

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.019

铁路隧道围岩分级细化研究及应用

牛富生, 马 亢, 郭永建

(同济大学 地下建筑与工程系; 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要:对Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ各级的软弱围岩,沿用相关规范计算所得的隧道围岩荷载,因级别不同,其荷载量值的差异往往过大。在现行公路隧道岩质围岩亚级分级方法的基础上,建立了新的围岩亚级分级与铁路隧道所采用的弹性纵波速度细化之间的关系,从而避免了铁路隧道不同围岩分级时其弹性纵波速度交叉重叠的现象。对Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ级岩质围岩,在本项研究中,对铁路隧道按照围岩弹性纵波速度 V_p 作了更进一步细化,并用以作为围岩初期支护设计压力的计算,避免相邻分级之间其计算荷载值差值过大造成的困难。结合青岛市地铁隧道工程,采用综合模糊判别方法对施工阶段围岩进行动态细化判定和调整,使隧道设计施工更为安全有据、经济合理。

关键词:深埋隧道;解决办法;围岩分级细化;初期支护;设计施工

中图分类号:TU 452 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0081-06

Study on Surrounding Rock Classification Refinement of Railway Tunnel and Application

Niu Fusheng, Ma Kang, Guo Yongjian

(Department of Geotechnical Engineering; Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: For IV, V, VI levels of weak rock, because of different levels, The calculated load of tunnel surrounding rock according to the relevant specification was too different. Based on surrounding rock sub-classification method of current highway tunnel, the relation between the new surrounding rock classification and the elastic p-wave velocity refining that was used by railway tunnel was built. The phenomenon of elastic p-wave velocity cross overlap was avoided when surrounding rock classification was different in railway tunnel. For III, V, V, VI levels of weak rock, the further refining was done by V_p in railway tunnel, in order to calculate primary support design pressure of surrounding rock, so the oversize difference of computation load value Between adjacent classification was avoided. Combining with a subway tunneling of Qingdao, comprehensive fuzzy identifying method is used to judge Surrounding rock classification level of refinement and adjust, which is more safe and economical for design and construction.

Key words: railway tunnel; countermeasures; surrounding rock classification refinement; primary support; design and construction

决定地下工程设计、施工最关键的因素之一是洞室围岩的基本分级及其在施工中作必要的修正。隧道围岩分级是评价隧道围岩稳定性的重要参数,也是隧道支护方案设计和确定施工工艺确定的主要依据。其中特别对Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ各级的软弱围岩,沿用相关规范计算所得的隧道围岩荷载,因级别不同,其荷载量值的差异过大;现行铁路规范^[1]中围岩弹性纵波速度值相互间交叉重叠,选取、使用时难以确定。因此,有必要对铁路隧道围岩分级细化做进一步研究。另外,地质勘察资料的代表性低,一般的勘探过程中所取样本偏少,且代表性不够,使地质勘探的数据离散性增加,降低了数据的准确性,存在“一孔”之见的片面性^[2];围岩分级的定性定量确定不一致^[3]。据以设计所得的一次支护和二次衬

砌诸参数将在相当程度上关系到设计的正确性和施工开挖阶段的日后运营中的安全和经济。因此,有必要在施工阶段对围岩进一步细化判别和调整,以使隧道设计施工更为安全有据、经济合理。

1 深埋隧道围岩垂直均布压力的计算

在深埋隧道设计中,由于现行规范制定的围岩分级的幅度区间取得过大,同一级别的围岩,其对应的岩体强度、岩盘完整性和弹性纵波波速变化等的幅值区间也很大;且又受地下水渗流量、地应力大小和其它相关因素的制约和影响,为隧道围岩的定级带来了不确定性。而对软弱围岩(Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ)言,这种由围岩级别计算所得的隧道岩土围压荷载,则其

收稿日期:2013-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51209180);中国博士后科学基金(2012M510137)

作者简介:牛富生(1983-),男,博士生,主要从事隧道及地下工程、桥梁桩基工程研究,(E-mail)niufusheng123@163.com。

邻近量值间的差别将会极大。据以设计得到的一次支护和二次衬砌诸参数将关系到设计的正确性和日后施工和运营期的安全性和经济性。以某暗挖地铁车站为例,其有关计算参数,如表 1 所示。

