

# 海底隧道岩石覆盖层厚度基于群组的层次分析决策方法

张 宇<sup>1, 2</sup>, 周健南<sup>1</sup>, 纪 冲<sup>1</sup>

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 武警工程学院, 陕西 西安 710086)

**摘要:** 最优化技术在决策分析中占着极重要的位置。层次分析法(AHP)是将决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法。基于群组层次分析法的评价指标体系设计方法, 它既能体现层次分析法(AHP)的优点, 又能较好地弥补层次分析法AHP法的不足。本文以厦门海底隧道为工程背景, 就海底隧道埋深提出了基于群组层次分析法。拟请一组专家对影响海底隧道厚度的因素进行评价, 根据专家的判断能力, 给出判断力权值, 得到最小岩石覆盖厚度的重要性因子, 给出不同方法的权值, 经加权分析后最终确定最小岩石覆盖厚度。

**关键词:** 海底隧道; 最小岩石覆盖厚度; 层次分析法

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)04-0638-07

作者简介: 张 宇(1983-), 女, 陕西西安人, 博士研究生, 主要从事地下洞室方面的研究。E-mail: [zhangyu1983xinxin@163.com](mailto:zhangyu1983xinxin@163.com)。

## Rock covering thickness of sub-sea tunnels based on group AHP

ZHANG Yu<sup>1, 2</sup>, ZHOU Jian-nan<sup>1</sup>, JI Chong<sup>1</sup>

(1. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China; 2. Engineering College of the Chinese Armed Police Force, Xi'an 710086, China)

**Abstract:** Optimization technology is an important method in the decision-making analysis. Analytical Hierarchy Process (AHP) is a decision-making method. It divides the elements of decision-making into objectives, guidelines, programs and other levels. On the basis of these, some qualitative and quantitative analyses are being carried on. The evaluation index system method based on the group's level of AHP not only reflects the advantages of the AHP, but also makes up for the disadvantages. An AHP based on the group's level was put forward to determine the rock covering thickness of the sub-sea tunnels. According to the AHP, a specialist panel should be invited to evaluate the factors which affect the thickness of the sub-sea tunnels. Weight of each the specialists' judgment is decided according to the ability of the specialists to suggest the most optimized matrix. The minimum thickness of rock covering would be determined finally by the weighted analysis. The new method is named as the AHP of the rock covering thickness of the sub-sea tunnels. This method was applied to analyze the rock covering thickness of Xiamen sub-sea tunnel.

**Key words:** sub-sea tunnel; minimum rock covering; analytic hierarchy process

## 0 引言

最优化技术在决策分析中占着极重要的位置, 数学模型在最优化技术中占着统治地位; 由于系统越来越复杂, 数学模型也越来越复杂, 掌握运用困难很多, 并且随着复杂性增加, 模型解与实际要求的距离也在增加。事实上, 数学模型也非万能, 决策中大量因素无法定量表示, 所以, 有时人们不得不回到决策的起点和终点——人的选择和判断, 需要认真地研究选择和判断的规律, 这就是AHP产生的背景<sup>[1-3]</sup>。匹兹堡大学Saaty于七十年代中期提出层次分析法(AHP), 于80年代初由Saaty的学生介绍到我国。层次分析法(AHP)

是将决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法。本文所用的基于群组层次分析法的评价指标体系设计方法, 它既能体现层次分析法(AHP)的优点, 又能较好地弥补层次分析法AHP法的不足。

影响海底隧道最小顶板厚度主要有以下几个因素: 围岩的稳定性; 隧道轮廓外形与主体尺寸; 纵坡坡度; 海水的作用; 施工开挖方法; 各种辅助措施和已建经验。而挪威经验法<sup>[4]</sup>是通过对已建海底隧道岩

