

基于漂移度的隧道围岩质量分级组合评价方法

曹文贵，翟友成，王江营

(湖南大学岩土工程研究所，湖南 长沙 410082)

摘要：针对现有隧道围岩质量分级方法评价结果存在非一致性问题的特点，首先引入组合评价思想，选取多种已有围岩质量分级方法作为基础分级方法，建立了融合各基础分级方法优越性的隧道围岩质量分级组合评价计算模型；其次，依据不同基础分级方法评价指标的物理意义和量纲不同的特点，建立了评价指标的标准化方法，使不同基础分级方法评价结果具有可比性，以解决组合评价计算模型的组合计算方法问题；然后，针对不同基础分级方法评价结果的合理性存在差异的特点，引入漂移度概念，建立了基础分级方法合理程度的度量方法，并在此基础上，提出基础分级方法权重分配的合理确定方法，进而建立了隧道围岩质量分级的新型组合评价方法，该方法不仅可以解决不同基础分级方法评价结果的非一致性问题，更重要的是可以充分发挥各基础分级方法的优势，避免它们的不合理性，使隧道围岩质量分级更为合理；最后，通过工程实例分析，表明了该方法的合理性与可行性。

关键词：隧道工程；围岩质量分级；基础分级方法；组合评价；漂移度；权重

中图分类号：TU457 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2012)06-0978-07

作者简介：曹文贵(1963-)，男，湖南南县人，博士(后)，教授，博士生导师，主要从事岩土工程教学与研究工作。
E-mail: cwglyp@21cn.com。

Combination evaluation method for classification of surrounding rock quality of tunnel based on drifting degree

CAO Wen-gui, ZHAI You-cheng, WANG Jiang-ying

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Considering the inconsistency among the evaluation results drawn by different classification methods for surrounding rock quality of tunnels, combination evaluation idea is introduced. A model for classification of surrounding rock quality based on combination evaluation is formulated by selecting several existing classification methods for surrounding rock quality of tunnels as the fundamental methods, which may integrate the advantages of the fundamental methods. Since the physical meanings and dimensions of the evaluation indexes drawn by the fundamental methods are different, a standardized method for evaluation indexes is developed to make the evaluation results of different fundamental methods comparable so as to solve the computational problem of the calculation model based on the combination evaluation. Taking into account the differences of rationality between the evaluation results of the fundamental methods, a method for reasonable degrees of the fundamental methods is established by introducing drifting degree, based on which the weight calculation is developed. Then the combination evaluation method for classification of surrounding rock quality of tunnels is developed to make the classification method of surrounding rock quality of tunnels more reasonable, which can not only solve the problem of inconsistency among the fundamental methods, but also give full play of the fundamental methods' advantages and avoid the un-reasonability. Finally, the proposed method is used to analyze practical projects. It is shown that the proposed method is feasible and reasonable.

Key words: tunnel engineering; classification of surrounding rock quality; fundamental method; combination evaluation; drifting degree; weight

0 引言

隧道围岩质量分级方法研究经过百余年的发展，国内外学者提出的围岩质量分级方法已达近百种^[1-5]，极大地促进了围岩质量分级方法的研究，其中多种围

岩质量分级方法已在工程实践中得到了成功应用。但

基金项目：国家自然科学基金项目（51078137），高等学校博士学科点专项科研基金项目（20090161110005）

收稿日期：2011-05-04

是, 由于隧道工程地质条件的复杂性, 几乎已有的任何一种方法应用于具体工程实际都存在一定程度的不合理性。这是由于不同围岩质量分级方法采用的评价指标和评价思路不同, 而且, 任何一种方法都只能从某一个或几个侧面反映隧道围岩质量, 无法全面而准确地反映围岩质量的客观实际, 因而采用不同隧道围岩质量分级方法所得结果存在差异, 有时甚至相差1~2个分级级别^[6], 即出现不同方法评价结果的非一致性问题, 这往往使隧道施工设计人员无所适从, 如何解决这一问题是本文研究的核心内容。

尽管已有众多隧道围岩质量分级方法均存在一定不足和缺陷, 但是每种方法都有其可取之处, 也就是说每种方法都可以从某一个或几个侧面反映工程实际, 如果有一种办法能够吸取已有方法的优点或长处, 消除或淡化其不足与缺陷, 就可以建立一种全新的隧道围岩质量分级方法, 从而解决采用不同隧道围岩质量分级方法进行围岩质量分级时而出现的评价结果非一致性问题, 于是, 隧道围岩质量分级的组合评价思想就应运而生^[6]。

