

Research  
Tunnel Engineering—Article

## 利卢埃特河上游水电站项目——不列颠哥伦比亚省山区径流式水电项目发电隧洞建设中面临的挑战

Nichole Boulton<sup>a,\*</sup>, Oliver Robson<sup>b</sup>, Serge Moalli<sup>c</sup>, Rich Humphries<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Golder Associates Ltd., Squamish, British Columbia V8B 0B4, Canada

<sup>b</sup> Innogex Renewable Energy Inc., Vancouver, British Columbia V6E 4E6, Canada

<sup>c</sup> EBC Inc., North Vancouver, British Columbia V7L 0B5, Canada

<sup>d</sup> Golder Associates Ltd., Squamish, British Columbia V8B 0B4, Canada

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 31 March 2017

Revised 7 September 2017

Accepted 22 September 2017

Available online 13 March 2018

#### 关键词

径流式水利工程

发电隧洞

管棚支护

拱棚管

火山堆积物

浮石

巷道掘进机

环境限制

### 摘要

利卢埃特河上游水电站项目 (ULHP) 是一个径流式发电项目, 位于加拿大不列颠哥伦比亚省彭伯顿附近, 由两个独立的水电设施 (HEF) 组成, 总装机容量为 106.7 MW。这些 HEF 由利卢埃特河上游电力有限合伙公司和巨石溪电力有限合伙公司拥有, 土建和隧洞施工由 CRT-EBC 完成。利卢埃特河上游 HEF 包括沿利卢埃特河上游河谷开挖约 2500 m 长、6 m 宽、5.5 m 高的隧洞。项目位于山区, 由于受气候条件的严重限制, 且存在敏感的野生动物物种, 为了减小环境影响, 现场施工受到约束。现场位于米格峰火山杂岩体附近, 该火山是加拿大西部最近爆发的活火山。隧洞掘进条件非常具有挑战性, 其中一段穿过伴米格峰火山最近一次爆发 (距今 2360 年前) 形成的沉积层。该隧洞段包含熔结角砾岩和未固结沉积层, 由疏松浮石、有机物 (代表古老的森林地被物) 组成, 一直到进入下伏英云闪长岩基岩之前。本段隧洞的施工需要覆盖灌浆、管棚支护, 并在开挖时结合使用巷道掘进机、液压锤和钻爆法。本文对项目进行了概述, 总结了关键的设计和施工进度难题, 并说明了在隧洞通过伴随近代火山活动形成的沉积层时是如何顺利完成开挖的。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

利卢埃特河上游水电站项目 (ULHP) 是一个径流式发电项目, 位于加拿大不列颠哥伦比亚省彭伯顿附近 (图1) [1], 由两个独立的水电设施 (HEF) 组成, 总装机容量为 106.7 MW。这些 HEF 由利卢埃特河上游电力有限合伙公司和巨石溪电力有限合伙公司拥有, 土建和隧洞施工由 CRT-EBC 完成。作为一个典型的径流式发电项目, 该项目无需大量的筑坝结构, 便可通过压力钢管

(可能包括或不包括隧洞) 将河水引流至厂房, 随后在厂房处将河水排回河里。取水口与厂房之间的河道水流仅受引流的轻微干扰, 而工程界限之外的水流未变。对于利卢埃特河上游 (ULR) HEF, 取水构筑物将水流引入一条长 2500 m、宽 6 m、高 5.5 m 的发电隧洞, 发电隧洞与直径 3.6 m、长 1600 m 的压力钢管相连; 压力钢管依次与地面厂房相连, 地面厂房内安装 4 台辐向轴流式水轮机, 总发电容量为 81.4 MW。设计流量为  $53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 隧洞内最大内水头约为 24 m, 厂房总水头为 192 m。项

\* Corresponding author.

E-mail address: [nboulton@hotmail.com](mailto:nboulton@hotmail.com) (N. Boulton).

