

文章编号: 1000-7598 (2010) 11-3579-06

工程岩体完整性评价的实用方法研究

马超锋^{1,2}, 李 晓¹, 成国文¹, 蒲丛林³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 河北省环境地质勘察院, 石家庄 050021)

摘 要: 采用结构面统计与结构面结合特征识别相结合的方法, 从结构面几何发育特征和结合特征两方面评价工程岩体完整性。用体积节理数评价结构面几何发育特征, 并引入岩体几何完整性系数 I_g 来表征。根据结构面张开度和充填胶结特征将其结合程度分为 5 级, 给出各级的定性特征描述, 并引入结构面结合程度系数 I_p 对其量化。进而定义了岩体完整性指数将岩体完整性划分为完整、较完整、破碎、较破碎和极破碎 5 级, 并给出对应的定性特征描述和 I_m 值区间。结合公路隧道工程实例, 分别采用文中方法、声波测试法和体积节理数测量法对隧道围岩完整性进行了评价并对评价结果进行了比较。结果表明, 文中方法得到的岩体完整性指数 I_m 与声波测试法得到的 K_v 基本一致, 而体积节理数测量法的评价结果整体上大于声波测试方法。

关 键 词: 工程地质; 岩体完整性评价; 结构面统计; 结构面结合特征; 体积节理数

中图分类号: P 642

文献标识码: A

Study of practical approach to assess integrality of engineering rock mass

MA Chao-feng^{1,2}, LI Xiao¹, CHENG Guo-wen¹, PU Cong-lin³

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Exploration Institute of Environmental Geology of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The integrality of rock mass is assessed based on the geometrical character and cementing status of structural plane, in which the structural plane statistic method and cementing status recognition method are used together. The geometrical character of structural plane is assessed according to volumetric joint count, and the geometrical integrity index of rock mass (I_g) is introduced to represent it. The cementing status of structural plane is classified into five grades based on joint opening and cemented fills. The qualitative character of each grade is given; and the cementing status coefficient of structural plane (I_p) is introduced to represent it. Then the integrality index of rock mass (I_m) is defined as $I_m = I_g \times I_p$. The integrality of rock mass is classified into five grades: integrated, moderate integrated, cracked, moderate cracked, and highly cracked. The qualitative character and I_m of each grade are given. Taken a highway tunnel for example, the integrality of surrounding rock mass of tunnel is assessed by the sound wave test method, the volumetric joint count method and the method suggested in this article respectively; then the assessment results are compared as well. It is found that I_m obtained with the method suggested in this article coincides with K_v gained by sound wave test method, while the results of volumetric joint count method are commonly higher than the sound wave test method.

Key words: engineering geology; assessment of rock mass integrality; structural plane statistics; cementing status of structural plane; volumetric joint count

1 引 言

岩体质量评价与分级一直是勘察、设计、施工及科研人员共同关注的重要课题^[1-5]。岩体质量的优劣取决于构成岩体结构特性的内在因素, 而岩体完整性是起控制性作用的因素之一^[6]。岩石工程的

显著特点之一是其时效性, 对于地下岩石工程尤甚。因此, 如何既科学又方便地评价工程岩体的完整性对岩石工程建设意义十分重大。

目前国内外用以表征岩体完整性的指标较多^[7-8], 获取这些指标的方法主要有 3 类^[6]: ①弹性波测试法, 基于此法的评价指标有岩体完整性系数

收稿日期: 2009-06-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(No. 2009CB724605, No. 2010CB731501); 国家自然科学基金资助项目(No. 40702052); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. KJXC3-SW-L1, No. KZCX2-YW-JS102, No. YZ200912); 中国地质调查局地质调查工作项目 (No. 1212011014026)。
第一作者简介: 马超锋, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事工程地质与隧道工程方面的研究工作。E-mail: machf@mail.iggcas.ac.cn