所谓组合评价, 就是在现有围岩质量分级方法的基础上, 并在测试条件和研究成本允许的前提下尽可能选取多种有代表性的已有分级方法作为基础分级方法, 并将它们按一定的规则进行合成, 充分融合各种方法的优点, 消除或淡化它们的不足或缺陷, 从而对隧道围岩质量进行分级, 以提高评价结果的可靠性^[7]。显然, 该方法为隧道围岩质量分级方法研究提供了一条新的研究途径, 这也正是本文研究的基本思路。

张亦飞等^[6]的研究工作作为隧道围岩质量分级组合评价方法的建立奠定了基础, 做出了开创性的工作, 但是, 仍存在一些不足与局限性。

其一, 将各基础分级方法进行等权重处理无法反映不同基础分级方法的合理程度, 因为不同基础分级方法都具有不同程度的不完备性, 其合理程度会存在差异, 因此, 基础分级方法的权重应该有所不同。

其二, 考虑到隧道围岩质量影响因素的不确定性, 采用区间数表示影响因素指标值和分级结果, 其合理性是毋容置疑的, 但采用区间数距离来判断最终隧道围岩质量等级的合理性存在较大局限性。以(JTGD70—2004)《公路隧道设计规范》建议的隧道围岩质量分级方法为例, 如果某隧道围岩基本质量指标[BQ]为[350, 351], 由规范可知III级和IV级围岩基本质量指标[BQ]的范围分别为[351, 450]和[251, 350], 按照张亦飞等对区间数距离的定义^[6], 区间[350, 351]分别与区间[351, 450]和[251, 350]的距离相等, 显然根据区间数距离评价该隧道围岩质量可以是III级, 也可以是IV级, 而根据实际情况, 该隧道围岩质量定为IV级显

然更为合理; 如果有2处围岩, 其围岩基本质量指标分别为[351, 352]和[449, 450], 按照规范, 这2处围岩质量等级均为III级, 虽然按区间数距离判断这两处围岩质量也均为III级, 从表面上看, 张亦飞等^[6]评价方法是合理的, 可是, 从2处围岩质量的实际情况来看, 2处围岩质量的实际等级几乎相差一级, 显然, 张亦飞等的方法^[6]无法反映这一差别。究其原因, 区间数距离虽然可以粗略地反映被评价围岩质量属于哪一个围岩质量等级的程度, 但是, 即使在同一个围岩质量等级内, 围岩质量也存在较大差别, 区间数距离尚无法体现这一特点, 因此, 若仅从这个角度来看, 张亦飞等^[6]提出的隧道围岩质量分级组合评价方法的优越性还不如单一分级方法的优越性强, 因为许多单一围岩质量分级方法的分级指标不仅可以反映围岩质量等级, 本身的数值大小还可以反映同一围岩等级情况下围岩质量的优劣之分。

综合上面所述, 张亦飞等^[6]基于组合评价思想建立的隧道围岩质量分级方法存在一定的缺陷与不足, 但该思路无疑是正确而合理的, 因此, 有必要对此进行完善, 这正是本文研究的关键之一。

合理的隧道围岩质量分级组合评价方法不仅要求反映不同基础分级方法合理程度不同的特点, 而且, 要求围岩质量分级组合评价方法不仅可以通过评价指标直接确定围岩质量等级, 还要求即使在同一个围岩质量等级内, 也能判断围岩质量的好差之分, 为此, 本文拟引进漂移度概念以反映基础分级方法评价结果的合理程度, 并考虑到不同基础分级方法评价结果的物理意义和量纲不同, 采用标准化思想对不同基础分级方法的评价结果进行标准化处理, 以此作为隧道围岩质量组合评价方法的评价指标, 进而建立基于组合评价思想的新型隧道围岩质量分级方法, 从而解决不同围岩质量分级方法评价结果的非一致性问题, 以期完善隧道围岩分级的理论与方法。