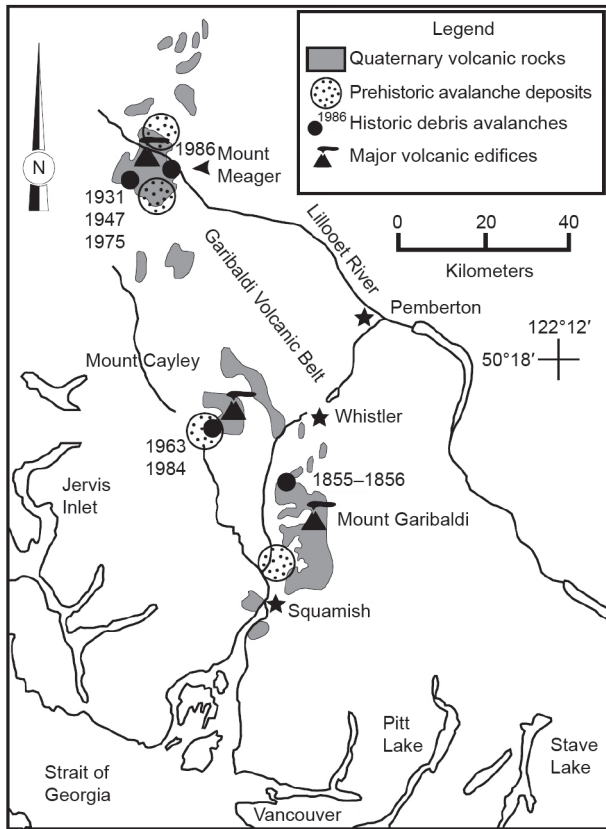


图1. 不列颠哥伦比亚省内加里波第火山带内上利卢埃特现场的位置[1]。

目与附近25.3 MW巨石溪HEF同时在2012—2016年期间建造，后者包括一条2900 m长的发电隧洞。

ULR隧洞和巨石溪隧洞开挖均采用钻爆法，使用由计算机操控的全断面凿岩台车和橡胶轮胎铲运机以及渣石运输车。除了在遇到断层、剪切带或可降解岩石的小

部分断面外，隧洞未设置衬砌。ULR隧洞的仰拱为混凝土仰拱板，而巨石溪隧洞的仰拱未设置衬砌。

本文描述了ULR发电设施隧洞及其施工，并详尽说明工程施工是如何克服各种重大困难（包括地质、气候和环境等难题）的。

## 2. 隧洞线路与现场布置

ULR隧洞大致与ULR的东北侧平行，整个现场的交通沿既有森林便道（FSR）实现。ULR隧洞从上游洞口（CH 0+065—CH 0+582.5）和下游洞口（CH 2+533—CH 0+582.5）分两个导坑进行开挖，开挖坡度为0.4%。取水口和上游洞口可沿FSR 49 km处进入，FSR从米格峰火山杂岩体横跨ULR（图2）[2]。下游隧洞口可沿FSR从44.7 km处进入，位于Truckwash溪（一条对生态重要的水道）附近。厂房可从41.2 km处进入，位于利卢埃特河北岸。这些单独的工区均面临着各自的挑战，见第4节所述。

## 3. 隧洞掘进穿过幼年期火山堆积物

自ULR隧洞上游洞口进行开挖时，穿过与米格峰火山杂岩体最近爆发相关的幼年期火山岩，进入浮石沉积层和埋藏土层，最终进入火成基底岩和变质基底岩。隧洞掘进穿过这些沉积层时也遇到了一些重大挑战，这将在本文后面部分说明。下游导坑仅遇到了基底岩石，这些基底岩石一般很坚固，所需岩石支护较少，但在