(岩体龟裂系数) K_v 等; ②岩芯钻探法, 基于该法的评价指标有岩石质量指标 RQD、单位岩芯裂隙数等; ③结构面统计法, 基于此法的评价指标有岩体体积节理数 J_v 、平均节理间距 d_p 等。这些评价方法各有优缺点, 且多数评价指标仅是从某一侧面反映了岩体的完整程度。例如, 弹性波测试法的优点在于能较好地反映岩体的完整性, 但其测试成本较大、测试结果受岩体各向异性特征影响明显^[9]且对测试环境要求较高^[10]。岩芯钻探法获取 RQD 值或单位岩芯裂隙数时严格要求采用 NX 钻头、双层岩芯管钻进实现^[8-11], 且对 RQD 概念本身也存在争议^[12]。结构面统计法在应用上十分方便、快捷, 但该方法的评价结果仅能反映出岩体结构面的几何发育特征, 而不能反映对岩体完整性有重要影响的结构面结合状态^[8]。

显然, 上述各评价方法没有做到科学和实用兼顾。本文针对此问题, 采用便捷的结构面统计与结构面结合特征识别相结合的方法, 从结构面几何发育特征和结合状态两方面评价岩体的完整性, 尝试寻求一种将岩体完整性评价的科学性与实用性相统一的新方法, 并结合某公路隧道工程实例, 与声波测试方法和体积节理数方法的评价结果进行了比较。

2 岩体完整性评价的实用方法研究

文献[8]指出, 声波测试方法不仅能反映结构面的几何发育性状, 亦能反映其物理性状、结合状态。但声波测试成本较大, 数据处理周期较长, 测试过程易受现场声源干扰且其测试结果受岩体各项异性特征影响^[9]。可见, 声波测试法对环境要求较高, 不利于测试工作便捷开展。而岩体体积节理数测试方法简单、便捷, 且在工程地质勘察各阶段及施工阶段均容易获得, 但它不能反映结构面的结合程度, 特别是结构面的张开程度和充填物性状等, 而这些恰是决定岩体完整程度的重要方面。本文从影响岩体完整性的结构面入手, 从结构面的几何发育形态、结合状态两方面进行岩体完整性评价。

2.1 结构面几何发育特征评价

岩体体积节理数 J_v 是国际岩石力学委员会 (ISRM) 推荐用来定量评价岩体节理化程度的一个指标, 即 J_v 能反映岩体结构面的几何发育特征, 如结构面组数、间距、延展性等。本文采用岩体体积节理数来评价结构面的几何发育特征。

记 I_g 表示岩体几何完整性系数, 其中下标“g”表示则由文献[8]可知 I_g 与 J_v 有对应关系, 如图 1

所示, 已被铁质、硅质胶结的结构面这里不予统计。

$$J_v = S_1 + S_2 + \cdots + S_n + S_k \quad (1)$$

式中: S_n 为第 n 组节理每米长测线上的条数; S_k 为每立方米岩体内非成组节理的条数。

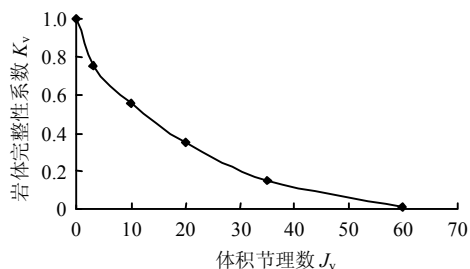


图 1 J_v 与 I_g 对应关系曲线

Fig.1 Comparison of J_v and I_g

评价结构面的几何发育特征时, 应选择有代表性的岩体露头或地下工程开挖面, 针对不同的工程地质岩组、岩性段进行体积节理数统计。除成组节理外, 对延伸长度大于 1 m 的随机节理亦应予以统计。每一测点的统计面积, 不应小于 $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。然后, 基于统计的 J_v 由图 1 即可获得对应的 I_g 值, 从而实现对接结构面几何发育特征的定量评价。

2.2 结构面结合程度评价

2.2.1 评价因素选取

结构面的结合程度与结构面的张开度、胶结程度、充填物性质、粗糙起伏度及岩壁强度等因素相关, 其中张开度和充填胶结物性质起着重要作用。文献[13]指出, 结构面胶结后力学性质有所变化。以铁质、硅质胶结的强度最高, 往往与岩石强度相当, 甚至超过岩石强度。泥质、易溶盐类胶结的结构面强度最低, 且抗水性差, 具一定张开度而未胶结的结构面往往被外来物质充填。砂质、砾质等粗粒充填的结构面性质最好, 黏土质和易溶盐类充填的结构面性质最差。

考虑到评价方法的工程实用性, 本文选取结构面的张开度及其充填胶结物特征, 作为结构面结合程度评价的主要考虑因素。

2.2.2 结构面结合程度划分及其特征

以结构面的张开度和充填胶结物特征为主要考虑因素, 将结构面的结合程度划分为: 结合好、结合较好、结合一般、结合差和结合很差 5 级, 并给出各级的定性特征描述, 见表 1。

表 1 结构面结合程度及其特征 (据文献[8], 有改动)
Table 1 Cementing status and characteristics of structural plane (Citing ref. [8], changed.)