1 隧道围岩质量分级组合评价方法

1.1 隧道围岩质量分级组合评价计算模型

采用组合评价方法进行隧道围岩质量分级, 首先必须建立隧道围岩质量分级组合评价计算模型, 即确定各基础分级方法的合成规则, 加权线性和法^[8]简单实用, 是最为常用的方法, 为此, 本文根据隧道围岩质量分级特点, 采用加权线性和法建立隧道围岩质量分级组合评价计算模型, 可表示为

$$R = \sum_{i=1}^n w_i R_i \quad , \quad (1)$$

其中,

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad , \quad (2)$$

式中, R 为隧道围岩质量组合评价值, w_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为第 i 种基础分级方法 S_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的权重, R_i 为基础分级方法 S_i 经过标准化处理后的围岩质量评价值。

由上述计算模型可知, 采用组合评价方法对隧道围岩质量进行分级, 尚需建立基础分级方法评价结果的标准化方法, 以使其具有可比性, 此外, 还须建立基础分级方法 S_i 的合理程度评价和权重确定方法。

1.2 基础分级方法评价结果的标准化方法

上述建立的隧道围岩质量组合评价计算模型包含有多种基础分级方法, 然而, 不同基础分级方法评价指标的物理意义和量纲并不相同, 从而导致不同方法之间不具有可比性, 无法直接采用式(1)进行运算, 因此有必要对各基础分级方法的评价结果进行标准化处理, 使各基础分级方法评价指标的物理意义和量纲统一化, 同时也具有可比性。

考虑到百分制评分的办法^[10-11]已得到比较广泛的接受和应用, 为此本文在此基础上对不同基础分级方法的评价结果进行标准化处理, 具体如表1所示, 从而可以根据基础分级方法评价指标值的特点分以下两种情况进行标准化处理。

表 1 基础分级方法评价结果标准化方法

Table 1 Standardized method for fundamental methods' results

围岩等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
标准评分值	$80 < R_i \leq 100$	$60 < R_i \leq 80$	$40 < R_i \leq 60$	$20 < R_i \leq 40$	$0 \leq R_i \leq 20$

(1)当基础分级方法评价指标值所处的围岩质量等级具有明确的上限和下限时, 则可以采用线性插值的方法进行标准化处理, 即

$$R_i = a_j^- + \frac{20(x_i - b_j^-)}{b_j^+ - b_j^-} \quad . \quad (3)$$

式中 R_i 为基础分级方法 S_i 经过标准化处理后的围岩质量评价值; x_i 为基础分级方法 S_i 的评价指标值; 当 x_i 处于第 j 个围岩等级时, 设 b_j^+ 和 b_j^- 分为基础分级方法 S_i 对应分类标准中 j 级的上限值和下限值, a_j^- 为表1中标准化处理后第 j 个围岩等级的下限值。

(2)当基础分级方法评价指标值所处的围岩质量等级只有下限值而无上限值时, 可进行如下处理:

$$R_i = \begin{cases} 80 + \frac{20(x_i - b_j^-)}{b_j^+ - b_j^-} & (b_j^- \leq x_i \leq b_j^+) \\ 100 & (x_i > b_j^+) \end{cases} \quad . \quad (4)$$

式中, b_j^+ 为等效上限值, 即当基础分级方法评价指标值所处的围岩质量等级无上限值时, 根据不同基础分级方法的特点与工程实际给出一个合理的值 b_j^+ , 以此

作为等效上限值, 其它符号同前。

同理, 当基础分级方法评价指标值所处的围岩质量等级只有上限值而无下限值时, 可进行如下处理:

$$R_i = \begin{cases} \frac{20(x_i - b_j^-)}{b_j^+ - b_j^-} & (b_j^- \leq x_i \leq b_j^+) \\ 0 & (x_i < b_j^-) \end{cases} \quad , \quad (5)$$

式中, b_j^- 为等效下限值。

基础分级方法评价结果经过上述标准化处理后, 就可以采用式(1)进行合成, 从而计算出隧道围岩质量组合评价值 R , 结合表1就可确定组合评价值为 R 时的隧道围岩质量等级。