表 1 某暗挖地铁车站相关计算参数

围岩分级	洞室开挖宽度 B/m	重度 $\gamma /$ ($t \cdot m^{-3}$)	宽度影响 系数 ω	压力拱高度 h/m	垂直均布荷载 $q/(t \cdot m^{-2})$	邻级间荷载差/ ($t \cdot m^{-2}$)
I	21	2.70	2.6	1.71	3.16	2.92
II	21	2.60	2.6	2.34	6.08	5.15
III	21	2.40	2.6	4.68	11.23	8.89
IV	21	2.15	2.6	9.36	20.12	14.51
V	21	1.85	2.6	18.72	34.63	25.27
VI	21	1.60	2.6	37.44	59.90	

从表中可清楚的看出, III~IV 级, 荷值差为 8.89 t/m^2 , IV~V 级, 荷值差为 14.51 t/m^2 , V~VI 级荷值差为 25.27 t/m^2 。再以某高速铁路隧道为例,其有关计算参数,如表 2 所示。

表 2 某高速铁路隧道相关计算参数

围岩分级	洞室开挖宽度 B/m	重度 $\gamma /$ ($t \cdot m^{-3}$)	宽度影响 系数 ω	压力拱高度 h/m	垂直均布荷载 $q/(t \cdot m^{-2})$	邻级间荷载差/ ($t \cdot m^{-2}$)
I	14	2.70	1.9	0.86	2.3	2.1
II	14	2.60	1.9	1.71	4.4	3.8
III	14	2.40	1.9	3.42	8.2	6.5
IV	14	2.15	1.9	6.84	14.7	10.6
V	14	1.85	1.9	13.68	25.3	18.5
VI	14	1.60	1.9	27.36	43.8	

从表 2 可清楚的看出, III~IV 级, 荷值差为 8.89 t/m^2 , IV~V 级, 荷值差为 14.51 t/m^2 , V~VI 级荷值差为 25.27 t/m^2 , 现行隧道围岩分级间的跨度大造成邻级间荷载差值过大。

从以上分析可认为: 如表 1、表 2 得出的围岩分级的准确性均值需进一步改进。为了减少人为因素对围岩分级的影响, III、IV、V 级必须细化。

2 解决方案

2.1 公路隧道围岩分级细化

决定地下工程设计、施工的最关键最重要的因素是围岩的基本分级及其修正。隧道围岩分级是评价隧道围岩稳定

性的重要参数,也是隧道支护方案设计和施工工艺确定的主要依据。分级的正确与否直接影响着隧道施工和运营安全。因此正确划分隧道围岩分级就显得尤为重要。无论是铁路还是公路隧道规范对围岩分级问题存在的主要不足,最后都与围岩分级的细化、量化有关^[4-7]。王明年^[8-11]等提出了公路隧道岩质围岩亚级分级方法: 围岩亚级分级是从围岩稳定性考虑所确定的, 根据围岩稳定性的特征, 进行了围岩亚级的划分。在围岩亚级划分后, 还有相应的施工方法、预加固情况、支护参数等因素与之相对应, 从而形成了一套较为完整的围岩亚级划分体系, 在此仅列出与本文相关的岩质围岩各亚级的部分物理力学指标值^[12], 见表 3。

表 3 岩质围岩各亚级的部分物理力学指标值

围岩级别		计算摩擦角 $\varphi_c / (^\circ)$	普氏坚固系数 / f	圬工与围岩的 摩擦系数	弹性波速 $v_p / (km \cdot s^{-1})$
基本级别	亚级				
I	—	>78	15.0~20.0	0.60~0.70	>4.5
II	—	70~78	8.0~15.0	0.55~0.65	3.5~4.5
III	III ₁	65~70	6.0~8.0	0.50~0.55	3.2~4.0
	III ₂	60~65	3.0~6.0	0.45~0.50	2.5~3.2
IV	IV ₁	57~60	2.3~3.0	0.42~0.45	2.5~3.0
	IV ₂	54~57	1.7~2.3	0.38~0.42	2.0~2.5
	IV ₃	50~54	1.0~1.7	0.35~0.38	1.5~2.0
V	V ₁	45~50	1.1~1.5	0.30~0.35	1.4~2.0
	V ₂	40~45	0.8~1.1	0.25~0.30	1.0~1.4

