

### (1) 整体刚度

隧道路面虽然具有较强的基础,但是在行车荷载的直接作用下,在面层内部产生较大的应力、应变。如果路面结构层的强度和刚度不足,难以适应不同围岩级别变化,则路面就会出现断裂、沉陷、波浪或车辙病害,使路面使用状况恶化,服务水平降低<sup>[7]</sup>。

### (2) 耐久性

隧道内空间有限、维修困难,而且隧道往往是两地交通的咽喉,因此作为隧道行车的主要部分,隧道路面不但要有较好的行使舒适性,更要有足够的耐久性,尽量减少隧道路面在其服务期内的维修次数,保证行车畅通<sup>[8]</sup>。

### (3) 表面平整度

表面平整度直接影响行车舒适性、安全性及运输效益。不平整的路表面会增大行车阻力,并使车辆产生附加的振动作用,这种振动不仅会造成行车颠簸,影响行车速度、行车的安全性及驾驶的平稳性、乘客的舒适性,而且会对路面形成冲击力,加剧路面和车辆部件的磨损,并增加油耗。

### (4) 表面抗滑性能

路面表面要求平整,但不宜光滑,光滑的表面不仅影响行车速度、增加油耗,而且容易使得车辆打滑从而引发交通事故<sup>[9]</sup>。隧道的行驶条件特殊,车辆的制动、加速比较频繁,路面抗滑性能不足则易引发交通事故,因此,在隧道内尤其要注意路面的抗滑性能。

### (5) 表面耐磨性能

隧道路面的表面不但要抗滑,而且要耐磨,也就是要隧道路面长时间保持较高的抗滑性能<sup>[10]</sup>。

### (6) 修复与重建难度

对于隧道中的路面而言,一方面要求其具有一定的耐久性,使其可长时间保持一定的服务性能,但是,由于一些不确定因素的存在使得路面出现一些病害。为了尽快恢复路面的通行性能,则在路面型式选择时,其修复与重建的难度有必要作为一项参数予以考虑<sup>[11,12]</sup>。

对于沥青混凝土路面和水泥混凝土路面而言,经过多年的建设及使用,建设方、管理方及使用方对其基本性能都有了一定的了解,但是针对以上几点性能,长期以来并没有形成具体的数量参数。为了对以

上路面结构类型进行比较,以优选出比较适合隧道内使用的路面型式,对于灰靶分析中的原始数据通过有关人员(包括科研、设计、建设等方面)评定的方法得到,即邀请有关方面人员按照设计好的表格和原先规定的评定等级对评判对象进行评价。然后统计各因素( $\omega_i, i=1,2,\dots,m$ )的各评价等级( $\omega_i(k), k=1,2,\dots,n$ )的频数  $d_{ik}$ ,则

$$\omega_i(k) = d_{ik} / n,$$

式中, $n$ 为参与评价的专家人数; $\omega_i(k)$ 为指标值。

本文设计的隧道路面评价表格如表1所示。

表1 隧道路面评价表

Tab. 1 Evaluation table of pavement in road tunnel

| 因素                    | 沥青混凝土路面       |               |               |               | 水泥混凝土路面       |               |               |               | 备注 |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----|
|                       | 优             | 良             | 中             | 差             | 优             | 良             | 中             | 差             |    |
|                       | $\omega_1(1)$ | $\omega_1(2)$ | $\omega_1(3)$ | $\omega_1(4)$ | $\omega_1(1)$ | $\omega_1(2)$ | $\omega_1(3)$ | $\omega_1(4)$ |    |
| 强度和刚度 $\omega_1(k)$   |               |               |               |               |               |               |               |               |    |
| 耐久性 $\omega_2(k)$     |               |               |               |               |               |               |               |               |    |
| 表面平整度 $\omega_3(k)$   |               |               |               |               |               |               |               |               |    |
| 表面抗滑性能 $\omega_4(k)$  |               |               |               |               |               |               |               |               |    |
| 表面耐磨性能 $\omega_5(k)$  |               |               |               |               |               |               |               |               |    |
| 修复、重建难度 $\omega_6(k)$ |               |               |               |               |               |               |               |               |    |