石覆盖厚度进行统计分析, 得出最小岩石覆盖厚度与对应的海水深度、基岩埋深的经验曲线。这里仅作为数值计算的岩石覆盖层厚度初选值, 实际上并不影响分析结果; 顶水采煤法<sup>[5]</sup>仅考虑防突水, 取值较小; 日本经验方法<sup>[6-10]</sup>是考虑的是涌水问题, 直接影响隧道的安全和运营成本; 数值计算<sup>[11-13]</sup>综合考虑了分析位置地质构造和地层变化情况, 有较大的参考价值。所以本文分别取数值计算、日本经验法、顶水采煤法作为三种可选方案, 用权值分析法确定各个方法的权重, 最终确定海底隧道的岩石覆盖层厚度<sup>[13]</sup>。

## 1 层次分析法简介

### 1.1 层次分析法(AHP)的基本原理

层次分析法首先是把要决策的问题按总目标、各层子目标、评价准则以及具体的备择方案的顺序分解为不同的层次, 并建立递阶层次结构和两两判断矩阵; 然后利用求判断矩阵特征向量的办法, 求得每一层的各元素对上一层元素的优先权重, 最后再用加权和的方法求解目标的总权重, 总权重值最大者即为最优方案。

本文运用权值分析法的基本原理, 根据经验获得用各种方法求得的海底隧道岩石覆盖层厚度的权重, 对其进行优化分析, 最终确定其覆盖层厚度。

### 1.2 层次分析法(AHP)的优点

从层次分析法的原理、步骤、应用等方面来看它有以下优点:

(1) 系统性。层次分析把研究对象作为一个系统, 按照目标分解、比较判断、综合思维方式进行决策, 是成为继机理分析、统计分析之后发展起来的系统分析的一种重要工具。

(2) 实用性。层次分析把定性和定量方法结合起来, 能处理许多用传统的最优化技术无从着手的实际问题, 应用范围很广。同时, 这种方法将决策者与决策分析者之间建立了一种有效的沟通方式, 决策者甚至可以直接应用它进行决策, 这就增加了决策的有效性。

(3) 简洁性。层次分析的基本原理和基本步骤容易理解, 计算也非常简便, 所得结果简单明确, 容易为决策者了解和掌握。

### 1.3 层次分析法(AHP)存在的问题

(1) 解决群体专家权重评价时, 没有剔除个别偏差很大专家意见的干扰, 从而使结果出现较大的失真, 往往只因为个别较大的离异意见而使最后的综合权重面目全非。

(2) 计算综合权重时, 只将各专家意见作算术平均, 结果容易出现较大的离散性。

(3) 层次分析法对各种方法计算的覆盖层厚度的准确性可作评价, 但是专家系统的权衡分析往往是一个主观的模糊处理过程, 层次分析法缺乏这种处理能力。

(4) 在用层次分析法对各种方法计算的覆盖层厚度的准确性进行判断时会出现极端的特征值, 不利于最后求解的准确性。

鉴于以上原因, 本章提出了基于群组层次分析法的确定最优水下岩基隧道最小覆盖层厚度评价指标体系设计方法, 它既能体现层次分析法(AHP)的优点, 又能较好地弥补层次分析法AHP法的不足。

### 1.4 AHP的基本步骤

用AHP解决问题, 有4个步骤:

#### (1) 确定风险层次

隧道岩石覆盖层厚度由m个影响因素构成, 每个因素又由若干个二级因素构成, 一级指标设为( $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m$ ), 二级指标设为( $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ ),  $i=(1, 2, \dots, m)$ , 如图1所示。

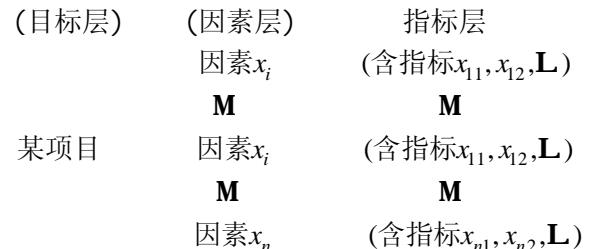


图1 层次分析图

Fig. 1 Hierarchical analysis

#### (2) 构造两两比较判断矩阵

#### (3) 确定专家权重

定义1 在一组m个专家中, 如果规定某一专家的判断力权值为1, 则称该专家为单位权专家。则均方差为 $d_i^2$ 的第i个专家判断力权值为

$$P_i = \frac{C}{d_i^2} = \frac{d^2}{d_i^2} \quad (1)$$

上式中, 比例常数C为“单位权专家”判断随机变量的均方差; 记( $I_{\max}^{(k)}$ )为指标层判断矩阵 $A_i$ 的最大特征值, 则 $A_i$ 的一致性指标定义为

$$m_i = \frac{I_{\max}^{(i)} - n}{n - 1}, \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

