

doi: 10.11720/wtyht.2024.1553

叶勇, 陈亮, 刘健. 高放废物处置巷道尺度岩体适宜性评价[J]. 物探与化探, 2024, 48(6): 1545–1552. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1553>

Ye Y, Chen L, Liu J. Tunnel-scale evaluation of rock mass suitability for the disposal of high-level radioactive waste[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1545–1552. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1553>

高放废物处置巷道尺度岩体适宜性评价

叶勇^{1,2}, 陈亮^{1,2}, 刘健^{1,2}

(1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 国家原子能机构高放废物地质处置创新中心, 北京 100029)

摘 要: 岩体适宜性评价是高放废物处置库选址和设计的核心内容之一, 以判断场址岩体是否满足处置库长期包容和隔离核素的功能要求。在已提出的场址尺度 Q_{HLW} 岩体适宜性评价方法的基础上, 本文进一步发展了处置巷道尺度岩体适宜性评价准则, 建立了“预评价+最终评价”两阶段的评价体系。同时, 结合芬兰高放废物处置 ONKALO 地下实验室场址示范巷道 1 (DT1) 揭露的地质水文信息, 对处置巷道尺度两个阶段的评级标准体系进行测试和验证。对比分析优化 Q_{HLW} 获得的适宜性评价结果与芬兰 RSC 岩体适宜性评价方法定性评价结果, 发现两种方法得出的评价结果基本一致, 验证了处置巷道尺度岩体适宜性评价方法的可行性。

关键词: 高放废物地质处置; 岩体适宜性评价; 处置巷道尺度

中图分类号: P587; P597.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)06-1545-08

0 引言

核工业的不断发展产生了大量的高水平放射性废物(以下简称高放废物), 目前高放废物普遍采用深地质处置方式对其进行最终处置^[1], 而围岩作为深地质处置的最终屏障, 准确评价其本身的性质以及所处状态对处置库长期安全性至关重要。但是, 传统岩体质量评价方法(如 BQ、RMR 以及 Q)均无法满足高放废物处置长期安全性要求, 如我国国家标准中使用的 BQ 法主要注重岩石坚硬程度和岩体完整性评价, 忽略了岩体所处应力环境和地下水环境对岩体的影响, 而这些因素将对服役时间达到万年尺度的处置库的长期安全性产生影响; 国际上通用的 RMR 方法和巴顿 Q 方法全面考虑了岩体的完整性、抗剪强度以及应力地下水环境, 但是仍然只是评价岩体可建造性, 未能考虑高放废物处置的长期安全性要求。因此, 芬兰依据本国的地质条件及处置概念提出了 RSC 岩体适宜性评价方法^[2]; 同时, 我国也针对高放废物处置研究需求提出了相应的适

宜性评价系统—— Q_{HLW} ^[3-4], 并通过 Q_{HLW} 已在场址尺度展开了深入的适宜性评价研究, 为最终确定地下实验室场址提供了有效手段和可靠依据。

然而, 随着地下实验室从场址筛选阶段进入到地下实验室建设阶段, 岩体适宜性评价工作也由场址尺度过渡到巷道尺度。随着评价尺度不断缩小, 岩体适宜性的评价工作也越来越繁杂, 建立系统、完整并适用于工程建设的岩体适宜性评价体系对地下实验室建设显得尤为重要。目前, 已有的 Q_{HLW} 岩体适宜性评价系统并未建立完整的岩体适宜性评价体系, 仅在场址尺度展开了较为深入的研究, 研发了场址尺度岩体适宜性评价方法; 巷道尺度适宜性评价准则仅进行了方法学方面的讨论, 未能系统论证巷道尺度指标体系及其取值标准与处置库长期安全性和巷道设计需求之间的关系。因此, 本文对 Q_{HLW} 中处置巷道尺度岩体适宜性评价准则进行优化, 利用芬兰 ONKALO 地下实验室示范巷道 DT1 的地质编录数据, 测试和验证处置巷道尺度岩体适宜性评价准则 Q_{HLW}^T 的合理性与可行性。

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-07-29

基金项目: 国防科工局核设施退役与放射性废物治理专项(科工二司[2020]基础科研计划(JCKY2020201C003))

第一作者: 叶勇(1996-), 男, 2022年毕业于核工业北京地质研究院, 主要是从事岩体适宜性评价研究工作。Email: yey20150138@163.com

通讯作者: 陈亮(1982-), 男, 山东东营人, 正高级工程师, 博士, 长期从事高放废物地质处置技术研究工作。Email: chenliang@briug.cn