注: 表中数字不适用于膨胀性岩体等特殊岩体。

2.2 铁路隧道围岩分级细化

从表 3 可以看出,公路隧道围岩分级时建立了围岩亚级与弹性纵波速度细化之间的关系,但还是难以避免围岩弹性纵波速度交叉重叠的现象。从另一侧面还说明了公路隧道围岩亚级分级的上项成果、通过与弹性纵波速度之间建立关联的思路,对铁路隧道也可以参照采用。况且公路隧道与铁路隧道的规范很类似,故对铁路隧道的围岩分级细化可建议如下表 4。

表 4 铁路隧道围岩分级细化

围岩级别		弹性纵波速度/(m·s ⁻¹)
基本级别	亚级	
I	—	>4.5
II	—	4.1~4.5
III	III ₁	3.6~4.0
	III ₂	3.1~3.5
IV	IV ₁	2.9~3.0
	IV ₂	2.5~2.8
	IV ₃	2.1~2.4
V	V ₁	1.5~2.0
	V ₂	1.0~1.4
VI	—	<1.0

2.3 初期支护设计压力的确定

隧道支护体系的设计合理与否,取决于对围岩压力的估计是否合理。尽管公路隧道与铁路隧道围岩分级进一步细化了,但在计算初期支护设计压力时,特别是 III、IV、V、VI 级围岩,人为因素对围岩分级影响较大造成相邻围岩分级间荷载差太大的现象还是不能解决。如果围岩的基本分级及其修正不能更进一步改进、细化、量化,地下工程的设计、施工就停留在定性分析与工程类比上,其理论研究、结构计算就变得毫无意义。只有进一步把围岩的基本分级细化,把影响围岩基本分级的众多因素进一步细化、量化,才能使人人为因素对围岩分级的影响降至最低,使围岩分级与现场实际接近,才能使地下工程的理论研究、工程设计、施工技术得到提高。为此,提出了一种在原有规范^[3]基础上进一步细化围岩分级、而又操作性强,能以量化为设计所用的更为合理的分级方法,以使隧道设计施工更为经济合理、安全有据。建议见图 1。

铁路规范^[3]中遇深埋隧道的围岩压力为松散荷载时,其垂直均布压力及水平均布压力可按下列公式计算:

1)垂直均布压力

$$q = \gamma h$$

$$h = 0.45 \times 2^{s-1} \omega \quad (1)$$

式(1): q 为垂直均布压力, kPa; γ 为围岩重度, kN/m³; s 为围岩级别,如 II 级围岩, $s = 2$; ω 为宽度影响系数, $\omega = 1 + i(B - 5)$; B 为隧道宽度, m; i 为 B 每增减 1 m 时的围岩压力增减率,以 $B = 5$ m 的围岩垂直均布压力为准,当 $B < 5$ m 时,取 $i = 0.2$; $B > 5$ m 时,取 $i = 0.1$ 。

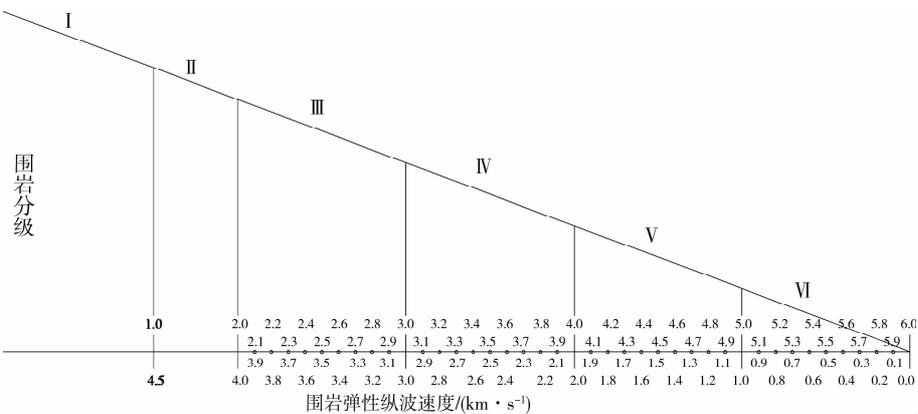


图 1 铁路隧道围岩分级细化

2)水平均布压力

表 5 围岩水平均布压力

围岩级别	I、II	III	IV	V	VI
水平均布压力 e	0	<0.15 (0.15~0.300)	0.3~0.5	0.5~1.0	0.5~1.0
		q	q	q	q

注:应用式(1)及表 5 时,必须同时具备下列条件:

- ① $H/B < 1.7$, 式中 H 为隧道开挖高度, m; B 为隧道开挖宽度, m。
- ② 不产生显著偏压及膨胀力的一般围岩。
- ③ 采用钻爆法施工的隧道。