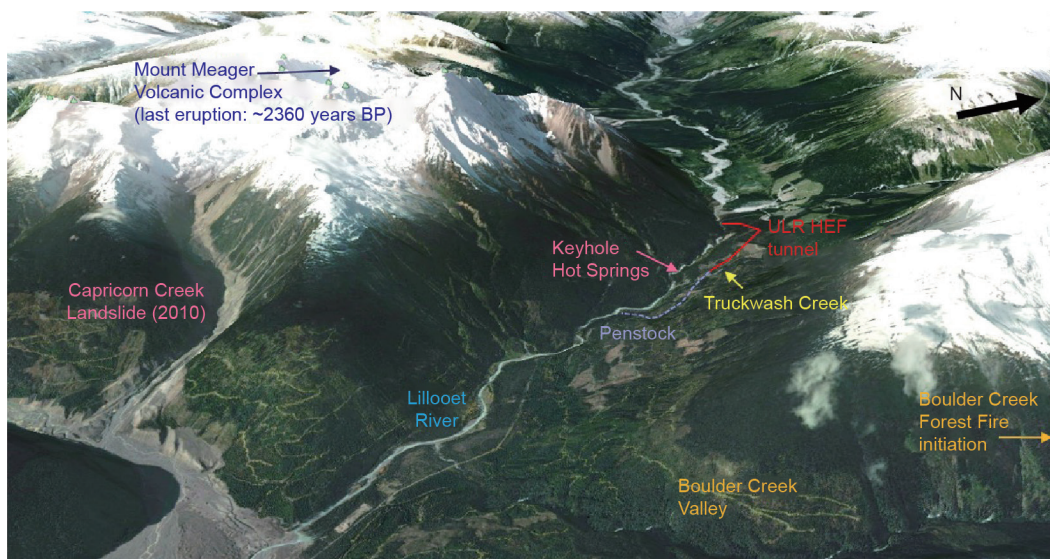


图2. ULR河谷内的现场布置[2]。

断层带和剪切带除外。本文未对隧洞基底岩石段作进一步说明。

### 3.1. 卵石溪地层

隧洞上游端的开挖通过卵石溪地层部分，该地层由近代火山岩和伴生沉积层构成，这些火山岩和沉积层因距今2360年前的米格峰火山爆发而形成，布满了ULR河谷并覆盖了第四系地表沉积物和基底岩石[3,4]。

在距今2360年前的火山爆发之前，发生了火山灰（浮石）喷射，在整个河谷留下厚厚的沉积物，火山灰沉积的范围远至1000 km以外。主要的喷出物由具有不同熔结程度的块灰热流组成。在隧洞上游部分（CH 0+065—CH 0+470）开挖的大多数岩石都是熔结的块灰流（被称为熔结角砾岩）。在这些新鲜火山岩和基底岩之间是一个不整合面，由第四系土壤和未固结的火山堆积物组成。在不整合面中开凿隧洞的位置在CH 0+466—CH 0+478。本文将此不整合面称为“过渡带”土壤，如图3所示。

下文以从最年轻到最古老的顺序对自上游洞口处挖坑道时遇到的沉积物加以描述[2]。

(1) 熔结角砾岩通常为具有砾石-卵石大小、呈近圆形-棱角状的斑状英安岩熔岩块体，位于有细密纹理的熔结火山灰基体内。沉积物呈现各种程度的熔结，通常为块状，带有小节理。在某些熔结更强烈的部分（通常在沉积物的中部至下部）观察到了柱状节理。在某些位置，能够识别熔岩流之间或熔岩流脉动之间的界限。在熔结角砾岩下面，观察到非熔结角砾岩薄层（厚度< 1 m）。在CH 0+065—CH 0+470，从上游洞口开始，绘制了隧洞内的熔结角砾岩地图。

(2) 在角砾岩下面发现一薄层（厚度< 0.5 m），经

解释，其具有河流成因。该薄层由砂、含些许粉砂的砾石和红棕色覆盖层及其下的粗砂层构成。

(3) 遇到的大部分未固结沉积层都由伴随距今2360年前的火山爆发形成的浮石组成。在整个河谷众多位置处地表上观察到的浮石均以松散砾石沉积物的形式出现，其储量较大，支持浮石开采。在隧洞内遇到的5 m厚浮石层主要为砾石大小，含火焦木（图4），且底层为红棕色、富含有机物。

(4) 在浮石下方观察到的一层，经解释为在距今2360年前的火山爆发之前河谷边的森林地被物。该层厚度变化大，从0.5 m到10 mm不等，由松针、枯枝、树根和倒下的树组成。采用碳定年法测定了从该层采取的木材标本，结果显示其年代为距今2445年（± 68年）前。

(5) 在不整合面遇到的最底层为冰碛物。沉积物厚约3 m，深棕色，密实至极密，由粉砂和一些卵石、巨石和黏土组成。卵石和巨石都呈近圆形，但岩性不同，分别为花岗岩类和变质火山岩类。