1 处置巷道岩体适宜性评价准则

目前已有的巷道尺度评价标准仅在个别竖直深钻孔中进行了模拟应用(详见参考文献[3]),其在评价指标选取及其取值标准等方面有待结合场址和处置概念开展进一步的研究。原有的巷道尺度评价准则并未考虑在巷道开挖之前利用超前钻孔数据对巷道进行量化岩体适宜性预评价,同时在巷道尺度超前钻孔评价和开挖后评价采用的是相同的适宜性评价公式,并未考虑到巷道开挖后对评价指标及其评价标准产生的不利影响。因此本文将巷道尺度适宜性评价过程优化为两个评价阶段:第一阶段根据超前钻孔或处置巷道所在深度下钻孔数据对处置巷道预选区域进行岩体适宜性预评价,根据适宜性预评价结果确定是否开挖处置巷道;第二阶段根据确定开挖处置巷道的地质数据及其他参数,对处置巷道进行最终岩体适宜性评价。依据芬兰岩体适宜性评价经验和 Q_{HLW} 量化评价原理,提出第一、第二阶段的评价公式如下:

$$Q_{HLW}^{T_1} = C_{fz}^{T_1} \times C_{chm}^T \times Q' \times \frac{J_{w,HLW}^T}{SRF_{HLW}^T}, \quad (1)$$

$$Q_{HLW}^{T_2} = C_{fz}^{T_2} \times C_{chm}^T \times Q' \times C_{flow} \times \frac{1}{SRF_{HLW}^T}, \quad (2)$$

式中: $C_{fz}^{T_1}$ 、 $C_{fz}^{T_2}$ 分别为第一、二阶段裂隙影响指标; C_{chm}^T 为地下水化学指标; Q' 为岩体完整性指标; $J_{w,HLW}^T$ 为岩体渗透性能指标; C_{flow} 为流量影响指标; SRF_{HLW}^T 为岩体强度应力比指标。

将巷道尺度适宜性评价分为两个评价阶段,极大地避免了在岩体适宜性程度低的处置区域开挖处置巷道,造成对整体处置区域进行不必要的扰动和经济的浪费。与芬兰 RSC 岩体适宜性评价方法相比, Q_{HLW} 依据超前钻孔及巷道开挖获得的数据对岩体适宜性进行量化评价,可精确判定处置巷道每一段的适宜性,极大地减少了定性评价的误差,提高了处置巷道的空间利用率。

1.1 裂隙影响指标

在巷道尺度下,要求对巷道围岩中可能出现的更小裂隙结构及其特殊结构面进行规避,因此场址尺度下的裂隙带影响指标评价标准已经不再适用。Fälth 和 Hökmark 等研究结果表明,在处置巷道 100~200 m 范围内,裂隙长度应小于 75 m;在处置巷道 200 m 范围之外,裂隙长度不能大于 150 m^[5]。因为在设计的地震烈度条件下,地震可能导致处置巷道

围岩相对变形大于 10 cm,继而破坏其封堵性能,因此本文取最不利情况,提出巷道尺度裂隙影响指标评价准则如下:

$$C_{fz}^T = \begin{cases} 0, & L \geq 75\text{m} \\ 1.0, & L < 75\text{m} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: L 为裂隙长度。两个评价阶段的裂隙均采用式(3)评价标准。预评价阶段主要依据钻孔电视结合三维地质模型判断该处是否存在大于 75 m 的裂隙;最终评价阶段主要依据巷道开挖进行地质编录后,利用三维地质模型判断是否存在大于 75 m 的裂隙。

1.2 地下水化学指标

在处置场址评价过程中, Q_{HLW} 适宜性评价系统对地下水的 pH、TDS 以及 Cl^- 浓度取值做了详细介绍。在处置区域尺度,刘亦亨^[6]根据地下水化学对处置罐材料腐蚀及缓冲材料化学稳定性的影响,将地下水化学指标拆分为处置罐腐蚀系数和缓冲材料侵蚀系数。在处置巷道尺度,同一个处置深度下,地下水化学环境基本相同,因此处置巷道尺度地下水化学评价准则沿用处置区域评价准则。根据刘亦亨^[6]研究成果,地下水指标取值标准如下:

$$C_{chm}^T = C_{chm,c}^T \cdot C_{chm,b}^T, \quad (4)$$

式中: $C_{chm,c}^T$ 为处置区域地下水化学环境处置罐抗腐蚀系数; $C_{chm,b}^T$ 为处置区域地下水环境缓冲材料的抗侵蚀系数。处置巷道尺度预评价和最终评价阶段均采用该评价准则,各参数取值范围如表 1、表 2 所示。

1.3 岩体渗透性能指标

芬兰在高放废物处置工程安全评价研究^[7]中认为,为更好发挥处置罐体和缓冲材料的长期安全性能,岩体渗透率应低于 10^{-9} m/s ;瑞典 SKB 前期安全评价^[8]中指出,高放废物地质处置围岩的渗透率小于 10^{-8} m/s 时,可阻滞放射性核素在处置围岩中的迁移。因此,根据保守原则,本文取渗透特性的阈值为 10^{-9} m/s ,处置区域的渗透特性指标取值标准如下:

$$J_{w,HLW}^T = \begin{cases} 1.0, & K < 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ 0.8, & 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq K < 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ 0.1, & K \geq 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: K 为岩体的渗透率。需要说明的是,渗透特性评价准则仅在预评价阶段使用,而在最终评价阶段采用流量影响指标来综合评估屏障系统对核素的阻滞作用。