一致性指标 $\mu_i$ 越大,  $A_i$ 越不符合要求, 因此可以认为专家的判断能力与 $A_i$ 的大小成反比。所以在求判断力权值时可将 $\mu_i$ 考虑进去, 不妨设 $P_i = P(\mu_i)$ , 由于 $\mu_i$ 的取值可以连续, 所以只要选取适当的单调递减的连续函数 $P(x)$ 作为 $\mu_i$ 与 $P_i$ 的关系函数, 假设采用单调递减函数, 通常取:

$$P(x) = e^{-10(m-1)x}, \quad (3)$$

则可以得到第*i*个专家判断力权值的表达式为

$$P_i = e^{-10(m-1)m_i} \quad (4)$$

将所有专家判断力权值进行规范化，则有专家的权重向量  $w$  为

$$w_k = \frac{e^{-10(m-1)m_k}}{\sum_{i=1}^m e^{-10(m-1)m_i}} \quad ,$$

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_k, \dots, w_m), \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

(4)计算各层元素组合权重，并进行一致性检验。

## 2 层次分析模型

基于群组的层次分析决策方法应用实例：厦门海底隧道是连接厦门本岛与陆地的重要通道（工程地理位置见图 2 所示）。



图 2 工程地理位置

Fig. 2 Geological location

表 1 调查信息表 1

Table 1 Survey information sheet 1

对比因素	非 常 不重要 (1/7)	明 显 不重要 (1/5)	稍 微 不重要 (1/3)	同 样 重 要 (1)	稍 微 重 要 (3)	明 显 重 要 (5)	极 端 重 要 (7)
	各得分出现的频率						
围岩的稳定性 B1/隧道轮廓外形与主体尺寸 B2	0	0	0	2	7	11	0
围岩的稳定性 B1/纵坡坡度 B3	0	0	1	2	5	11	1
围岩的稳定性 B1/海水的作用 B4	0	2	6	7	4	1	0
围岩的稳定性 B1/施工开挖方法 B5	0	2	1	5	7	5	0
围岩的稳定性 B1/各种辅助措施 B6	0	0	2	3	5	10	0
围岩的稳定性 B1/已建经验 B7	0	1	5	7	6	1	0
隧道轮廓外形与主体尺寸 B2/纵坡坡度 B3	5	1	6	6	2	0	0
隧道轮廓外形与主体尺寸 B2/海水的作用 B4	9	5	4	1	1	0	0
隧道轮廓外形与主体尺寸 B2/施工开挖方法 B5	9	1	2	6	2	0	0
隧道轮廓外形与主体尺寸 B2/各种辅助措施 B6	0	0	2	5	12	1	0
隧道轮廓外形与主体尺寸 B2/已建经验 B7	0	1	13	2	1	3	0
纵坡坡度 B3/海水的作用 B4	0	5	11	4	0	0	0
纵坡坡度 B3/施工开挖方法 B5	0	3	7	5	3	2	0
纵坡坡度 B3/各种辅助措施 B6	0	2	5	7	5	1	0
纵坡坡度 B3/已建经验 B7	0	4	10	4	2	0	0
海水的作用 B4/施工开挖方法 B5	0	1	1	5	7	5	1
海水的作用 B4/各种辅助措施 B6	0	0	3	2	3	8	4
海水的作用 B4/已建经验 B7	0	0	2	5	12	1	0
施工开挖方法 B5/各种辅助措施 B6	0	2	3	13	2	0	0
施工开挖方法 B5/已建经验 B7	0	4	10	2	3	1	0
各种辅助措施 B6/已建经验 B7	0	5	9	3	2	1	0