结合程度	结构面特征
结合好	张开度小于 1 mm, 无充填物 张开度为 1~3 mm, 为硅质或铁质胶结 (不予统计) 张开度大于 3 mm, 结构面粗糙, 为硅质胶结 (不予统计)
结合较好	张开度为 1~3 mm, 为钙质胶结 张开度大于 3 mm, 结构面粗糙, 为铁质或钙质胶结
结合一般	张开度为 1~3 mm, 为泥质胶结 张开度大于 3 mm, 结构面粗糙, 为泥质或钙质胶结
结合差	张开度为 1~3 mm, 结构面平直, 为泥质或泥质和钙质胶结; 张开度大于 3 mm, 多为泥质或岩屑充填
结合很差	泥质充填或泥夹岩屑充填, 充填物厚度大于起伏差

2.2.3 不同结合程度结构面的抗剪强度参数取值

抗剪强度是结构面结合程度的重要反映。结构面结合程度越好, 其抗剪强度参数黏聚力和内摩擦角就越大, 反之越小。综合文献[8, 14—19]资料和研究成果, 给出不同结合程度结构面的抗剪强度参数黏聚力 c 和内摩擦系数 f 的取值范围, 如图 2 所示。

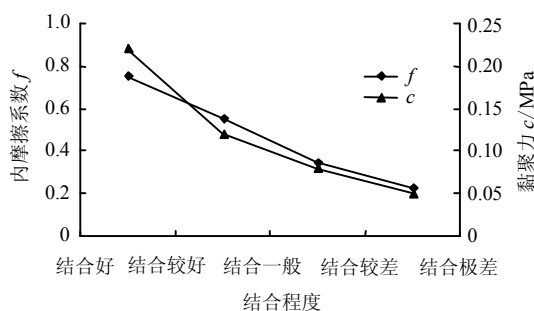


图 2 结构面结合程度及其抗剪强度参数取值
Fig.2 Cementing status and shear strength parameters of structural plane

2.2.4 结构面结合程度量化

记 I_p 为结构面结合程度系数, 用以表征结构面充填胶结的物理状态, 其中下标表示 physical。则根据上述结构面结合程度的定性划分、特征描述及其抗剪强度参数取值, 将结构面结合程度量化见表 2。

表 2 结构面结合程度及其量化
Table 2 Cementing status and quantitative of structural plane

结合程度	I_p
结合好	1.0
结合较好	0.8~1.0
结合一般	0.6~0.8
结合差	0.5~0.6
结合很差	0~0.5

由此, 在定量评价结构面结合状态时, 采用结

构面结合特征识别的方法, 根据结构面的张开度、充填胶结特征, 对照表 1、图 2、表 2 内容, 即可评价并将其量化。

2.3 岩体完整性指数的引入

本文前述内容将岩体完整性评价分为结构面几何性状评价和结构面结合状态评价两方面, 且结构面的几何性状与结合状态共同影响着岩体的完整程度。

引入 I_{rm} 表示岩体完整性指数, 其中 I 为 integrality index, 下标“rm”表示 rock mass, 则定义:

$$I_{rm} = I_g I_p \quad (2)$$

显然, $I_{rm} \in (0, 1)$ 。

2.4 岩体完整程度划分

根据结构面的几何发育特征及其充填胶结状态等物理特征, 将岩体完整性划分为: 完整、较完整、较破碎、破碎和极破碎 5 级, 并给出各级的定性特征描述和岩体完整性指数 I_{rm} 的取值范围。

表 3 岩体完整程度划分及其特征
Table 3 Classification and characteristics of rock mass integrality

岩体完整性	结构面几何发育特征 组数 平均间距/m	结构面结合程度	I_{rm}
完整	1~2 >1.0	结合很好或结合好	0.8~1.0
较完整	1~2 >1.0	结合一般	0.6~0.8
	2~3 1.0~0.4	结合很好或结合好	
较破碎	2~3 1.0~0.4	结合一般	0.4~0.6
	≥3 0.4~0.2	结合好或结合一般	
破碎	≥3 0.4~0.2	结合差	0.2~0.4
	≤0.2	结合一般或结合差	
极破碎	无序	结合很差	0~0.2