在冰碛物下面遇到的基底岩石为英云闪长岩，其占据下游隧洞开挖的大部分。图5所示为混合面和在开挖过渡带土壤期间观察到的大多数岩层。

### 3.2. 隧洞涌水

在项目初始设计期间，预期的隧洞涌水量非常小。然而，一旦在熔结角砾岩中开始开挖，可明显发现实际的涌水量远远超过预期的涌水量。观察到具有一定水压的水流过火山岩中的不连续面，似乎直接流入距离仅50 m左右的ULR。隧洞前400 m中的涌水流量范围为7000~8000 L·min<sup>-1</sup>。施工用水管理变得非常复杂且具有挑战性，在河流附近的作业受到明显的空间限制。于是修建了全面的水处理设施，包含5个沉淀池，在完成混

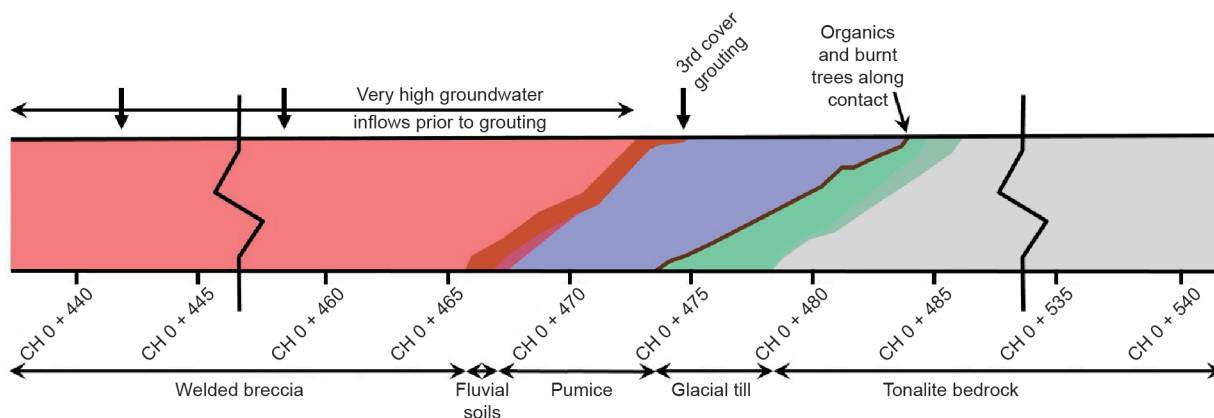


图3. 通过过渡带土壤的隧洞断面示意图，显示隧洞开挖沿线遇到的沉积物。



图4. 含火焦木的灌浆浮石沉积物。

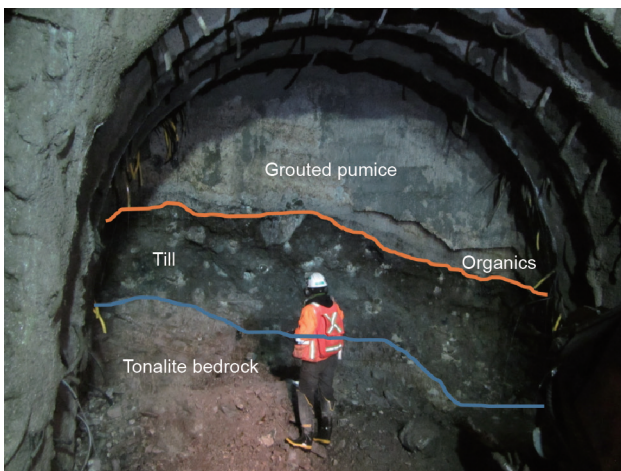


图5. 混合面开挖与浮石、有机物和冰碛物及下面的英云闪长岩基岩。

凝土浇筑工程时，使用絮凝剂和 $\text{CO}_2$ 管理pH值，以确保排水符合所有联邦和省级环境法规。图6所示为上游洞口处沉淀池和水处理的鸟瞰图。

虽然预期在过渡带沉积物范围内存在一些涌水，但是仅在熔结角砾岩内遇到的涌水流量就远超预期。据预计，如果在未固结沉积层内存在类似的涌水流量，那么安全地进行开挖和隧洞支护即使并非不可能完成，也是非常困难的。因此，在过渡带中进行开挖之前，启动了覆盖与固结灌浆方案。