目标 G：确定最小岩石覆盖厚度。3 种可选方案：A1 数值计算；A2 日本经验法；A3 顶水采煤经验法。选择准则：B1 围岩的稳定性；B2 隧道轮廓外形与主体尺寸；B3 纵坡坡度；B4 海水的作用；B5 施工开挖方法；B6 各种辅助措施；B7 已建经验。试用 AHP 方法决策确定哪种方案。

本模型拟请一组专家（20 人）对影响海底隧道厚度的因素进行评价（调查信息表见表 1、表 3）。根据专家的判断能力，给出判断力权值，再通过适当的数学处理方法，可得最优判断矩阵，这种层次分析法中构造判断矩阵的新方法，称为群组层次分析法的确定最优水下岩基隧道最小覆盖层厚度评价指标体系设计方法。

### 2.1 建立递阶层次结构

建立如图 3 所示的层次结构图。

### 2.2 构造两两比较判断矩阵

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (6)$$

在单准则下分别构造，即在 G 下对 B1、B2、B3、B4、B5、B6、B7，构造 A；分别在 B1、B2、B3、B4、B5、B6、B7 下对 A1、A2、A3 构造 A。

在单一准则下，如何具体构造两两比较判断矩阵  $A = (a_{ij})$  呢？即如何具体确定比值  $a_{ij}$  呢？在 AHP 中采用 1-7 比例标度法。

表 2 准则层各因素重要性比例的计算结果

Table 2 Calculated results of importance of various factors

对比因素	评分均值	设计均值
围岩的稳定性 B1/隧道轮廓外形与主体尺寸 B2	3.9000	3.90
围岩的稳定性 B1/纵坡坡度 B3	3.9667	3.97
围岩的稳定性 B1/海水的作用 B4	1.3200	1.32
围岩的稳定性 B1/施工开挖方法 B5	2.5867	2.59
围岩的稳定性 B1/各种辅助措施 B6	3.4333	3.43
围岩的稳定性 B1/已建经验 B7	1.5933	1.59
隧道轮廓外形与主体尺寸 B2/纵坡坡度 B3	0.7457	0.75
隧道轮廓外形与主体尺寸 B2/海水的作用 B4	0.3810	0.38
隧道轮廓外形与主体尺寸 B2/施工开挖方法 B5	0.7076	0.71
隧道轮廓外形与主体尺寸 B2/各种辅助措施 B6	2.3333	2.33
隧道轮廓外形与主体尺寸 B2/已建经验 B7	1.2267	1.23
纵坡坡度 B3/海水的作用 B4	0.4333	0.43
纵坡坡度 B3/施工开挖方法 B5	1.3467	1.35
纵坡坡度 B3/各种辅助措施 B6	1.4533	1.45
纵坡坡度 B3/已建经验 B7	0.7067	0.71
海水的作用 B4/施工开挖方法 B5	2.9267	2.93
海水的作用 B4/各种辅助措施 B6	4.0000	4.00
海水的作用 B4/已建经验 B7	2.3333	2.33
施工开挖方法 B5/各种辅助措施 B6	1.0200	1.02
施工开挖方法 B5/已建经验 B7	1.0067	1.01
各种辅助措施 B6/已建经验 B7	0.9000	0.90

表 3 调查信息表 2

Table 3 Survey information sheet 2

对比因素 (相对于确定围 岩稳定性 B1)	非常 不重要 (1/7)	明 显 不重要 (1/5)	稍 微 不重要 (1/3)	同 样 重 要 (1)	稍 微 重 要 (3)	明 显 重 要 (5)	极 端 重 要 (7)	评 分 均 值	设计 均 值
各得分出现的频率									
数值计算 A1/日本经验 A2	0	0	0	0	2	7	11	5.9000	5.90
数值计算 A1/顶水采煤 A3	0	0	0	0	4	10	6	5.2000	5.20
日本经验 A2/顶水采煤 A3	0	0	15	5	0	0	0	0.5000	0.50