## 4 标准模式的确定

为了对两种路面结构型式进行适应性比较,需要确定一个标准的模式,作为两者比较的参量,针对本文指标列的具体型式,本文中取灰靶分析的标准模式为  $\omega_0 = (1, 1, 1, 1)$ 。

在靶心度计算中为了体现不同评价等级的优先度,对几种等级分别取权重系数见表2。

表2 权重分配表

Tab. 2 Weight assignment table

| 评价等级 | 优 | 良 | 中 | 差  |
|------|---|---|---|----|
| 权重   | 3 | 2 | 1 | -1 |

### 4.1 原始数列的确定

本文选择了具有代表性的30多位专家及有关人员来进行隧道路面选型因素权重的确定。被咨询人员包括公路界科研、设计人员,施工、管理、养护人员。他们均有中高级职称,经验丰富,熟悉路面专业技术和管理,因此具有充分的代表性,评价结果具有较高的可信

度。

对回馈的各评价表进行数据统计处理后得到的各指标列数据如表3所示。

表3 灰靶分析的原始数列

Tab.3 Original data of grey target analysis

| 因素            | 沥青混凝土路面       |               |               |               | 水泥混凝土路面       |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|               | $\omega_1(1)$ | $\omega_1(2)$ | $\omega_1(3)$ | $\omega_1(4)$ | $\omega_1(1)$ | $\omega_1(2)$ | $\omega_1(3)$ | $\omega_1(4)$ |
| $\omega_1(k)$ | 0.247         | 0.538         | 0.186         | 0.029         | 0.564         | 0.337         | 0.099         | 0             |
| $\omega_2(k)$ | 0.163         | 0.215         | 0.572         | 0.050         | 0.583         | 0.303         | 0.114         | 0             |
| $\omega_3(k)$ | 0.725         | 0.275         | 0             | 0             | 0.720         | 0.250         | 0.030         | 0             |
| $\omega_4(k)$ | 0.579         | 0.285         | 0.136         | 0             | 0.169         | 0.225         | 0.306         | 0.210         |
| $\omega_5(k)$ | 0.376         | 0.538         | 0.086         | 0             | 0.115         | 0.534         | 0.351         | 0             |
| $\omega_6(k)$ | 0.714         | 0.243         | 0.043         | 0             | 0             | 0             | 0.572         | 0.428         |

#### 4.2 灰靶变换

依据下式对表3进行灰靶变换,经灰靶变换后的结果如表4所示。

$$\pi\omega_i(k) = \frac{\min\{\omega_i(k), \omega_0(k)\}}{\max\{\omega_i(k), \omega_0(k)\}},$$

其中标准模式  $\omega_0 = (1, 1, 1, 1)$ , 且  $\pi\omega_0 = x_0 = (1, 1, 1, 1)$ 。

表4 灰靶变换后数据值

Tab.4 Data after grey target transform

| 灰靶变换             | 沥青混凝土路面       |               |               |               | 水泥混凝土路面       |               |               |               |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                  | $\pi\omega_1$ | $\pi\omega_2$ | $\pi\omega_3$ | $\pi\omega_4$ | $\pi\omega_1$ | $\pi\omega_2$ | $\pi\omega_3$ | $\pi\omega_4$ |
|                  | (1)           | (2)           | (3)           | (4)           | (1)           | (2)           | (3)           | (4)           |
| $\pi\omega_1(k)$ | 0.247         | 0.538         | 0.186         | 0.029         | 0.564         | 0.337         | 0.099         | 0             |
| $\pi\omega_2(k)$ | 0.163         | 0.215         | 0.572         | 0.050         | 0.583         | 0.303         | 0.114         | 0             |
| $\pi\omega_3(k)$ | 0.725         | 0.275         | 0             | 0             | 0.720         | 0.250         | 0.030         | 0             |
| $\pi\omega_4(k)$ | 0.579         | 0.285         | 0.136         | 0             | 0.169         | 0.225         | 0.306         | 0.210         |
| $\pi\omega_5(k)$ | 0.376         | 0.538         | 0.086         | 0             | 0.115         | 0.534         | 0.351         | 0             |
| $\pi\omega_6(k)$ | 0.714         | 0.243         | 0.043         | 0             | 0             | 0             | 0.572         | 0.428         |