3 岩体完整性实用评价方法的应用及与常用方法比较

结合公路隧道施工阶段围岩动态分级工作, 分别采用声波测试方法、体积节理数测量方法及本文方法对隧道若干掌子面的围岩完整性进行了评价, 进而对 3 种评价手段的评价结果进行了比较。

3.1 隧道工程概况

依托青岛至兰州高速公路邯郸至涉县段马鞍山隧道进行数据采集^[20-21]。青兰高速是交通部规划的国家高速公路网“横 6”的重要组成部分, 马鞍山隧道是该段的控制性工程。该隧道设计路线从邯郸市涉县龙虎乡大泉村西南大北蛟沟西端至井店镇玉林井村; 隧道右线从 K153+325~K157+695, 全长 4 370.0 m, 左线从 K153+365~K157+685, 全长

4 320.0 m; 设计采用标准分离式 3 车道设置, 相邻两洞轴间距约 45.00 m。隧道最大开挖宽度约 16.81 m, 开挖高约 11.75 m; 设计车速为 80 km/h。隧道穿越区地层主要为古生界寒武系中统徐庄组、张夏组及寒武系上统崮山组、长山组和凤山组地层, 出口处局部为第四系沉积层。岩性主要为鲕粒灰岩、竹叶状灰岩、白云岩和页岩等。

3.2 声波测试方法评价岩体完整性

声波测试区段为马鞍山隧道出口右线 YK156+900~YK157+020, 该段岩性主要为灰岩, 灰岩层面近水平, 岩体呈裂隙块状结构、中薄层状结构或块状结构。

平行隧道轴线布设 3 条测线。采用 SWS 多波列数字图像工程勘探与工程检测仪进行数据采集, 采用 RSM-SY5 声波检测仪测定致密岩石样本的纵波速度, 采用浅层反射处理系统进行处理数据和成果解译^[22]。采用地震映像技术^[22~23], 确定最佳偏移距为 3 m 和 6 m。采用 1 kg 铁锤锤击作为震源, 每次使用 2 个检波器接收, 道间距为 3 m。每做完一个测点后, 振动源和检波器以等间距同时沿测线移动 1 m, 然后同步进行激发和接收。

经数据解译和成果分析得到测试区段内底板岩体纵波速度及其沿隧道轴线的变化趋势如图 3 所示。测得区内致密岩石样本的 $v_{pr} = 5\ 246\text{ m/s}$ 。由 $K_v = (v_{pm}/v_{pr})^2$ 得到隧道底板岩体完整性系数及其沿隧道轴线的变化 (图 4)。比较底板岩体的平均纵波速度与岩体完整性系数沿隧道轴线的变化趋势 (图 4) 不难发现, 二者有很好的一致性。

3.3 体积节理数方法及本文方法评价岩体完整性

跟随隧道掌子面掘进, 在声波探测区段内大约

10~20 m 对掌子面发育的结构面进行测量, 分别量测成组和非成组发育的结构面间距、产状、张开度及其充填胶结情况。从而获得 J_v 、 I_g 、 I_p 值。