表 1 处置罐体抗腐蚀系数 $C_{chm,c}^T$ 取值范围^[6]

Table 1 Scope of corrosion resistance coefficient of disposal canister

处置罐体材料	地下水化学环境	$C_{chm,c}^T$
铜	同时满足以下 2 个条件:(1)7<pH<10;(2)[SO ₄ ²⁻] <[Cl ⁻] <2 500 mg · L ⁻¹	1.0
	仅满足以下 1 个条件:(1)7<pH<10;(2)[SO ₄ ²⁻] <[Cl ⁻] <2 500 mg · L ⁻¹	0.8
	以下 2 个条件均不满足:(1)7<pH<10;(2)[SO ₄ ²⁻] <[Cl ⁻] <2 500 mg · L ⁻¹	0.1
碳钢	同时满足以下 2 个条件:(1)8<pH<9.5;(2)[HCO ₃ ⁻] <6 000 mg · L ⁻¹ 且 [Cl ⁻] <3 000 mg · L ⁻¹	1.0
	仅满足以下 1 个条件:(1)8<pH<9.5;(2)[HCO ₃ ⁻] <6 000 mg · L ⁻¹ 且 [Cl ⁻] <3 000 mg · L ⁻¹	0.8
	以下 2 个条件均不满足:(1)8<pH<9.5;(2)[HCO ₃ ⁻] <6 000 mg · L ⁻¹ 且 [Cl ⁻] <3 000 mg · L ⁻¹	0.1

表 2 缓冲材料抗腐蚀 $C_{chm,b}^T$ 取值范围^[6]

Table 2 Scope of corrosion resistance coefficient of cushion material

地下化学环境	$C_{chm,b}^T$ 取值
同时满足以下 3 个条件:(1)6<pH<10;(2)TDS<10 g · L ⁻¹ ;3)I>10 ⁻³ mol · L ⁻¹	1.0
满足以下 3 个条件中的 2 个:(1)6<pH<10;(2)TDS<10 g · L ⁻¹ ;3)I>10 ⁻³ mol · L ⁻¹	0.8
仅能满足以下 3 个条件中的 1 个或均不满足:(1)6<pH<10;(2)TDS<10 g · L ⁻¹ ;3)I>10 ⁻³ mol · L ⁻¹	0.1

注:TDS 值表示溶解总团体含量; I 表示阳离子强度。

1.4 流量影响指标

完成处置巷道开挖工作后,可以直接测定地下水流量。巷道中的流量是岩体渗透特性、围岩地应力以及水力梯度综合作用的结果,通过对处置巷道中的流量控制,可更好地发挥屏障系统对核素迁移的阻滞作用。因此,在处置巷道尺度第二阶段的评价中,芬兰 RSC 方法不再使用岩体渗透系数作为评价指标,而是直接采用流量来评价地下水流动带来的影响。Äikäs 等^[9]认为当渗透率为 10⁻⁹m/s 时,每 100 m 巷道内渗流量约为 1 L/min,当处置巷道为 10 m 时,流量阈值为 0.1 L/min。因此,根据以上研究成果,本文流量影响指标评价标准如下:

$$C_{flow} = \begin{cases} 1.0, & Q < 1000\text{mL/h} \\ 0.8, & 1000\text{mL/h} \leq Q < 6000\text{mL/h} \\ 0.1, & Q \geq 6000\text{mL/h} \end{cases}, \quad (6)$$

式中:Q 为巷道内的流量。流量影响指标仅在第二阶段最终评价中使用。

1.5 岩体强度应力比指标

高放废物处置工程位于深部完整岩体中,其稳定性与围岩岩体强度及其所处应力环境相关,需要重点规避岩爆地质灾害。根据 Barton 等^[10]的研究成果,对于完整岩体,当强度应力比(岩体单轴抗压强度/最大主应力)大于 10 时,可以认为对围岩岩体是相对稳定的;当强度应力比介于 2.5~10 时,围

岩可能出现岩体剥落或轻微的岩爆现象;当强度应力比小于 2.5 时,有可能发生强烈的岩爆现象。在高放处置工程中需要重点规避岩爆地质灾害,因此巷道尺度岩体适宜性评价中强度应力比取值标准如下:

$$SRF_{HLW}^T = \begin{cases} 0.5, & (\sigma_{UCS}/\sigma_1) > 10 \\ 1, & 2.5 \leq (\sigma_{UCS}/\sigma_1) \leq 10 \\ 20, & (\sigma_{UCS}/\sigma_1) < 2.5 \end{cases}, \quad (7)$$

式中:σ_{UCS}/σ₁ 为完整岩体单轴抗压强度/最大主应力,预评价及最终评价阶段均采用该应力比值评价标准。

1.6 岩体完整性指标

岩体完整性指标 Q' 依据下式计算得出:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a}, \quad (8)$$

式中:RQD 为 Deere 的岩石质量指标;J_n 为节理组数;J_r 为最脆弱节理的粗糙度系数;J_a 为最脆弱节理面的蚀变程度或充填情况。基于处置区域钻孔数据计算得到处置区域的岩体完整指标 Q' 值(Q' 基于 Barton 的 Q 系统;RQD、J_n、J_r 和 J_a 均参考 Q 系统中各参数的取值方法,详见参考文献[10])。