可见,表3与表4中数据一致,这是因为标准模式为  $\omega_0 = (1, 1, 1, 1)$ , 其值的大小没有发生变化。

#### 4.3 灰关联差异信息空间

首先根据下式确定差异信息集  $\Delta$ , 计算结果见表5。

$$\Delta = \{\Delta_{0i} | i \in I = \{1, 2, 3, 4\}\},$$

$$\Delta_{0i} = (\Delta_{0i}(1), \Delta_{0i}(2), \Delta_{0i}(3), \Delta_{0i}(4)),$$

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)| = |1 - x_i(k)|。$$

根据表5中的数据,则灰关联差异信息空间为:

$$\Delta_{GR} = (\Delta, \zeta, \Delta_{0i}(max), \Delta_{0i}(min)),$$

$$\Delta = \{\Delta_{01}, \Delta_{02}, \Delta_{03}, \Delta_{04}, \Delta_{05}, \Delta_{06}\},$$

$$\zeta = 0.5。$$

对于沥青混凝土路面:  $\Delta_{0i}(max) = 1, \Delta_{0i}(min) = 0.275$ 。

表5 差异信息集

Tab.5 Information set of diversity

| 差异信息集            | 沥青混凝土路面          |                  |                  |                  | 水泥混凝土路面          |                  |                  |                  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                  | $\Delta_{0i}(1)$ | $\Delta_{0i}(2)$ | $\Delta_{0i}(3)$ | $\Delta_{0i}(4)$ | $\Delta_{0i}(1)$ | $\Delta_{0i}(2)$ | $\Delta_{0i}(3)$ | $\Delta_{0i}(4)$ |
| $\Delta_{01}(k)$ | 0.753            | 0.462            | 0.814            | 0.971            | 0.436            | 0.663            | 0.901            | 1                |
| $\Delta_{02}(k)$ | 0.837            | 0.785            | 0.428            | 0.950            | 0.417            | 0.697            | 0.886            | 1                |
| $\Delta_{03}(k)$ | 0.275            | 0.725            | 1                | 1                | 0.280            | 0.750            | 0.970            | 1                |
| $\Delta_{04}(k)$ | 0.421            | 0.715            | 0.864            | 1                | 0.831            | 0.775            | 0.694            | 0.790            |
| $\Delta_{05}(k)$ | 0.624            | 0.462            | 0.914            | 1                | 0.885            | 0.466            | 0.649            | 1                |
| $\Delta_{06}(k)$ | 0.286            | 0.757            | 0.957            | 1                | 1                | 1                | 0.428            | 0.572            |

对于水泥混凝土路面:  $\Delta_{0i}(max) = 1, \Delta_{0i}(min) = 0.325$ 。

#### 4.4 靶心系数

对于沥青混凝土路面:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{0i}(k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}{\Delta_{0i}(k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)} = \frac{0.775}{\Delta_{0i}(k) + 0.5}。$$

对于水泥混凝土路面为:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{0i}(k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}{\Delta_{0i}(k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)} = \frac{0.825}{\Delta_{0i}(k) + 0.5}。$$