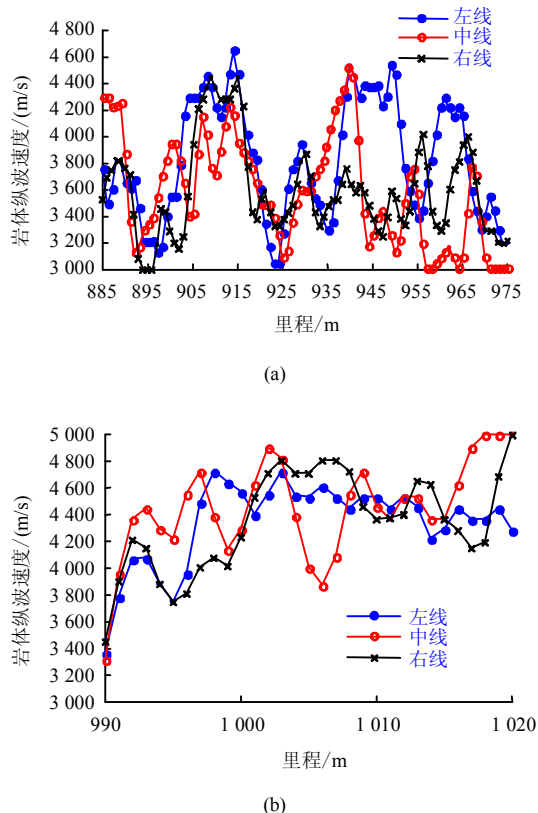


图 3 马鞍山隧道(YK156+885~YK157+020)岩体纵波速度沿隧道轴线变化图

Fig.3 P-wave velocity curves of rock mass along the axes of Maanshan tunnel (YK156+885-YK157+020)

据马鞍山隧道施工阶段围岩动态分级工作成果对数据统计见表 4。

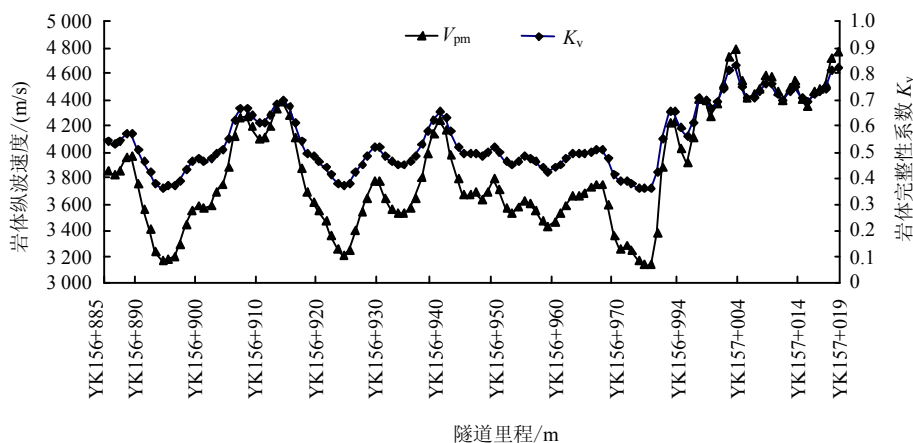


图 4 隧道底板岩体完整性系数与平均纵波速度沿隧道轴线变化趋势

Fig.4 Integrity coefficient and average P-wave velocity curves of tunnel floor rock mass along the tunnel axes

表 4 声波测试区段内掌子面结构面发育情况评价

Table 4 Assessment of integrity of tunnel face structural plane in the sound wave testing section				
掌子面桩号	$K_{v(J_v)}$	I_g	I_p	结构面发育情况
YK156+906	0.65	0.65	0.75	第 1 组间距为 20~30 cm, 线密度为 4 条/米, 起伏, 产状 $123^\circ\angle 8^\circ$; 第 2 组间距为 20~50 cm, 线密度为 3 条/米, 节理面平直, 产状 $335^\circ\angle 77^\circ$, 节理面局部覆盖黄色薄层泥质
YK156+923	0.55	0.55	0.75	第 1 组间距为 10~20 cm, 线密度为 6 条/米, 层理面起伏, 产状 $125^\circ\angle 7^\circ$; 第 2 组间距为 20~30 cm, 线密度为 3 条/米, 产状 $122^\circ\angle 59^\circ$, 节理面平直, 表面覆盖黄色薄层泥质
YK156+938	0.52	0.52	0.85	第 1 组间距为 10~50 cm, 线密度 6 条/米, 产状 $125^\circ\angle 6^\circ$, 结构面起伏、粗糙; 第 2 组产状 $322^\circ\angle 84^\circ$, 间距为 30~50 cm, 线密度为 4 条/米, 平直, 局部覆盖黄色薄层泥质
YK156+955	0.65	0.65	0.86	层理面近水平, 产状 $125^\circ\angle 6^\circ$, 间距为 20~50 cm, 线密度为 3 条/米, 层理面起伏粗糙; 第 1 组节理产状 $155^\circ\angle 72^\circ$, 间距为 80~150 cm, 节理线密度为 2 条/米, 节理面光滑平直; 第 2 组节理面粗糙起伏, 局部有泥质, 节理间距为 20~40 cm
YK156+974	0.60	0.60	0.70	层理面产状 $125^\circ\angle 6^\circ$, 间距为 20~30 cm, 线密度为 4 条/米, 层理面起伏粗糙, 表面覆盖黄色泥质; 节理产状 $155^\circ\angle 72^\circ$, 间距为 20~50 cm, 节理线密度为 3 条/米, 节理面平直, 覆盖有黄色黏土矿物
YK156+987	0.52	0.52	0.75	层理面近水平, 产状 $125^\circ\angle 6^\circ$, 间距为 10~30 cm, 线密度为 6 条/米, 层理面平直光滑, 表面覆盖黄色泥质; 节理面产状 $155^\circ\angle 72^\circ$, 间距为 20~30 cm, 节理线密度为 4 条/米, 节理面平直, 覆盖有黄色黏土矿物
YK157+011	0.68	0.68	0.85	层理面近水平, 产状 $55^\circ\angle 3^\circ$, 间距为 20~40 cm, 线密度 5 条/米, 层间结合较好; 节理面产状 $125^\circ\angle 80^\circ$, 间距为 80~120 cm, 线密度为 1 条/米, 节理面部分微张开, 局部充填黏土矿物