1.3 基础分级方法合理程度评价及其权重计算方法

由于不同隧道围岩质量分级方法都具有一定程度的不完备性, 其评价结果与工程实际会存在一定的差异, 因此, 有必要对不同方法评价结果的这种差异规律进行研究, 度量不同方法的合理程度, 从而为基础分级方法的权重计算提供客观的依据, 保证组合评价结果的可靠性。为此, 本文引入漂移度^[12]的概念, 并针对现有研究的不足, 给出其新的数学定义, 在此基础上对上述问题进行了深入的研究。

所谓漂移性, 是指评价结果与客观实际的不一致性, 而漂移度就是对这种漂移性的数学测度, 由于相关系数能够反映两比较对象变化趋势的相似程度, 为此陈国宏等^[12]提出基于相关系数来描述漂移度的大小, 其具体思路如下: 设有 m 个试验样本, 其真实值可用数列 $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m))$ 表示, 其中 $x_0(k)$ 表示第 k ($k=1, 2, \dots, m$) 个样本的真实值, 并采用评价方法 S_i 分别对 m 个试验样本进行评价, 其评价结果同样可用一组数列 $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m))$ 表示, 其中 $x_i(k)$ 表示第 k 个试验样本采用评价方法 S_i 得到的评价值, 将数列 X_0 与数列 X_i 进行相关性分析, 计算其相关系数 r , 并定义 $p = 1 - r$ 为漂移度。漂移度越小, 则表明该评价方法评价结果与工程实际结果越一致, 方法的合理程度越高, 反之, 则合理程度越低。

虽然陈国宏等^[12]定义的漂移度能够在一定程度上反映评价方法评价结果与工程实际的一致性程度, 但仍存在一定不足, 即相关系数仅是从相似性的角度分析了两组数据之间的关系, 未能从差异性的角度进行分析, 从而使所得结论在某些情况下与实际结果存在矛盾。笔者发现这是由于相关系数满足平行性和一致性两个基本性质造成的。所谓平行性^[13], 是指对于参考值(或实际值)数列 X_0 和比较数列 X_i , 若满足 $x_i(k) = x_0(k) + c$ ($k=1, 2, \dots, m$), 其中 c 为常数, 则称数列 X_0 与 X_i 平行, 此时两者的相关系数为1; 而当

$x_i(k) = \alpha x_0(k)$, 且 α 为常数时, 则称数列 X_0 与 X_i 满足一致性, 此时两者的相关系数也等于 1; 即当两比较数列满足平行性或一致性时, 基于相关系数的漂移度认为评价方法的评价结果与工程实际是完全一致的, 这是不合理的。以隧道围岩质量分级为例, 假设有 3 处围岩, 其围岩质量真实值分别为 15, 35, 55, 而某一隧道围岩质量分级方法 S_i 得到的 3 处围岩质量评价值分别为 25, 45, 65, 这两组数列满足平行性假定, 根据文[12]的漂移度定义, 评价方法 S_i 的评价结果与真实值是完全一致的, 但是根据表 1 可知, 3 处围岩质量真实等级分别为 V 级、IV 级、III 级, 而围岩质量分级方法 S_i 得到的评价等级为 IV 级、III 级、II 级, 二者对同一处围岩的评价结论完全不同, 当二者满足一致性时, 所得结论也会存在类似问题。

因此, 有必要对漂移度给出一个新的数学定义, 为此, 本文提出一种新的漂移度数学定义如下:

设有 m 个隧道围岩质量分级试验样本, 其参考值(或真实值)向量为 $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m))$, 其中 $x_0(k)$ 表示第 k ($k=1, 2, \dots, m$) 个样本的参考值(或真实值), 采用 n 种基础分级方法对这 m 个围岩质量分级样本进行评价, 并将第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 种基础分级方法 S_i 的评价结果用比较向量 $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m))$ 表示, 其中 $x_i(k)$ 表示第 k 个试验样本采用方法 S_i 得到的评价值。

计算第 i 种基础分级方法 S_i 的比较向量 X_i 与参考值(或实际值)向量 X_0 的相似度^[14]

$$\lambda_i = \gamma_i / \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad , \quad (6)$$

其中,

$$\gamma_i = X_0 \cdot X_i / (\|X_0\| \cdot \|X_i\|) \quad . \quad (7)$$

上述定义的相似度是基于参考值向量 X_0 和比较向量 X_i 在形状上的相似性来评价方法 S_i 的合理性。

并计算 X_i 与 X_0 的差异度为^[14]

$$\delta_i = \sigma_i / \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad , \quad (8)$$