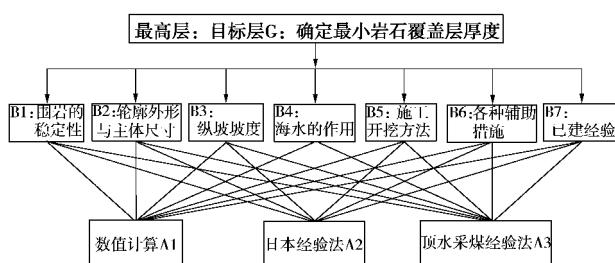


图 3 层次结构图

Fig. 3 Hierarchical structure

采用关于 1~7 比例标度构造  $a_{ij}$ ,  $n$  个元素

$u_1, u_2, \dots, u_n$ , 两两比较其重要性共要比较  $\frac{n(n-1)}{2}$  次。

第  $i$  个元素  $u_i$  与第  $j$  个元素  $u_j$  重要性之比为  $a_{ij}$ 。

$a_{ij}=1$ , 表示  $u_i$  与  $u_j$  重量相同, 或重要性相同;

$a_{ij}=3$  表示  $u_i$  比  $u_j$  稍重。

$a_{ij}=5$ , 表示  $u_i$  比  $u_j$  明显重;  $a_{ij}=7$  表示  $u_i$  比  $u_j$  极端重。

数 2, 4, 6 则为上述判断的中值。由此可以得到各因素的评价等级表见表 4。

对  $n$  个物体, 两两比较其重要性得判断矩阵

$A = (a_{ij})_{n \times n}$ , 显然  $a_{ij}$  满足:

$$a_{ij} > 0, \quad a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, \quad a_{ij} = 1 \quad \text{。} \quad (7)$$

共计  $\frac{1}{2}n(n-1)$  个判断, 所以  $A$  是正的互反矩阵,

且对角线上元素为 1, 这样的  $n$  阶矩阵可表示为上三角或下三角矩阵。但  $A$  的元素  $a_{ij}$  通常不具有传递性, 即

$$a_{ij} \cdot a_{jk} \neq a_{ik} \quad , \quad (8)$$

$$\text{如果 } a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik} \quad (9)$$

成立, 则称  $A$  是一致性矩阵。从判断矩阵  $A$  出发到导出元素在某种准则  $B$  下按重要性大小的排序, 矩阵  $A$  的一致性起着至关重要的作用。

表 4 评价指标值

Table 4 Evaluation indexes

评价	非常不 重要	明 显不 重 要	稍 微不 重 要	同 样 重 要	稍 微 重 要	明 显 重 要	极 端 重 要
指标 值	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7

### 2.3 构造各因素层的判断矩阵和各个因子的权重



表 5 G-B 判断矩阵  $B_{ij}$ Table 5 G-B judgment matrix  $B_{ij}$ 

G: 确定最小岩石覆盖厚度	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	$\sum B_{ij}$
围岩稳定性 B1	1	3.9	3.97	1.32	2.59	3.43	1.59	17.8000
轮廓外形与 主体尺寸 B2	0.26	1	0.75	0.38	0.71	2.33	1.23	6.6600
纵坡坡度 B3	0.25	1.34	1	0.43	1.35	1.45	0.71	6.5300
海水的作用 B4	0.76	2.63	2.31	1	2.93	4	2.33	15.9600
施工开挖方法 B5	0.39	1.41	0.74	0.34	1	1.02	1.01	5.9100
各种辅助措施 B6	0.29	0.43	0.69	0.25	0.98	1	0.9	4.5400
已建经验 B7	0.63	0.82	1.42	0.43	0.99	1.11	1	6.4000
$\sum$	3.5800	11.5300	10.8800	4.1500	10.5500	14.3400	8.7700	63.8000