注: $K_{v(J_v)}$ 为由体积节理数 J_v 对照图 1 得到的 K_v 值。

3.4 3 种岩体完整性评价方法结果比较

体积节理数方法由于没有考虑结构面结合状态对岩体完整性的影响, 一般来说要比声波测试方法获得的 K_v 要大, 而本文实用方法既考虑了结构面几何发育特征, 又考虑了其充填胶结特征, 因此与声波测试法获得的 K_v 接近。

综合 3.2 节和 3.3 节内容, 将 3 种评价方法得到的评价结果比较如表 5、图 5 所示。

表 5 3 种岩体完整性评价结果比较

Table 5 Comparison of the integrity assessment results with three kinds of approaches

掌子面桩号	K_v	$K_{v(J_v)}$	I_{rm}
YK156+906	0.62	0.65	0.49
YK156+923	0.38	0.55	0.41
YK156+938	0.58	0.52	0.44
YK156+955	0.47	0.65	0.56
YK156+974	0.36	0.60	0.42
YK156+987	0.42	0.52	0.39
YK157+011	0.70	0.68	0.58

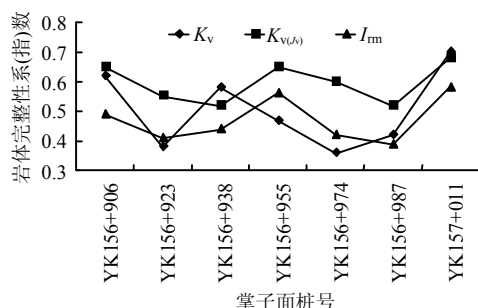


图 5 3 种岩体完整性评价方法结果比较

Fig.5 Comparison of the integrity assessment results with three kinds of approaches

由表 5 和图 5 发现, 体积节理数方法得到的岩体完整性系数 $K_{v(J_v)}$ 整体上大于声波测试方法得到的 K_v 值, 而本文方法得到的 I_{rm} 与声波测试结果基本一致。

4 结 语

岩体完整性评价既要考虑结构面几何发育特征, 还要考虑结构面充填胶结特征。

ISRM 推荐的体积节理数评价方法虽简单、便捷, 但未能反映对岩体完整性有重要影响的结构面充填胶结特征, 因而其评价结果往往高于岩体的实际完整程度。

声波测试方法虽能较为准确地反映岩体的完整性, 但该方法测试成本较大, 且对测试环境要求较高。不利于岩体完整性评价工作便捷开展, 尤其对于施工阶段的地下工程。

本文方法基于便捷的结构面统计和结构面结合特征识别相结合的方法, 从结构面的几何发育特征和充填胶结特征两方面进行岩体完整性评价, 其评价结果和声波测试方法结果基本一致, 较好地实现了便捷与科学的统一。应用表明, 本文提出的岩体完整性实用评价方法在工程应用上是可行的, 此法为岩体完整性评价提供了一条新途径。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50021—94 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.