1.7 适宜性评价标准

根据计算获得 Q_{HLW} 指标值,将岩体分为适宜、基本适宜和不适宜 3 类,如表 3 所示。

表 3 Q_{HLW} 法处置巷道尺度围岩适宜性评价标准

Table 3 Evaluation standard for suitability of Q_{HLW} at tunnel scale

Q_{HLW}^T	质量等级	适宜性描述
(400,+∞]	I	适宜 岩体适宜性程度高,适合作为处置岩体
(10,400]	II	基本适宜 岩体适宜性程度一般,需要做更深入的研究,确定是否存在其他影响适宜性因素
≤10	III	不适宜 对该岩体应采取避开策略

2 巷道尺度适宜性评价结果

2.1 ONKALO 地下实验室示范巷道概况

ONKALO 地下实验室的示范巷道区域位于深度-420 m,与计划处置高放废物深度完全一致。该区域前期设计了两条示范巷道(图 1);示范巷道 1

(DT1)和示范巷道 2(DT2)。两条示范巷道的规划设计长度均为 80 m,通过 RSC 初步适宜性评估,DT1 的实际开挖长度为 52 m,DT2 的实际开挖长度为 105 m。两个示范巷道设计了试验处置坑(EH),用于模拟处置坑开挖、处置罐的安装、缓冲区域和巷道的回填以及与处置概念相关研究^[11]。本文仅对示范巷道 1(DT1)进行对比研究。

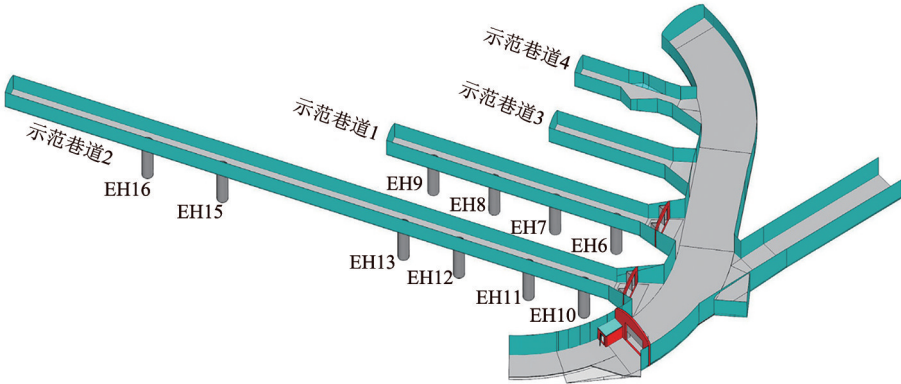


图 1 ONKALO 场址示范处置区域布局示意
Fig.1 Schematic diagram of demonstration disposal area layout of ONKALO site

2.2 裂隙及断裂带影响

在示范巷道 DT1 中,影响其适宜性的因素主要是:断裂带 OL-BFZ297 和 OL-BFZ084 以及裂隙 1 和 6^[12](如图 2 所示)。根据裂隙影响指标评价准则,对断裂带或裂隙及其影响带进行规避,裂隙 1 致使进尺 0~13.60 m 这部分岩体不适宜;断裂带 OL-BFZ297 导致需对进尺 21.07~24.85 m 该部分岩体进行规避;裂隙 6 导致需对进尺 25.85~42.10 m 该部分岩体进行规避;断裂带 OL-BFZ084 导致需对进尺 50.15~52.00 m 该部分岩体进行规避。因此在进尺 0~13.60 m、21.07~24.85 m、25.85~42.10 m 和 50.15~52.00 m,预评价和最终评价阶段的裂隙影响指标 C_{fr} 的取值均为 0;在进尺 13.60~21.07 m、24.85~25.85 m 和 42.10~50.15 m 处,预评价和最终评价阶段的裂隙影响指标 C_{fr} 取值均为 1.0,示范巷道 DT1 裂隙影响指标取值如图 3 所示。

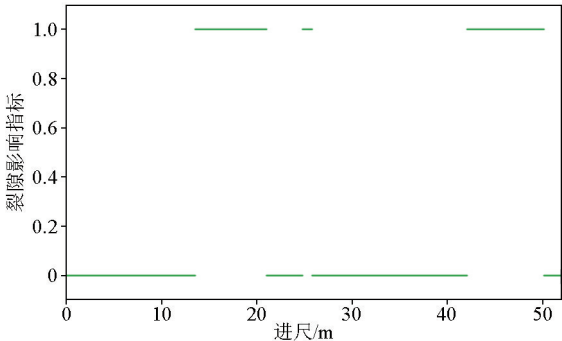


图 3 示范巷道 DT1 裂隙影响指标取值
Fig.3 The value of the fracture influence index in DT1

2.3 地下水化学

示范巷道 DT1 地下水化学特征如表 4 所示,根据式(4)以及巷道尺度地下水化学评价标准(表 1、表 2),计算得到预评价及最终评价阶段的地下水化学指标 C_{chm}^T 取值均为 1.0。