将表5中的数据代入上述两式,可得靶心系数值,如表6所示。

表6 靶心系数值

Tab.6 Coefficient of grey target center

| 靶心系数                     | 沥青混凝土路面                  |                          |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                          | $\gamma(x_0(1), x_i(1))$ | $\gamma(x_0(2), x_i(2))$ | $\gamma(x_0(3), x_i(3))$ | $\gamma(x_0(4), x_i(4))$ |
| $\gamma(x_0(k), x_1(k))$ | 0.618 516                | 0.805 613                | 0.589 802                | 0.526 852                |
| $\gamma(x_0(k), x_2(1))$ | 0.579 656                | 0.603 113                | 0.835 129                | 0.534 483                |
| $\gamma(x_0(k), x_3(1))$ | 1                        | 0.632 653                | 0.516 667                | 0.516 667                |
| $\gamma(x_0(k), x_4(1))$ | 0.841 477                | 0.637 86                 | 0.568 182                | 0.516 667                |
| $\gamma(x_0(k), x_5(1))$ | 0.689 502                | 0.805 613                | 0.548 091                | 0.516 667                |
| $\gamma(x_0(k), x_6(1))$ | 0.986 005                | 0.616 547                | 0.531 915                | 0.516 667                |

| 靶心系数                     | 水泥混凝土路面                  |                          |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                          | $\gamma(x_0(1), x_i(1))$ | $\gamma(x_0(2), x_i(2))$ | $\gamma(x_0(3), x_i(3))$ | $\gamma(x_0(4), x_i(4))$ |
| $\gamma(x_0(k), x_1(k))$ | 0.833 333                | 0.670 679                | 0.556 745                | 0.52                     |
| $\gamma(x_0(k), x_2(1))$ | 0.850 6                  | 0.651 629                | 0.562 771                | 0.52                     |
| $\gamma(x_0(k), x_3(1))$ | 1                        | 0.624                    | 0.530 612                | 0.52                     |
| $\gamma(x_0(k), x_4(1))$ | 0.586 026                | 0.611 765                | 0.653 266                | 0.604 651                |
| $\gamma(x_0(k), x_5(1))$ | 0.563 177                | 0.807 453                | 0.678 851                | 0.52                     |
| $\gamma(x_0(k), x_6(1))$ | 0.52                     | 0.52                     | 0.840 517                | 0.727 612                |

#### 4.5 靶心度

根据式  $\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k))$  与表6,可计算得到各因素的靶心度,见表7。

表 7 靶心度值

Tab. 7 Grey target center approaching value

| 靶心度                | 沥青混凝土路面   | 水泥混凝土路面   |
|--------------------|-----------|-----------|
| $\gamma(x_0, x_1)$ | 0.882 431 | 0.969 526 |
| $\gamma(x_0, x_2)$ | 0.811 46  | 0.974 457 |
| $\gamma(x_0, x_3)$ | 1.066 327 | 1.064 653 |
| $\gamma(x_0, x_4)$ | 0.962 916 | 0.757 555 |
| $\gamma(x_0, x_5)$ | 0.927 789 | 0.865 822 |
| $\gamma(x_0, x_6)$ | 1.051 59  | 0.678 226 |

4.6 综合系数

根据式  $\Psi = \sum_{i=1}^m \gamma(x_0, x_i)$  计算综合系数, 如表 8 所示。

表 8 综合系数值

Tab. 8 Compositive coefficient

| 综合系数   | 沥青混凝土路面  | 水泥混凝土路面  |
|--------|----------|----------|
| $\Psi$ | 5.702 51 | 5.310 24 |

计算结果表明, 沥青路面的综合系数要大于水泥路面的综合系数。对几项基本性能综合考评后可知, 沥青混凝土路面的性能更加优越, 更适合用于隧道路面。

5 结论

针对隧道路面处于温差小、湿度大、加减速频繁等特殊的工作环境条件, 采用调查与理论分析相结合的方法, 基于灰靶理论评判模型, 使隧道路面类型选择中的定性数据定量化, 在一定程度上克服了人为的主观因素影响, 使隧道路面的选择更客观, 较好满足隧道路面的使用要求。