围岩分级细化后, $h = 0.45 \times 2^{s-1} \omega$ 中的围岩级别 s 不再是整数,将按细化后的小数进行。如围岩为 III 时, $h = 0.45 \times$

$2^{s-1} \omega$, 指数项 $s = 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0$ 。当围岩级别为 IV 时,指数项 $s = 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 4.0$ 。当围岩级别为 V、VI 时,与 III、IV 类似,可作相似计算。

通过围岩分级细化,较好地解决了上述问题。公路隧道就避免了邻级间荷载差过大的现象。铁路隧道不仅避免了由于 II~V 级围岩分级相互交叉重叠造成的人为操作的任意性,而且减少了邻级间荷载差过大的现象。实际操作时根据围岩弹性纵波速度或 BQ 值查找细化后的围岩级别所属的亚级,以便使初期支护设计压力计算上更较可靠,用于隧道工程建设时也可以更加经济合理。

以青岛市地铁一期工程(3 号线)湛山站为例,设定为深埋隧道,围岩垂直均布压力按现行规范计算,见表 6。

表 6 围岩垂直均布压力按现行规范计算值

岩土分层	岩土名称	围岩弹性纵波速度 $V_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	围岩分级	洞室开挖宽度 B/m	重度/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	宽度影响系数	压力拱高度 h/m	垂直均布荷载 $q / (\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$	邻级间荷载差/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$
⑩	中风化花岗岩	3110.2	Ⅲ	22.5	2.40	2.75	4.95	11.88	9.40
⑩ _下	强风化花岗岩	2453.8	Ⅳ	22.5	2.15	2.75	9.90	21.28	15.35
⑩ ₁	强风化煌斑岩	1698.7	Ⅴ	22.5	1.85	2.75	19.80	36.63	26.73
⑪	粉质黏土	501.5	Ⅵ	22.5	1.60	2.75	39.60	63.36	26.73

按上述建议,将围岩分级细化后,湛山站的围岩垂直均布压力计算值,见表 7。

表 7 围岩分级细化后垂直均布压力计算值

岩土分层	岩土名称	围岩弹性纵波速度 $V_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	围岩分级细化	S	洞室开挖宽度 B/m	重度/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	宽度影响系数	压力拱高度 h/m	垂直均布荷载 $q / (\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$	邻级间荷载差/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$
⑩	中风化花岗岩	3110.2	Ⅲ ₂	2.9	22.5	2.40	2.75	4.62	11.08	3.97
⑩ _下	强风化花岗岩	2453.8	Ⅳ ₂	3.5	22.5	2.15	2.75	7.00	15.05	7.50
⑩ ₁	强风化煌斑岩	1698.7	V ₁	4.3	22.5	1.85	2.75	12.19	22.55	22.25
⑪	粉质黏土	501.5	Ⅵ	5.5	22.5	1.60	2.75	28.00	44.80	22.25

再以青岛地铁一期工程(3号线)永平路站~青岛北站区间为例,设定为深埋隧道,围岩垂直均布压力按现行规范计算值,见下表 8。

表 8 围岩垂直均布压力按现行规范计算值

岩土分层	岩土名称	围岩弹性纵波速度 $V_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	围岩分级	洞室开挖宽度 B/m	重度/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$	宽度影响系数	压力拱高度 h/m	垂直均布荷载 $q / (\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$	邻级间荷载差/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$
⑩	中等风化花岗岩	3120.2	Ⅲ	6.5	2.40	1.15	2.07	4.97	3.93
⑩ _下	碎裂状花岗岩	2536.2	Ⅳ	6.5	2.15	1.15	4.14	8.90	6.42
⑩ ₁	粗粒花岗岩强风化上亚带	1623.6	Ⅴ	6.5	1.85	1.15	8.28	15.32	11.18
⑪	含有机质粉质黏土	501.5	Ⅵ	6.5	1.60	1.15	16.56	26.50	11.18