其中,

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^m |x_i(k) - x_0(k)| \quad . \quad (9)$$

上述定义的差异度是从比较向量 X_i 与参考值向量 X_0 的差值水平大小来评价基础分级方法 S_i 的合理性。

相似度 λ_i 和差异度 δ_i 分别反映了评价结果向量 X_i 与参考值向量 X_0 的相似程度与差异程度, 若相似度 λ_i 越大、差异度 δ_i 越小, 则第 i 种基础分级方法的评价结果与实际结果越一致, 其漂移性越小, 合理性越好, 反之则第 i 种基础分级方法的评价结果与实际结果一致性越差, 其漂移性越大, 合理性也就越差。

为此, 综合考虑相似度和差异度, 本文提出

$$p_i = \begin{cases} (1 - \lambda_i) \cdot \delta_i & \lambda_i \neq 1 \\ \delta_i & \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (10)$$

为第 i 种基础分级方法的漂移度。

由上述漂移度的定义可以看出, 本文从相似性和差异性两个方面分析了 X_i 和 X_0 之间的关系, 比文献[12]的定义更为全面, 从而更具有合理性。

基于本文定义的漂移度, 建立基础分级方法的合理程度评价方法, 其具体操作步骤如下:

(1) 从现有隧道围岩质量分级方法中选取 n 种方法作为隧道围岩质量分级组合评价的基础分级方法, 并称这 n 种方法组成的集合为基础分级方法集 M 。

(2) 选取 m 个围岩质量分级试验样本, 采用基础分级方法对该 m 个围岩质量分级试验样本进行围岩等级评价, 记第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 种基础分级方法对第 k ($k=1, 2, \dots, m$) 个围岩质量分级试验样本的评价结果为 $x'_i(k)$, 则第 i 种基础分级方法 S_i 得到的评价结果可用向量 $X'_i = (x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(m))$ 表示。

(3) 将各种方法所得评价结果按 1.2 节中的方法进行标准化处理, 并记第 i 种基础分级方法 S_i 得到的评价结果为 $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m))$ 。

(4) 将方法集 M 分为两类, 一类仅由第 i 种基础分级方法 S_i 组成, 另一类由除 S_i 以外的其它基础分级方法组成, 并将后者的集合称为方法集 M_i 。

(5) 计算 M_i 中所有方法所得评价结论的平均值向量 $\bar{X}_i = (\bar{x}_i(1), \bar{x}_i(2), \dots, \bar{x}_i(m))$, 其中

$$\bar{x}_i(k) = \frac{1}{n-1} \sum_{s=1, s \neq i}^n x_s(k) \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad . \quad (11)$$

将 \bar{X}_i 作为参考值向量, 将方法 S_i 的评价结果 X_i 作为比较向量, 根据本文的漂移度定义计算每种基础分级方法 S_i 的漂移度 p_i 。

至此, 已建立了基础分级方法的合理程度评价方法, 漂移度 p_i 越小时, 则表明第 i 种基础分级方法 S_i 的评价结果与工程实际的一致性越好, 其合理性也就越高, 故其赋予的权重 w_i 也应越大, 因此基础分级方法 S_i 的权重 w_i 可采用下式计算^[15]:

$$w_i = \frac{1/p_i}{\sum_{i=1}^n 1/p_i} \quad . \quad (12)$$

至此, 已建立了基于漂移度的隧道围岩质量分级组合评价方法。

2 工程实例

2.1 工程概况

为验证本文方法的合理性, 将其应用于承德 112 线公路隧道的围岩质量分级, 国道 112 全线共建设了 5

条山岭隧道, 分别是四道沟隧道、骆驼鞍隧道、铁营隧道、波罗诺隧道和蓝旗梁隧道, 其中不同隧道不同里程的围岩条件存在较大差异, 限于篇幅, 本文不再一一详细介绍各围岩段的工程地质条件, 具体资料可参考文献[16]。

2.2 分析过程及结果

采用本文方法对该公路隧道的围岩质量进行分级, 其具体过程如下:

(1) 本文选取工程岩体分级标准^[9] (BQ 值法)、南非地质力学分级法^[1] (RMR 法)、模糊层次综合评价法^[17]、岩体质量指标 Q 分类法以及王石春等提出的“隧道工程岩体(围岩)分级”方法^[1] (简称 RMQ 法) 等5种方法作为基础分级方法集 M 。