- [2] 中华人民共和国交通部. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] 刘大刚. 公路隧道施工阶段围岩亚级分级研究[博士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [4] 张鹏, 陈剑平, 邱道宏. 基于粗糙集的隧道围岩质量可拓学评价[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 246—251.
ZHANG Peng, CHEN Jian-ping, QIU Dao-hong. Evaluation of tunnel surrounding rock quality with extenics based on rough set[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 246—251.
- [5] 沈中其, 关宝树. 施工阶段围岩类别的定量评定方法[J]. 上海铁道大学学报, 1998, 12(2): 12—18.
SHEN Zhong-qi, GUAN Bao-shu. The evaluation method for surrounding rocks[J]. **Journal of Shanghai Railway University**, 1998, 12(2): 12—18.
- [6] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [7] 胡文寿, 张显志. 论工程岩体完整性的评价方法[J]. 西安工程学院学报, 2001, 23(3): 50—55.
HU Wen-tao, ZHANG Xian-zhi. Evaluation ways about integrity of the engineering rock mass[J]. **Journal of Xi'an Engineering University**, 2001, 23(3): 50—55.
- [8] 中华人民共和国建设部. GB 50218—94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
- [9] 丁梧秀, 姚增, 蒋振. 岩体工程特性研究中弹性波速参数取值方法探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1353—1357.
DING Xiu-wu, YAO Zeng, JIANG Zhen. Study on methods of how to select reasonably elastic wave velocity parameters of engineering rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9): 1353—1357.
- [10] 孙党生, 焦凯英, 唐大雄, 等. 低信噪比的浅层地震勘探数据处理技术[J]. 物探与化探, 2004, 28(2): 164—166.
SUN Dang-sheng, JIAO Kai-ying, TANG Da-xiong, et al. The technique for low SNR shallow seismic data processing[J]. **Geophysical & Geochemical Exploration**, 2004, 28(2): 164—166.
- [11] DEERE. Technical description of rock cotes for engineering purposes[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 1964, 1: 17—22.
- [12] 杜时贵, 许四法, 杨树峰, 等. 岩石质量指标 RQD 与工程岩体分类[J]. 工程地质学报, 2000, 8(3): 253—259.
DU Shi-gui, XU Si-fa, YANG Shu-feng, et al. Application of ROQ to engineering classification of rocks[J]. **Chinese Journal of Engineering Geology**, 2000, 8(3): 253—259.
- [13] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 18—19.
- [14] 中华人民共和国水利部. GB 50287—99 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [15] 中华人民共和国建设部. GB 50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- [16] 杜时贵. 岩体结构面抗剪强度经验估算[M]. 北京: 地震出版社, 2005.
- [17] 杜时贵, 樊良本. 大溪岭隧道围岩抗剪强度[J]. 浙江工业大学学报, 1995, 23(3): 269—274.
DU Shi-gui, FAN Liang-ben. Shear strength of rock discontinuities of Daxiling tunnel[J]. **Journal of Zhejiang University of Technology**, 1995, 23(3): 269—274.
- [18] 刘明维, 何平, 钱志雄, 等. 岩质边坡结构面实用分类方法研究[J]. 地下空间与工程, 2007, 3(5): 812—820.
LIU Wei-ming, HE Ping, QIAN Zhi-xiong, et al. Study on practical classification method of discontinuities in rock slope[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(5): 812—820.
- [19] 徐磊, 任青文. 不同充填度岩石分形节理抗剪强度的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(3): 52—56.
XU Lei, REN Qing-wen. Numerical simulation of the shear strength of fractal rock joint with different filling percentage[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2007, 35(3): 52—56.
- [20] 重庆交通科研设计院. 青岛—兰州高速公路邯郸至涉县段两阶段施工图设计[R]. 重庆: 重庆交通科研设计院, 2007.
- [21] 河北省交通规划设计院. 青岛—兰州高速公路邯郸至涉县段工程地质勘察报告[R]. 河北: 河北省交通规划设计院, 2007.
- [22] 杨祥森, 林昀, 崔德海. 地震映像法在铁路隧道隐伏岩溶勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(5): 470—475.
YANG Xiang-sen, LIN Yun, CUI De-hai. Application of seismic imaging method to exploration of hidden Karst under railway tunnel[J]. **Chinese Journal of Engineering Geophysics**, 2007, 4(5): 470—475.
- [23] 徐贵来. 地震映像勘探技术研究[J]. 世界核地质科学, 2006, 23(1): 33—39.
XU Gui-lai. Technical development of seismic imaging prospecting[J]. **World Nuclear Geoscience**, 2006, 23(1): 33—39.