表 4 示范巷道 DT1 地下水化学特征^[13]

Table 4 Chemical characteristics of groundwater in DT1^[13]

取样深度/ m	参数				
	TDS	pH	Cl ⁻ 浓度/ (mg · L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ 浓度/ (mg · L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ 浓度/ (mg · L ⁻¹)
422~425	10.54	7.5	6150	420	19
488~492	21.2	7.5	7253	400	15

2.4 岩体渗透性能

依据每 10 m 间隔以及在裂隙和断裂带等特殊位置对巷道围岩进行 HTU 测试,得到 DT1 各处的

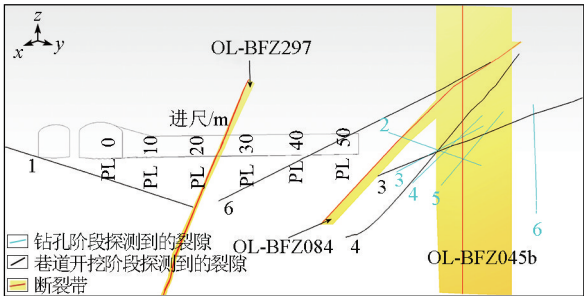


图 2 示范巷道 DT1 断裂带及裂隙分布^[12]

Fig.2 Fault zone and fracture distribution of DT1^[12]

岩体渗透性,如图 4 所示。进尺 21.07~24.85 m 的渗透率为 $7.8\times10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,介于 $1\times10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1\times10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,依据渗透特性指标取值标准(式(5)),在进尺 21.07~24.85 m 处,预评价阶段岩体渗透性能 $J_{w,HLW}^T$ 的取值为 0.8;进尺 0~21.07 m 及 24.85~55.0 m 的岩体渗透率均低于 $1\times10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,依据渗透特性指标取值标准(式(5)),其岩体渗透性能 $J_{w,HLW}^T$ 取值为 1.0(图 5)。

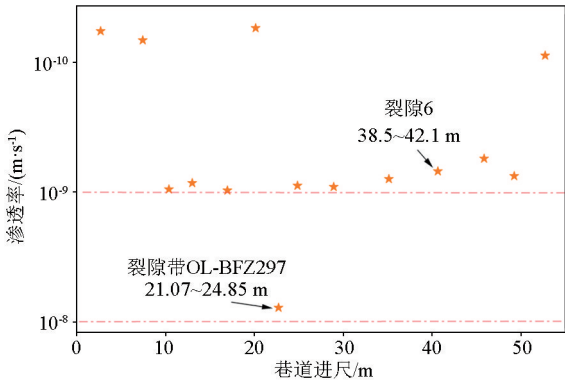


图 4 示范巷道 DT1 岩体渗透特性测量值^[14]

Fig.4 Permeability characteristics of rock in DT1^[14]

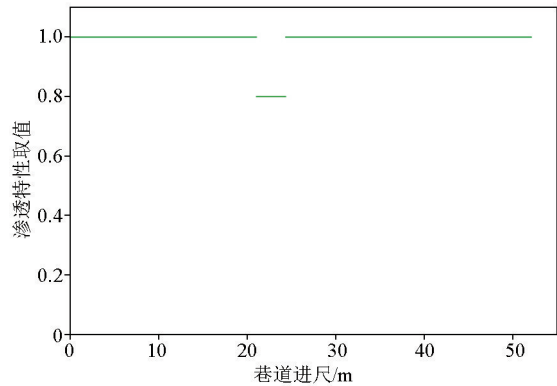


图 5 示范巷道 DT1 渗透特性取值

Fig.5 The value of the permeability index in DT1

2.5 流量

依据示范巷道 DT1 的水文流量测试和长期监测,获得示范巷道 DT1 的流量分布特征。根据示范巷道 DT1 各点位的流量(图 6),依据流量影响指标评价准则(式(6)),得到进尺 0~14.71 m 和 42.10~50.12 m 的流量影响指标取值为 1.0,进尺 14.71~21.07 m、24.85~42.10 m 的流量影响指标取值为 0.8,进尺 21.07~24.85 m、50.12~52.10 m 的流量影响指标取值为 0.1。示范巷道 DT1 在最终适宜性评价阶段流量影响指标取值如图 7 所示。

2.6 强度应力比

依据 LVDT 地应力反演技术,得到示范巷道 DT1 内最大主应力值为 19.2 MPa ^[15]。岩体单轴抗

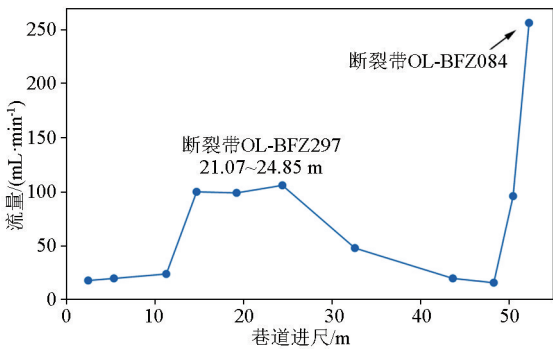


图 6 示范巷道 DT1 流量分布^[14]