经综合评判, 在隧道内特殊的工作环境交通条件下, 沥青路面具有更好的适用性, 能提高隧道路面抗滑性能, 减少交通事故, 降低噪音, 改善行车舒适性, 维修、养护简便, 保证隧道营运通畅, 为实体工程路面结构类型选择提供依据。

参考文献:

References:

[1] 杨良, 郭忠印, 杨学良, 等. 公路隧道路面工作环境调研与分析 [J]. 公路, 2004 (2): 148 - 150.  
YANG Liang, GUO Zhong-yin, YANG Xue-liang, et al. Field Survey and Analysis of Working Environments of Highway Tunnel Pavement [J]. Highway, 2004 (2): 148 - 150.

[2] 杨群, 郭忠印, 陈立平, 等. 考虑水平荷载的公路隧道复合式路面表面拉应力分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (1): 16 - 19.  
YANG Qun, GUO Zhong-yin, CHEN Li-ping. Stress Analysis of Compound Pavement in Road Tunnel Considering Level Loads [J]. Journal of Highway and Transportation Research

and Development, 2006, 23 (1): 16 - 19.

[3] CARVEL R O, BEARD A N, JOWITT P W. The Influence of Tunnel Geometry and Ventilation on the Heat Release Rate of Fire [J]. Fire Technology, 2004, 40 (1): 5 - 26.

[4] GAO P Z, LIU S L, CHOW W K, et al. Large Eddy Simulations for Studying Tunnel Smoke Ventilation [J]. Tunnel and Underground Technology, 2004, 19 (6): 577 - 586.

[5] WU Y, BAKER M Z A. Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems: a Study of Critical Velocity [J]. Fire Safety Journal, 2000, 35 (1): 363 - 390.

[6] 邓聚龙. 灰理论基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 171 - 195.  
DENG Ju-long. Grey Theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 171 - 195.

[7] 丁春林, 周顺华, 高振岗. 重载汽车对既有盾构隧道路面板及支撑结构强度和变形的影响 [J]. 中国公路学报, 2000, 13 (1): 44 - 47.  
DING Chun-lin, ZHOU Shun-hua, GAO Zhen-gang. The Effects of Heavy-duty Automobile on Strength and Deformation of Road Slab and Brace Structure for Existing Shield Tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13 (1): 44 - 47.

[8] 王宏畅, 李国芬, 黄晓明. 高等级沥青路面表面裂缝扩展规律及寿命研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (7): 10 - 14.  
WANG Hong-chang, LI Guo-fen, HUANG Xiao-ming. Research on Propagation and Fatigue Life of Asphalt Pavement Surface Crack [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (7): 10 - 14.

[9] 杨学良, 杨良, 杨群, 等. 隧道路面表面抗滑性能的调查与分析 [J]. 公路, 2003 (12): 137 - 139.  
YANG Xue-liang, YANG Liang, YANG Qun, et al. Field Survey and Analysis About Skid Resistance of Tunnel Pavements [J]. Highway, 2003 (12): 137 - 139.

[10] 何家祥, 马路, 邓卫东. 高速公路隧道交通安全问题及对策分析 [J]. 公路交通技术, 2006 (3): 130 - 133.  
HE Jia-xiang, MA Lu, DENG Wei-dong. Highway Tunnel Traffic Safety and Counter Measures Analysis [J]. Technology of Highway and Transport, 2006 (3): 130 - 133.

[11] 王朝辉, 王选仓, 高建立. 高等级公路复合式路面养护标准 [J]. 长安大学学报 (自然科学), 2007, 27 (6): 19 - 24.  
WANG Chao-hui, WANG Xuan-cang, GAO Jian-li. Maintenance Standards of Composite Pavement on High-level Highway [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2007, 27 (6): 19 - 24.

[12] LING H I, LIU HUABEI. Finite Element Studies of Asphalt Concrete Pavement Reinforced with Geogrid [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129 (7): 801 - 811.