值得注意的是, 谭松林等^[17]提出的模糊层次综合评价法得到的评价结果是一个隶属度向量, 为了使各基础分级方法具有可比性, 本文根据文献[10]的思想采用下式对其进行标准化处理:

$$R_3 = \sum_{j=1}^5 c_j n_j \quad (13)$$

式中 n_j 为围岩质量等级为 j 级的隶属度; c_j 为围岩质量等级为 j 级对应的评分中值, 如根据表1有围岩等级为 I 级的评分中值 $c_1 = 90$ 。

此外, 岩体质量指标 Q 分类法原本将围岩质量分为九级, 为了与国内的五级分类方法一致, 赵玉绂^[18]对此进行了换算研究, 根据 Q 值将围岩质量分为5个等级, 具体如表2所示。

表 2 Q 值分级

Table 2 Grades of values of Q

围岩等级	一级	二级	三级	四级	五级
Q 值	≥ 40	$10 \sim 40$	$1 \sim 10$	$0.1 \sim 1$	$0 \sim 0.1$

工程岩体分级标准、RMR 法、 Q 分类法以及 RMQ 法的具体分级标准如表3所示。对基础分级方法进行标准化处理, 尚需确定 BQ 值和 Q 值在 I 级围岩的等效上限值, 根据有关文献^[6]和工程实际经验取 BQ 值和 Q 值的等效上限值分别为600和100。

表 3 各基础分级方法分级标准

Table 3 Classification standard of fundamental methods

围岩等级	一级	二级	三级	四级	五级
BQ 值	≥ 550	$451 \sim 550$	$351 \sim 550$	$251 \sim 350$	$0 \sim 250$
RMR 值	$90 \sim 100$	$70 \sim 90$	$50 \sim 70$	$25 \sim 50$	$0 \sim 25$
Q 值	≥ 40	$10 \sim 40$	$1 \sim 10$	$0.1 \sim 1$	$0 \sim 0.1$
RMQ 值	$90 \sim 100$	$75 \sim 90$	$55 \sim 75$	$30 \sim 55$	$0 \sim 30$

(2) 从该工程中选取20个围岩段作为围岩质量分级试验样本, 采用上述5种基础分级方法对该20个围岩质量分级样本进行分级, 其评价结果经标准化处理后

具体如表4所示, 其中试验样本用其所在公路里程表示, 工程岩体分级标准、南非地质力学分级法 (RMR 法)、模糊层次综合评价法、岩体质量指标 Q 分类法和 RMQ 法分别用 S_1 , S_2 , S_3 , S_4 和 S_5 表示。

表 4 各基础分级方法的评价结果

Table 4 Evaluation results of fundamental methods

试验样本	K5+272	K5+309	K5+323	K5+328	K5+424
S_1	38	15	29	32	44
S_2	36	15	27	28	42
S_3	46	29	35	40	44
S_4	41	26	31	41	52
S_5	36	17	27	31	47
试验样本	K5+983	K6+055	K6+130	K16+344	K16+390
S_1	47	45	50	70	75
S_2	48	41	47	76	72
S_3	47	51	63	72	70
S_4	50	46	49	65	73
S_5	49	41	46	79	75
试验样本	K16+540	K22+383	K22+429	K23+145	K80+953
S_1	73	18	14	18	6
S_2	69	21	14	23	7
S_3	68	34	29	36	18
S_4	62	22	23	23	25
S_5	73	15	11	13	9
试验样本	K80+345	K80+811	K80+350	K115+599	K115+800
S_1	14	66	23	21	36
S_2	16	65	36	23	34
S_3	29	74	37	37	39
S_4	32	70	58	34	44
S_5	10	60	33	26	26

(3) 根据本文的漂移度定义计算5种基础分级方法的相似度、差异度和漂移度如表5所示。

表 5 各基础分级方法漂移度及权重结果

Table 5 Drifting degrees and weight of fundamental methods

评价方法	BQ值法	RMR法	模糊层次评价法	Q 分类法	RMQ法
相似度	0.2006	0.2015	0.1994	0.1986	0.1999
差异度	0.1559	0.1323	0.2642	0.2341	0.2135
漂移度	0.1246	0.1056	0.2115	0.1876	0.1708
权重	0.2402	0.2834	0.1415	0.1596	0.1753