Fig.6 Flow distribution in DT1^[14]

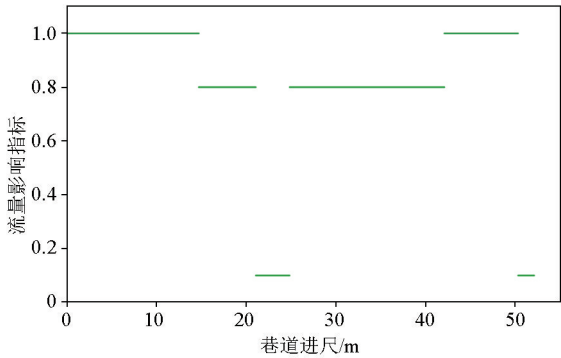


图 7 示范巷道 DT1 渗透特性取值

Fig.7 The value of the flow index in DT1

压强度为 128.40 MPa ,计算得出强度应力比为 6.69。根据强度应力比评价准则(式(3)~式(5)),岩体强度应力比 SRF_{HLW}^T 取值为 1.0。需要指出的是,芬兰未在 DT1 中对地应力进行系统性的测量,仅在特殊位置对巷道围岩进行地应力测试,故 DT1 在适宜性预评价及最终评价过程中 DT1 强度应力比值均取 1.0。

2.7 岩体完整性

岩体完整性指标 Q' 依据式(8)计算得出,基于钻孔 ONK-PH-16 岩心^[14]计算得到 DT1 预评价和最终评价阶段的岩体完整指标 Q' 值(如图 8 所示)。

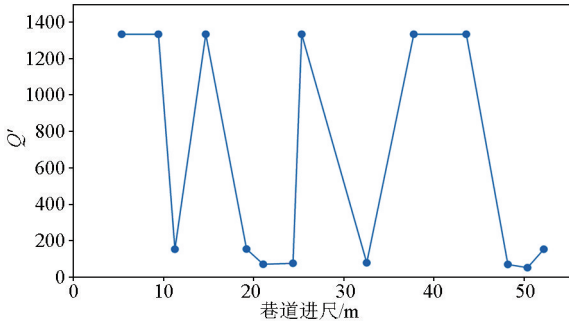


图 8 示范巷道 DT1 岩体完整指标 Q' 值^[14]

Fig.8 Rock mass integrity index of DT1^[14]

2.8 适宜性评价结果

根据上述特征参数和式(1)、式(2),得到示范

巷道 DT1 的第一阶段与第二阶段巷道适宜性评价结果(图 9)。示范巷道 DT1 两个评价阶段的 Q_{HLW}^{T1} 值和 Q_{HLW}^{T2} 值基本一致,其差异主要体现在巷道内渗透率取值与流量影响指标取值的不同。在部分区域渗透率低的情况下,其渗流量超过所限制的阈值,导致渗透率与流量影响指标取值不同步,这说明仅仅依据超前钻孔获得渗透率测试数据不能完全反映处置巷道的水文条件,开展第二阶段的适宜性最终评价是必要的。

根据最终评价阶段的适宜性评价结果,在进尺 14.60~21.07 m、24.85~25.85 m 和 42.10~50.15 m 处岩体适宜性为“适宜”。 Q_{HLW} 评价结果与芬兰评价结果基本一致(图 10、图 11)。但在处置巷道进尺 24.85~25.85 m 处, Q_{HLW} 与 RSC 的适宜性判定结果不一致,RSC 认为该区域仅约为 1.0 m,无法设计、布置处置坑,故在 RSC 方法中此区域评价结果为“不适宜”; Q_{HLW} 在该处的适宜性评价结果为“适宜”,从各评价参数来看,此区域岩体完整,蚀变程度低,渗透率低及地应力比值高,地质处置的适宜性程度高。由于在巷道尺度阶段,该区域数据不完善,

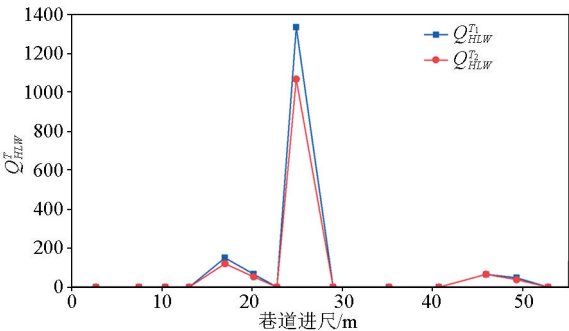


图 9 示范巷道 DT1 Q_{HLW} 适宜性评价结果
Fig.9 Suitability evaluation results of Q_{HLW} in DT1