表 6 G-B 判断矩阵权重  $W_{ij}$ Table 6 G-B judgment matrix weight  $W_{ij}$ 

G 确定最小岩石覆盖厚度	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	$\sum$	$W_{ij}$
围岩稳定性 B1	0.2793	0.3382	0.3649	0.3181	0.2455	0.2392	0.1813	1.9665	0.2809
轮廓外形与 主体尺寸 B2	0.0726	0.0867	0.0689	0.0916	0.0673	0.1625	0.1403	0.6899	0.0986
纵坡坡度 B3	0.0698	0.1162	0.0919	0.1036	0.1280	0.1011	0.0810	0.6916	0.0988
海水的作用 B4	0.2123	0.2281	0.2123	0.2410	0.2777	0.2789	0.2657	1.7160	0.2451
施工开挖方法 B5	0.1089	0.1223	0.0680	0.0819	0.0948	0.0711	0.1152	0.6623	0.0946
各种辅助措施 B6	0.0810	0.0373	0.0634	0.0602	0.0929	0.0697	0.1026	0.5072	0.0725
已建经验 B7	0.1760	0.0711	0.1305	0.1036	0.0938	0.0774	0.1140	0.7665	0.1095
								7	

表 7 B<sub>1</sub>-A 判断矩阵  $A_{ij}$ Table 7 B<sub>1</sub>-A judgment matrix  $A_{ij}$ 

围岩稳定性 B1	A1	A2	A3	$\sum A_{ij}$
数值计算 A1	1	5.9	5.2	12.1000
日本经验 A2	0.17	1	0.5	1.6700
顶水采煤 A3	0.19	2	1	3.1900
$\sum$	1.3600	8.9000	6.7000	16.9600

表 8 B<sub>1</sub>-A 判断矩阵权重  $W_{ij}$ Table 8 B<sub>1</sub>-A judgment matrix weight  $W_{ij}$ 

围岩稳定性 B1	A1	A2	A3	$\sum$	$W_{ij}$
数值计算 A1	0.7353	0.6629	0.7761	2.1743	0.7248
日本经验 A2	0.1250	0.1124	0.0746	0.3120	0.1040
顶水采煤 A3	0.1397	0.2247	0.1493	0.5137	0.1712
				3	

按着表1的评价等级上说明,结合调查信息表,具体构造应用举例的7个准则下的两两比较判断矩阵。用EXCEL可以将样本矩阵列成表格,计算出各个因子的权重(计算过程见表5~8)。

对上述判断矩阵进行一致性检验,  $I_{\max} = 7.2168$ ,  $CI=0.0361$ ,  $RI=1.32$ ,  $CR=0.0274 < 0.1$ 。因此判断矩阵的一致性是可以通过的。

对上述判断矩阵进行一致性检验,  $I_{\max} = 3.0340$ ,  $CI=0.0170$ ,  $RI=0.58$ ,  $CR=0.0293 < 0.1$ 。因此判断矩阵的一致性是可以通过的。

用以上的方法可以分别得到构造各因素层的判断矩阵和各个因子的权重。鉴于篇幅原因,本文在此不再分别列出具体计算过程。

## 2.4 计算各方案对目标的合成权重

$$W_{GA} = (w^{c_1}, w^{c_2}, \mathbf{L}, w^{c_5}) W_G, \text{即}$$

$$W_{GA} = \begin{pmatrix} 0.7248 & 0.6632 & 0.6398 & 0.3728 & 0.3189 & 0.6632 & 0.1008 \\ 0.104 & 0.1769 & 0.1225 & 0.5231 & 0.4346 & 0.1769 & 0.4977 \\ 0.1712 & 0.1599 & 0.2377 & 0.1041 & 0.2465 & 0.1599 & 0.4015 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.2809 \\ 0.0986 \\ 0.0988 \\ 0.2451 \\ 0.1040 \\ 0.0946 \\ 0.0725 \\ 0.1095 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0.5129 \\ 0.2954 \\ 0.1917 \end{pmatrix} A_1$$

$$= \begin{pmatrix} 0.5129 \\ 0.2954 \\ 0.1917 \end{pmatrix} A_2$$

$$= \begin{pmatrix} 0.5129 \\ 0.2954 \\ 0.1917 \end{pmatrix} A_3$$

由此知,经加权分析后得出数值计算(A1)0.5 权重、日本经验法(A2) 0.3 权重、以及顶水采煤法(A3)0.2 权重,最终确定最小岩石覆盖厚度。表 9 为不同方法下的海