经上述建议将围岩分级细化后,围岩垂直均布压力计算值,见下表 9。

表 9 围岩分级细化后垂直均布压力计算值

岩土分层	岩土名称	围岩弹性纵波速度 $V_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	围岩分级细化	S	洞室开挖宽度 B/m	重度/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	宽度影响系数	压力拱高度 h/m	垂直均布荷载 $q / (\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$	邻级间荷载差/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$
⑩	中等风化花岗岩	3120.2	Ⅲ ₂	2.9	6.5	2.40	1.15	1.93	4.64	1.66
⑩ _下	碎裂状花岗岩	2536.2	Ⅳ ₂	3.5	6.5	2.15	1.15	2.93	6.30	3.81
⑩ ₁	粗粒花岗岩强风化上亚带	1623.6	V ₁	4.4	6.5	1.85	1.15	5.46	10.11	5.40
⑪	含有机质粉质黏土	501.5	Ⅵ	5.5	6.5	1.60	1.15	11.71	18.74	5.40

从上面初期支护设计压力的计算可看出,以青岛地铁为例,铁路隧道围岩分级细化后,围岩垂直均布压力邻级间的荷载差值比细化前将有较大程度地减小。显然,隧道围岩分级细化后,其垂直均布压力的计算值将更趋合理。

3 动态施工模糊判定方法及应用

目前地下工程的设计在很大程度上仍处在“经验设计”

的阶段。一般隧道设计施工,多依据围岩级别进行结构设计和选取施工方法。目前铁路围岩分级,常在特定的围岩地质条件下,不能确切地给出围岩的级别。本文在分析已有的多因素稳定性分析方法基础上,引入模糊数学中的相关理论,实现了围岩分级指标出现特殊时的模糊判断,为类似工程情况提供分析借鉴^[13-15]。

3.1 综合模糊判别理论

根据概率论,设事件 A、B、C、D 独立,某个数值 x 的出现是一随机事件,若给定每个事件的 4 个区间的总长度为 L_i ,则数值 x 出现在某个区间的概率为

$$P_k(x) = 1 - \left| \frac{E(i) - x}{L_i} \right| \quad (2)$$

式(2): $k = A, B, C, D$; $i = 1, 2, 3, 4$ 。

数学期望简称期望,就是出现概率最大的随机变量,越接近期望值,出现的概率也就越大。对于等可能性的离散型数值变量,其数学期望表达式为

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

而对于等可能性的线性连续型变量,其在某一段区间的期望表达式为

$$E = \frac{a+b}{2} \quad (4)$$

式(3): a 和 b 分别为 2 个端点值。

同时,若 E、F、G 为相互独立的事件,则有式

$$P(E, F, G) = P(E)P(F)P(G) \quad (5)$$

根据式(3)、式(4)得到隶属度函数计算公式

$$P_k(x_A x_B x_C x_D) = \left(1 - \left| \frac{E(A) - x_A}{L} \right| \right) \times \left(1 - \left| \frac{E(B) - x_B}{L} \right| \right) \times \left(1 - \left| \frac{E(C) - x_C}{L} \right| \right) \times \left(1 - \left| \frac{E(D) - x_D}{L} \right| \right) \quad (6)$$

对于随机事件,要判断它出现在哪一个区间段,就要比较它在每个区间段出现的概率,最大概率出现的区间段就是该数值所处的区间段,其数学表达式为

$$\max(P_k(x_A x_B x_C x_D) |, K = A, B, C, D) = P_k(x_A x_B x_C x_D) \quad (7)$$

若计算出 $P_C(x_A x_B x_C x_D)$ 的概率最大,则说明该数值 x 属于事件 C。

3.2 铁路隧道围岩级别细化后的综合模糊判定方法

表 10 铁路隧道围岩各量化指标分级表

基本级别	围岩亚级	单轴饱和	岩体	弹性纵波
		抗压强度 R_c /MPa	完整性 指数 K_v	速度 V_p /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
I	—	60	>0.75	>4.5
II	—	45~60	0.55~0.75	4.1~4.5
III	III ₁	30~45	0.40~0.55	3.6~4.0
	III ₂	15~30	0.35~0.40	3.1~3.5
IV	IV ₁	10~15	0.28~0.35	2.9~3.0
	IV ₂	7.5~10	0.20~0.28	2.5~2.8
	IV ₃	5~7.5	0.15~0.20	2.1~2.4
V	V ₁	2~5	0.06~0.15	1.5~2.0
	V ₂	<2	0~0.06	1.0~1.4
VI	—	—	—	<1.0

各级围岩的隶属度函数如下:

I 级围岩:

$$P_I(R_c, K_v, V_p) = \left(1 - \left| \frac{130 - R_c}{200} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{0.875 - K_v}{1.0} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{4.75 - V_p}{5.0} \right| \right)$$