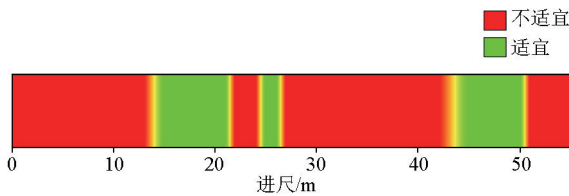


图 10 示范巷道 DT1 Q_{HLW} 适宜性评价结果
Fig.10 Suitability evaluation results of Q_{HLW} in DT1

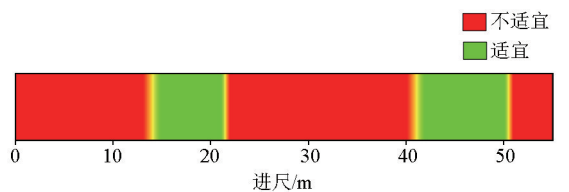


图 11 示范巷道 DT1 RSC 适宜性评价结果^[2]
Fig.11 Suitability evaluation results of RSC in DT1^[2]

部分参数判断可能存在误差,将该区域判断为“不适宜”会造成岩体的大量浪费,极大的损害地质处置空间。因此, Q_{HLW} 量化评价方法可精确评价巷道的适宜性,不会造成巷道空间的浪费,同时 Q_{HLW} 多参数的量化评价可减小因数据不足而造成的误差。

3 示范巷道处置坑布置

巷道尺度围岩适宜性评价方法本质上一种工程协同的动态评价体系(如图 12 所示),随着工程的开展,获取的数据不断增多,对场址的认识也不断加强,评价方法以及场址评价结果也会随之不断更新。处置巷道的评价结果是确定处置巷道内处置坑位置的依据,同时处置坑超前钻孔勘察和硐室开挖揭露的岩体信息可以再次应用于处置巷道适宜性评价结果的验证和修正,实现工程和岩体评价协同推进以及岩体适宜性的动态评价。

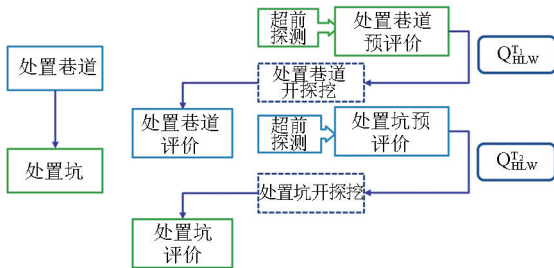


图 12 Q_{HLW} 工程评价系统示意
Fig.12 Schematic diagram of Q_{HLW} engineering evaluation system

根据处置坑超前探测数据^[16-17],在进尺 13.60~19.75 m 和 42.10~50.15 m 没有发现新的需要规避的裂隙或水力传导特征,根据超前钻孔对处置坑围岩适宜性的评价结果与处置巷道第二阶段的评价结果一致,因此在进尺 15 m 和 45 m 处可确定为两处处置坑的位置(ONK-EH6、ONK-EH9),表明在巷道尺度阶段,两处区域的适宜性评价结果为“适宜”是正确的。

值得注意的是,在进尺 35 m 的超前钻孔(ONK-PP316,图 13)中没有观察到裂隙 6,这说明,根据超前钻孔对处置坑围岩适宜性的评价结果与处置巷道第二阶段的评价结果并不一致,因此该处是否最终作为处置坑有待进一步论证。需要说明的是,处置坑尺度的围岩适宜性评价也应该包含预评价和最终评价两个阶段,以支撑处置坑设计和施工,并获得可靠的评价结果。有关处置坑尺度的适宜性评价准则,是后续研究的重要任务。

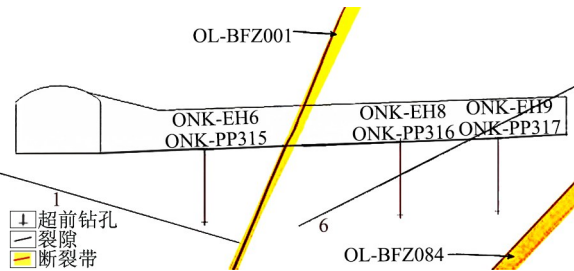


图 13 示范巷道 DT1 处置坑布置示意^[18]

Fig.13 Schematic diagram of disposal hole layout of DT1^[18]

4 结论及讨论

本文提出了巷道尺度两个阶段的评价公式,并建立了裂隙影响指标、地下水化学指标、岩体完整性指标、岩体渗透性能指标、岩体强度应力比指标以及流量指标的评价准则。同时,将提出的巷道尺度评价方法应用于芬兰 ONKALO 地下实验室示范巷道 DT1 中,得到示范巷道 DT1 的 Q_{HLW}^1 、 Q_{HLW}^2 值,综合两阶段评价结果判定示范巷道 DT1 岩体适宜性。 Q_{HLW} 岩体适宜性评价结果与 RSC 评价结果一致,验证了巷道尺度岩体适宜性评价方法的可行性。

评价结果表明, Q_{HLW} 在适宜性判定中与 RSC 存在差异,RSC 以工程指向为目标,对于无法放置处置罐的区域,适宜性直接判定为“不合适”,然而 Q_{HLW} 以对岩体的定量评价为导向,有助于处置区域提高岩体空间利用率,充分掌握处置区域的岩体地质情况,处置区域可得到精细化利用。此外,实际应用经验表明,在处置坑布置时,处置巷道评价结果可能会与处置坑超前钻孔勘查阶段评价结果相矛盾,需要进一步研发处置坑尺度的两阶段适宜性评价准则。

参考文献 (References):

[1] IEAE.Scientific and technical basis for the geological disposal of radioactive wastes[R].Vienna:International Atomic Energy Agency,2003.