表9 不同方法下的该海底隧道4个地质剖面的最小岩石覆盖厚度

Table 9 Minimum rock covering thicknesses of four geological sections by different methods

地质剖面	水深	实际设计值	数值分析	日本经验值	顶水采煤经验值	层次分析值
K8+350	27.5	35.0	31.0	18.33	27.25	26.45
K8+750	32.0	37.2	33.2	21.33	27.25	28.45
K9+450	32.5	41.0	37.0	21.67	27.25	30.45
K11+120	5.0	42.5	38.5	3.33	27.25	25.70

底隧道4个地质剖面的最小顶板厚度值, 图4为第三轴线地质剖面和原设计隧道轴线布置示意图不同方法得到的海底隧道底板底板线比较曲线。图5不同方法得到的该海底隧道岩石覆盖层底板线位置。

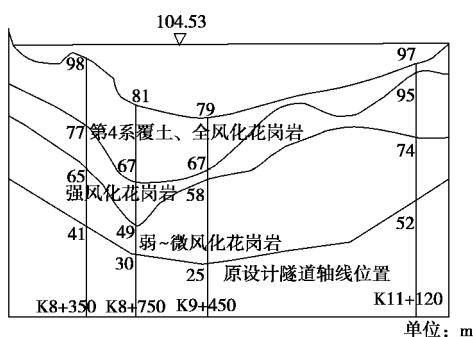


图4 第三轴线地质剖面和原设计隧道轴线布置示意图

Fig. 4 Geological sections of the third axes and original design tunnel

根据基于群组的层次分析决策方法, 依据各种分析方法得到结果的重要性, 根据前面给出不同方法的权重, 最终确定最小岩石覆盖厚度。通过日本经验最小涌水方法、顶水采煤方法和数值计算方法得到的最小岩石覆盖厚度进行加权得到该海域最小岩石覆盖厚度。在运用各种方法开始进行计算时, 限于海底部部分地质调查资料有限, 不同风化层的界限难以区分, 仅根据第三轴线地质剖面图, 进行计算。图4为该海底隧道第三轴线地质剖面和原设计隧道轴线布置示意图。

把该海底隧道的设计岩石覆盖层厚度与海水深度的对应关系带入各个经验公式<sup>[12]</sup>, 就可以得到隧道岩石覆盖层厚度的类比值。对该海底隧道的地质条件较差的四个剖面的岩石覆盖层厚度再进行工程类比, 类比结果见表9。由此可以计算出该隧道岩石覆盖层厚度底板高程如图5所示, 用基于群组的层次分析决策

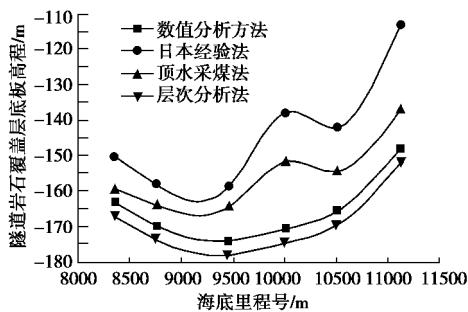


图5 不同方法得到的该海底隧道底板线位置

Fig. 5 Floor positions of sub-sea tunnel obtained by different methods

方法算出的厚度符合以前经验得出的厚度的规律与实际工程的对比, 得出此方法是可行的, 但实际工程设计值是偏于保守的。

### 3 结 论

(1) 层次分析方法是一种最优化技术, 权重反映了各种结果的重要性。权重的确定选取对于优化的结果是至关重要的。

(2) 本文提出了基于群组层次分析法的确定标体系设计方法, 它既能体现层次分析法(AHP)的优点, 又能较好地弥补层次分析法(AHP)的不足。

(3) 确定最小岩石覆盖厚度的一般原则: 首先在岩石各项参数已知的情况下(通常用实验的方法或者勘探的方法)由工程类比和数值计算分别确定最小岩石覆盖层厚度, 然后根据各个相关因素的重要性, 用权值分析法确定最小岩石覆盖厚度的权重, 最后用现场监测结果进行检验, 最终得到该工程区域最小岩石覆盖厚度。