(4) 进而根据式(12)计算各基础分级方法的权重如表5所示。

(5) 将上述权重代入式(1)即可得到以工程岩体分级标准等5种围岩质量分级方法为基础分级方法的隧道围岩质量分级组合评价计算模型。

(6) 检验本文组合评价方法的合理性。由表4可知, 5种基础分级方法在K5+272、K5+309以及K6+130 3处出现评价等级不一致的情况, 为此采用本文的组合评价方法进行围岩质量分级, 得其评价结果以及在实际工程中采用的围岩等级如表6所示。

表6 不同分级方法比较

Table 6 Comparison among different classification methods

里程	K5+272	K5+309	K6+130
围 S ₁ (BQ 值法)	38 (IV级偏好)	15 (V级偏好)	50 (III级)
岩 S ₂ (RMR 法)	36 (IV级偏好)	15 (V级偏好)	47 (III级偏差)
等 S ₃ (模糊层次评价法)	46 (III级偏差)	29 (IV级)	63 (II级偏差)
及 S ₄ (Q 分类法)	41 (III级偏差)	26 (IV级偏差)	49 (III级)
评 S ₅ (RMQ 法)	36 (IV级偏好)	17 (IV级偏差)	46 (III级偏差)
分 组合评价方法	39 (IV级偏好)	19 (V级偏好)	50 (III级)
值 实际工程	IV级偏好	V级偏好	(III级)

2.3 讨论

(1) 由表5可知, 5种基础分类方法的相似度非常接近, 但差异度则差别非常明显, 其中最大值为 $\delta_3 = 0.2642$, 最小值为 $\delta_2 = 0.1323$, 此时如果仅考虑相似度将难以反映各基础分级方法的真实差异规律, 本文定义的漂移度同时考虑了差异度, 考虑因素更为全面, 从而使所得结果更为合理。

(2) 由表6可知, 本文的隧道围岩分类组合评价方法分析结果能够较好地反映工程实际, 并能在一定程度解决现有围岩分类方法分类结果的非一致性问题, 从而验证了本文方法的合理性和可行性。

3 结 论

针对现有隧道围岩质量分级方法的评价结果存在非一致性问题, 为了充分发挥单一围岩质量分级方法的优越性, 避免单一分级方法的局限性, 本文引入组合评价思想, 对隧道围岩质量分级方法进行了深入探讨, 由此可得如下4点结论。

(1) 组合评价方法融合了各基础分级方法的优越性, 能够在一定程度上消除不同方法评价结果的非一致性问题, 从而提高了隧道围岩质量分级结果的可靠性。

(2) 建立了评价指标的标准化方法, 使不同基础分级方法的评价结果具有可比性, 从而解决了组合评价计算模型的组合计算方法问题。

(3) 本文给出了漂移度新的数学定义, 从相似度

和差异度两个方面对基础分级方法的差异规律进行了深入研究, 从而使得基础分级方法的合理程度评价更具合理性。

(4) 基于漂移度概念建立了基础分级方法的权重计算方法, 可以较好地反映不同基础分级方法合理性的差异水平。

参考文献:

- [1] 王石春, 何发亮, 李苍松. 隧道工程岩体分级[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007. (WANG Shi-chun, HE Fa-liang, LI Cang-song. Rock mass classification of tunnel engineering[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 赵洪波, 冯夏庭, 尹顺德. 基于支持向量机的岩体工程分级[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 698 - 701. (ZHAO Hong-bo, FENG Xia-ting, YIN Shun-de. Classification of engineering rock based on support vector machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 698 - 701. (in Chinese))
- [3] 原国红, 陈剑平, 马琳. 可拓评判方法在岩体质量分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1539 - 1544. (YUAN Guo-hong, CHEN Jian-ping, MA Lin. Application of extenics in evaluating of engineering quality of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1539 - 1544. (in Chinese))
- [4] 苏永华, 赵明华, 刘晓明. 岩体分类的二元相对模糊评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1049 - 1055. (SU Yong-hua, ZHAO Ming-hua, LIU Xiao-ming. Duality element relative fuzzy evaluation method and its application to rock mass stability classification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 1049 - 1055. (in Chinese))
- [5] 宫凤强, 李夕兵. 距离判别分析法在岩体质量等级分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 190 - 194. (GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. Application of distance discriminant analysis method to classification of engineering quality of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 190 - 194. (in Chinese))
- [6] 张亦飞, 程传国, 张海丰, 等. 公路隧道围岩的区间数组合分类法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1915 - 1920. (ZHANG Yi-fei, CHENG Chuan-guo, ZHANG hai-feng, et al. Interval numbers-based integrated classification method for surrounding rock of highway tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1915 - 1920. (in Chinese))