[2] Mcewen T,Mattila J,Askokä P.Rock suitability classification-RSC [R].Olkiluoto;Posiva Oy,2012.

[3] Chen L,Wang J,Liu J.A new rock mass classification system Q_{HLW} for high-level radioactive waste disposal[J].Engineering Geology, 2015,190:33-51.

[4] 陈亮,王驹,刘健,等.高放废物地质处置岩体适宜性评价方法 (Q_{HLW}) 及其在地下实验室选址中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(6):1385-1394.

Chen L,Wang J,Liu J,et al.A new system of rock suitability classification Q_{HLW} for high-level radioactive waste disposal and its application in the selection of URL site in China[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(6):1385-1394.

[5] Heta L.Terminology report respect distance:The use of the term respect distance in Posiva and SKB[R].Olkiluoto;Posiva Oy,2007.

[6] 刘亦亨.高放废物处置库巷道尺度岩体适宜性评价方法 (Q_{HLW}) 研究[D].北京:核工业北京地质研究院,2019.

Liu Y H.Study on the evaluation method of roadway-scale rock mass suitability (Q_{HLW}) for high level radioactive waste repository[D].Beijing:Beijing Research Institute of Uranium Geology,2019.

[7] Kierar I.Safety assessment report[R].Wettingen;Nagra,1994.

[8] Munier R,Hokmark H.Respect distances-rationale and means of computation [R].Stockholm;Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co(SKB),2004.

[9] Äikäs S B,Pete A.Exploring conditioned simulations of discrete fracture networks in support of hydraulic acceptance of deposition holes[R].Olkiluoto;Posiva Oy,2018.

[10] Barton N,Lien R,Lunde J.Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J].Rock Mechanics,1974,6(4):189-236.

[11] Anna R,Ilkka L S M,Paula K.Design and construction of equipmentand experimental deposition holes in ONKALO demonstration tunnel 1[R].Olkiluoto;Posiva Oy,2017.

[12] Salminen P.Geometrical and mechanical properties of the fractures and brittle deformation zones based on the ONKALO tunnel mapping the shafts and the demonstration tunnels[R].Olkiluoto;Posiva Oy,2015.

[13] Nina P,Eliisa H,Ylä-Mella M.Groundwater sampling at Olkiluoto, Eurajoki from the borehole OL-KR6 during a long-term pumping test in 2004[R].Olkiluoto;Posiva Oy,2006.

[14] Komulainen J,Pekkanen J.Difference flow measurements and hydraulic interference test in ONKALO at Olkiluoto drill holes ONK-PH16 and ONK-PH17[R].Eurajoki;Posiva Oy,2012.

[15] Hakala M.In situ stress measurements in ONKALO with LVDT-Cell [R].Olkiluoto;Posiva Oy,2017.

[16] Kärnbränslehantering S.Detailed site investigation programme for the construction and operation of the repository for spent nuclear fuel[R].Olkiluoto;Posiva Oy,2018.

[17] Kärnbränslehantering S.The integrated sulfide project-Summary Report[R].Olkiluoto;Posiva Oy,2019.

[18] Markström I,SKA.Rock visualization system[R].Olkiluoto;Posiva Oy,2015.

Tunnel-scale evaluation of rock mass suitability for the disposal of high-level radioactive waste

YE Yong^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}, LIU Jian^{1,2}

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. CAEA Innovation Center for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, Beijing 100029, China)

Abstract: Rock mass suitability evaluation is a core part of the siting and design of a disposal repository for high-level radioactive waste, aiming to determine whether the rock masses at the site meet the functional requirements for long-term containment and radionuclides isolation. Based on the previously proposed site-scale evaluation method (Q_{HLW}) of rock mass suitability, this study further developed criteria for the tunnel-scale evaluation of rock mass suitability and established a two-phase evaluation system consisting of pre-evaluation and final evaluation. Additionally, in combination with geological and hydrological data revealed by demonstration tunnel 1 (DT1) at the site of the ONKALO underground research laboratory in Finland, this study tested and verified the criteria of the two-phase evaluation system on the disposal tunnel scale. The comparison between the suitability evaluation results obtained using the optimized Q_{HLW} and the qualitative evaluation results determined using the rock suitability classification (RSC) rock mass grading method indicates that both methods yielded roughly consistent results. This confirms the feasibility of the tunnel-scale evaluation method of rock mass suitability.

Key words: geological disposal of high-level radioactive waste; evaluation of rock mass suitability; tunnel-scale

(本文编辑:蒋实)