II 级围岩:

$$P_{II}(R_c, K_v, V_p) = \left(1 - \left| \frac{52.5 - R_c}{200} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{0.65 - K_v}{1.0} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{4.3 - V_p}{5.0} \right| \right)$$

III₁ 级围岩:

$$P_{III_1}(R_c, K_v, V_p) = \left(1 - \left| \frac{37.5 - R_c}{200} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{0.475 - K_v}{1.0} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{3.8 - V_p}{5.0} \right| \right)$$

III₂ 级围岩:

$$P_{III_2}(R_c, K_v, V_p) = \left(1 - \left| \frac{22.5 - R_c}{200} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{0.375 - K_v}{1.0} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{3.3 - V_p}{5.0} \right| \right)$$

IV₁ 级围岩:

$$P_{IV_1}(R_c, K_v, V_p) = \left(1 - \left| \frac{12.5 - R_c}{200} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{0.315 - K_v}{1.0} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{2.95 - V_p}{5.0} \right| \right)$$

IV₂ 级围岩:

$$P_{IV_2}(R_c, K_v, V_p) = \left(1 - \left| \frac{8.75 - R_c}{200} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{0.24 - K_v}{1.0} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{2.65 - V_p}{5.0} \right| \right)$$

IV₃ 级围岩:

$$P_{IV_3}(R_c, K_v, V_p) = \left(1 - \left| \frac{6.25 - R_c}{200} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{0.175 - K_v}{1.0} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{2.25 - V_p}{5.0} \right| \right)$$

V₁ 级围岩:

$$P_{V_1}(R_c, K_v, V_p) = \left(1 - \left| \frac{3.5 - R_c}{200} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{0.105 - K_v}{1.0} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{1.75 - V_p}{5.0} \right| \right)$$

V₂ 级围岩:

$$P_{V_2}(R_c, K_v, V_p) = \left(1 - \left| \frac{1 - R_c}{200} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{0.03 - K_v}{1.0} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{1.2 - V_p}{5.0} \right| \right)$$

3.3 青岛地铁施工阶段围岩动态分级应用示例

以青岛市地铁一期工程(3 号线)湛山站为例,由于各岩土层设计参数建议值有限,现只以⑩_中层——强风化花岗岩中亚带为例进行围岩综合模糊判别所属亚级。根据勘察资料,可得到强风化花岗岩中亚带的 3 个分级指标值:围岩单轴饱和抗压强度为 3 MPa;岩体的完整性系数为 0.05;弹性纵波速度为 $1.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据 2.2 节及表 10,单从 3 个分级指标上看,根据围岩单轴抗压强度围岩、完整性程度、弹性纵波速度单个划分围岩,应该分别为 V₁、V₂、V₁。施工人员只能根据经验来判断,判定结果随意性比较大。为此,采用综合模糊判断方法,分别计算出该层围岩属于各级的隶属度,结果见表 11。

表 11 各级隶属度的赋值表

围岩级别	I	II	III		IV			V		VI
			III ₁	III ₂	IV ₁	IV ₂	IV ₃	V ₁	V ₂	
$P_i(R_c, K_v, V_p)$	0.02	0.14	0.28	0.41	0.53	0.64	0.77	0.93	0.87	0.36

注: $\max P_i(R_c, K_v, V_p) = P_{V_1}(R_c, K_v, V_p) = 0.93$

从表 11 隶属度计算结果看出, 隶属度最大的 $P_{V_1}(R_c, K_v, V_p) = 0.93$, 可初步定为 V₁ 级。

再以青岛市地铁一期工程(3 号线)永平路站—青岛北站区间为例, 本区段隧道洞身通过的围岩本区段有①、⑥、⑩、⑬₇、⑬_上、⑬_下、⑬₃、⑬₄、⑬₇、⑬₁、⑬₃、⑬₆、⑬₈、⑬₈ 共 14 个层位。由于各岩土层设计参数建议值有限, 现只以⑬₆ 层——中等风化花岗斑岩为例, 进行围岩综合模糊判别所属亚级。

根据勘察资料, 可得到中等风化花岗斑岩的 3 个分级指标值: 围岩单轴饱和抗压强度为 20 MPa; 岩体的完整性系数为 0.4; 弹性纵波速度为 $2.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据 2.2 节及表 10, 单从 3 个分级指标上看, 根据围岩单轴抗压强度围岩、完整性程度、弹性纵波速度单个划分围岩, 应该分别为 III₂、III₂、IV₂。采用综合模糊判断方法, 分别计算出该层围岩属于各级的隶属度, 结果见表 12。