- [7] 陈国宏, 李美娟, 陈衍泰. 组合评价及其计算机集成系统研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. (CHEN Guo-hong, LI Mei-juan, CHEN Yan-tai. Study on combination evaluation and its computer integration system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese))
- [8] 曾珍香, 顾培亮. 可持续发展的系统分析与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (ZENG Zhen-xiang, GU Pei-liang. System analysis and evaluation of sustainable development [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [9] GB50218—94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994. (GB50218—94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1994. (in Chinese))
- [10] 曹文贵, 张永杰. 地下结构岩体质量分类的变权重二级模糊综合评判方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1612 - 1618. (CAO Wen-gui, ZHANG Yong-jie. Study on two-stage fuzzy synthetic judgment method with changing weight value for rock quality classification in underground structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1612 - 1618. (in Chinese))
- [11] 刘沐宇, 林 驰, 高宏伟. 桥梁生命周期环境影响的多级模糊综合评价[J]. 土木工程学报, 2009, 42(1): 55 - 59. (LIU Mu-yu, LIN Chi, GAO Hong-wei. Comprehensive fuzzy assessment on the life-cycle environment impact of bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(1): 55 - 59. (in Chinese))
- [12] 陈国宏, 李美娟, 陈衍泰. 单一方法评价结论漂移性的测度研究[J]. 中国管理科学, 2004, 6(3): 58 - 63. (CHEN Guo-hong, LI Mei-juan, CHEN Yan-tai. The research on measurement of drift in the evaluation conclusion of single method[J]. Engineering Science, 2004, 6(3): 58 - 63. (in Chinese))
- [13] 谢乃明, 刘思峰. 几类关联度模型的平行性和一致性[J]. 系统工程, 2007, 25(8): 98 - 103. (XIE Nai-ming, LIU Si-feng. The parallel and uniform properties of several relational models[J]. Systems Engineering, 2007, 25(8): 98 - 103. (in Chinese))
- [14] 潘仁飞, 邹乐乐, 侯运炳. 基于专家可信度的不确定型 AHP 方法及其应用[J]. 系统工程, 2008, 26(10): 101 - 106. (PAN Ren-fei, ZHOU Le-le, HOU Yun-bing. The method of uncertain AHP based on expert credibility and its application[J]. Systems Engineering, 2008, 26(10): 101 - 106. (in Chinese))
- [15] 余建星, 蒋旭光, 练继建. 水资源优化配置方案综合评价的模糊熵模型[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 729 - 735. (YU Jian-xing, JIANG Xu-guang, LIAN Ji-jian. Comprehensive evaluation model for optimal deployment of water resources based on fuzzy theory and information entropy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 729 - 735. (in Chinese))
- [16] 静天文, 江玉生, 李 晓. 公路隧道围岩分类与支护优化设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (JING Tian-wen, JIANG Yu-sheng, LI Xiao. Rock mass classification and optimized support design of highway tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [17] 谭松林, 黄 玲, 李亚伟. 模糊层次综合评价在深埋隧道围岩质量分级中的应用[J]. 地质科技情报, 2009, 28(1): 105 - 108. (TAN Song-lin, HUANG Ling, LI Ya-wei. Application of fuzzy-AHP comprehensive evaluation to the quality classification of wall-rock in deep buried tunnels[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(1): 105 - 108. (in Chinese))
- [18] 赵玉俊. 国内外主要围岩分类换算原则和方法[J]. 工程地质学报, 1993, 1(2): 24 - 31. (ZHAO Yu-fu. The principle and method for contrast and conversion of principal rock mass classification systems at home and abroad[J]. Journal of Engineering Geology, 1993, 1(2): 24 - 31. (in Chinese))