(4) 本章将各种方法得到的底板线高程, 与基于群组的层次分析决策方法得到的地板线高程进行比较(见图4), 通过对比可知, 计算得到的最小岩石覆盖厚度符合以前经验得出的厚度的规律, 从而验证了确定海底隧道最小岩石覆盖厚度基于群组的层次分析决策方法的正确性和对此类问题的可行性。

### 参考文献:

- [1] SAATY Thomas L. The analytic network process: decision making with dependence and feedback[M]. Bucks: Rws Pubns, 2001.
- [2] SAATY Thomas L. Theory and applications of the analytic network process: decision making with benefits opportunities[M]. Costs and Risks: Rws Pubns, 2005.
- [3] 朱建军. 层次分析法的若干问题研究及应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2005. (ZHU Jian-jun. Analytical hierarchy process based on knowledge and its application[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005. (in Chinese))
- [4] 吕 明, GRØVE, NILSEN B, 等. 挪威海底隧道经验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4219–4225. (LÜ Ming, GRØVE, NILSEN B, et al. Norwegian experience in sub-sea

- tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(23): 4219 – 4225. (in Chinese))
- [5] 孙洪星, 康永华, 刘武章, 等. 龙口矿区近海厚冲击层下综放采煤防水煤岩柱的留设研究[J]. 煤炭科学技术, 1999, **27**(6): 6 – 9. (SUN Hong-xing, KANG Yong-hua, LIU Wu-zhang, et al. Study on mine and rock column for safety waterproof for synthesis excavation mine in the Longkou mine field near the seal[J]. Coal Science and Technology, 1999, **27**(6): 6 – 9. (in Chinese))
- [6] Shogo Matsuo. An overview of the Seikan tunnel project[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1986, **1**(3/4): 323 – 331.
- [7] THOMAS R, Kuesel. Alternative Concepts for Undersea Tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1986, **1**(3/4): 283 – 287.
- [8] Korehide Miyaguchi. Maintenance of the Kanmon railway tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1986, **1**(3/4): 307 – 314.
- [9] NILSEN B. Empirical analysis of minimum rock cover for subsea rock tunnels[C]// H Burger, eds. Proceedings of ITA World Congress, Amsterdam: Elsevier, 1993: 677 – 687.
- [10] 李延春, 李术才, 陈卫忠, 等. 厦门海底隧道的流固耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(3): 397 – 401. (LI Yan-chun, LI Shu-cai, CHEN Wei-zhong, et al. Coupled fluid-mechanical analysis of Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(3): 397 – 401. (in Chinese))
- [11] 李术才, 李延春, 陈卫忠, 等. 厦门海底隧道最小顶板厚度三维弹塑性断裂损伤研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(18): 3138 – 3143. (LI Shu-cai, LI Yan-chun, CHEN Wei-zhong, et al. Application of 3D elastoplastic fracture damage model to determination of minimum roof thickness of Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(18): 3138 – 3143. (in Chinese))
- [12] 李术才, 李术才, 张京伟, 等. 数值方法确定海底隧道最小岩石覆盖厚度研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1304 – 1308. (LI Shu-chen, LI Shu-cai, ZHANG Jing-wei, et al. Study on numerical method for the minimum rock covers of sub-sea tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1304 – 1308. (in Chinese))
- [13] 李术才, 李树忱, 徐帮树, 等. 海底隧道最小岩石覆盖厚度确定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(11): 2289 – 2295. (LI Shu-cai, LI Shu-chen, XU Bang-shu, et al. Study on determination method for minimum rock cover of subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(11): 2289 – 2295. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 彩色广告 封 2 北京金土木软件技术有限公司  
 封 3 北京理正软件设计研究院有限公司  
 封 4 上海分元土木工程科技有限公司  
 前插 1 武汉中科智创岩土技术有限公司  
 前插 2 西安力创材料检测技术有限公司  
 后插 1 广州市中海达测绘仪器有限公司  
 后插 2 台州市建元工程勘察仪器有限公司  
 后插 3 常州金土工程仪器有限公司  
 后插 4 中仿科技