表 12 各级隶属度的赋值表

围岩级别	I	II	III		IV			V		VI
			III ₁	III ₂	IV ₁	IV ₂	IV ₃	V ₁	V ₂	
$P_i(R_c, K_v, V_p)$	0.14	0.44	0.68	0.87	0.85	0.77	0.64	0.51	0.39	0.36

注: $\max P_i(R_c, K_v, V_p) = P_{III_2}(R_c, K_v, V_p) = 0.87$

从表 12 隶属度计算结果看出, 隶属度最大的 $P_{III_2}(R_c, K_v, V_p) = 0.87$, 可初步定为 III₂ 级。

4 结 论

对青岛地铁个别车站和区间隧道的围岩分级细化及在施工阶段动态模糊判定中的应用研究, 可得出如下初步结论:

1) 公路隧道围岩分级时建立了围岩亚级分级与弹性纵波速度细化之间的关系, 但还是难以避免围岩弹性纵波速度交叉重叠的现象。这从另一侧面还说明了公路隧道围岩亚级分级的上项成果、通过与弹性纵波速度之间建立关联的思路, 对铁路隧道也可以参照采用。

2) 从初期支护设计压力的计算可看出, 铁路隧道围岩分级细化后, 围岩垂直均布压力邻级间的荷载差比细化前将有较大程度地减小。显然, 隧道围岩分级细化后, 其垂直均布压力的计算值将更趋合理。

3) 采用综合模糊判断方法, 分别计算出该层围岩属于各级的隶属度, 对隧道围岩级别进行细化后的判定, 减少了人为操作的随意性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10003—2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [2] 何泽民, 徐林生. 公路隧道围岩分级问题探讨[J]. 西部探矿工程, 2007(3): 138-140.
- [3] 汪伟, 刘新文. 公路隧道围岩分级的规范运用与思考[J]. 工程勘察, 2008(2): 61-64.
- [4] Hoseinia S H, Aghababaeib H, Pourrahimian Y. Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi) [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008(45): 1-10.
- [5] Choi J S, Ryu H H, Cho G C. Electrical resistivity-based rock mass classification for tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 234-235.
- [6] Vicki M, Trisha R. Geological controls on rock mass classification of coal from Huntly East Mine, New Zealand [J].

- Engineering Geology, 2004, 75(2): 201-213.
- [7] Ergul Y. A New rock mass classification for coal measures rocks [J]. Engineering Geology, 2001, 62(4): 293-300.
- [8] 王明年, 李玉文. 公路隧道围岩亚级分级方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [9] 王明年, 刘大刚, 刘彪, 等. 公路隧道岩质围岩亚级分级方法研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1590-1594. Wang M N, Liu D G, Liu B, et al. Methods for surrounding rock sub-classification of road tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1590-1594.
- [10] 王明年, 陈炜韬, 刘大刚, 等. 公路隧道岩质和土质围岩统一亚级分级标准研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 547-552. Wang M N, Chen W T, Liu D G, et al. Study of unified standard of rocky and soil surrounding rock sub-classification in road tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 547-552.
- [11] 王明年, 魏龙海, 李海军, 等. 公路隧道围岩亚级物理力学参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2252-2259. Wang M N, Wei L H, Li H J, et al. Research on mechanical parameters of subclassification rock mass of highway tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2252-2259.
- [12] 中华人民共和国行业推荐性标准编写组. JTG /TD70-2010 公路隧道设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [13] 付正飞, 张世颀, 郭刚, 等. 概率论方法在云岭隧道围岩分类中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(25): 3064-3068. Fu Z F, Zhang S B, Guo G, et al. Study on application of probability method to surrounding rock classification in yunling tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(25): 3064-3068.
- [14] 孙喜峰, 李廷, 李妹. 铁路隧道围岩级别的综合模糊判定方法[J]. 路基工程, 2008(4): 40-41.
- [15] 姜贤平, 李刚, 李鹏. 考虑相关性的铁路隧道围岩概率分级方法研究[J]. 铁道工程学报, 2010(12): 65-68. Jiang X P, Li G, Li P. Study on correlativity-based probability grading method for surrounding rock of railway tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(12): 65-68.

(编辑 郭 飞)