### 3.3. 覆盖与固结灌浆

在遇到未固结沉积层之前大约25 m处自熔结角砾岩开始进行覆盖灌浆，力求减少进入隧洞导坑内的涌水量。覆盖灌浆的设计是为了“覆盖”隧洞边界，达到设计的支护（2.4 m长锚杆）不会贯穿的深度。由于在最初遇到超出预期的涌水时尚未开始灌浆，大家知道涌入

隧洞的总水量很可能不会降低，因为在工作面之前改道远离开挖面的水可能仅仅流向周边，并且可能从之前开挖但未灌浆的区域再次涌入隧洞。

随后，为了增强松散、未固结的沉积层，尤其是砾质浮石沉积层，进行了固结灌浆。方案是这样安排的：灌浆孔长达45 m，在向外辐射、等距设置的灌浆孔的嵌套环之间有20 m以上的重叠（图7）。根据在注浆之前测量的涌水量以及进行的取水试验（即吕荣试验）结果，增加注射的灌浆混合料的表观黏度（即让其变稠），每个阶段都以指定的注浆压力和低-极低的注浆速度灌浆至抗贯入点。通过这种方式，对地面进行了适当的改进，使开挖条件得以稳定。灌浆方案的论述详见参考文献[5]。

### 3.4. 隧洞掘进与围岩支护

在ULR隧洞的熔结角砾岩和基底岩石中开挖时，通常采用钻爆法。开挖进尺达到6 m；熔结角砾岩中的岩石支护通常采用2.4 m长、间隔2 m的锚杆与焊接钢丝网或铁丝网。必要时还设置定位锚杆和（或）喷射混凝土



图6. ULR与上游洞口/取水口处的施工用水管理设施。

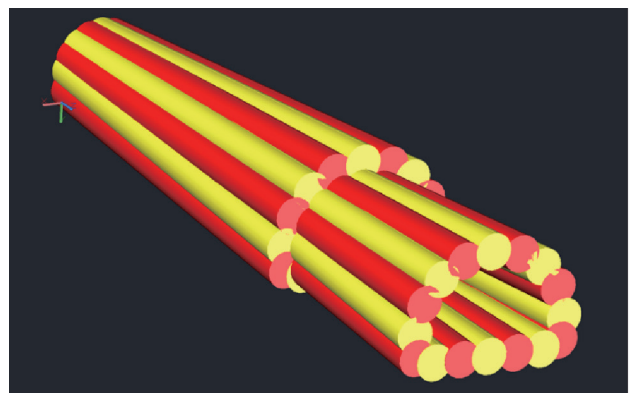


图7. 说明重叠灌浆覆盖的灌浆方案灌浆孔布置示意图[5]。

形式的额外支护。

开挖到达过渡带时，重新设计了爆破模式。由于工作面的上部仍然由高强度熔结角砾岩构成，所以采用短爆破进尺。而在工作面的下部为外露的灌浆过渡带沉积物，故采用巷道掘进机和液压锤进行掘进。

在最初遇到过渡带沉积物的7 m范围内，熔结角砾岩已超出隧洞拱顶之上，掌子面完全由灌浆浮石组成。采用巷道掘进机在灌浆浮石和下伏有机物和砾物地层顺利完成开挖。在过渡带沉积物的全断面范围内继续开挖5 m之后，发现英云闪长岩基岩冒出仰拱。在岩土混合条件的11 m范围内，隧洞中又遇到全断面固体基岩，开挖时采用了短爆破进尺（图3）。

通过过渡带时，安装了管棚支护。管棚支护由间隔为0.3~0.5 m、长12 m的拱棚管组成，安装角度通常为8°，各管组之间有4 m的重叠。拱棚管安装自沉积物开始，从仰拱安装到仰拱，随着英云闪长岩基岩逐渐冒出仰拱，便减少拱棚管的安装数量。采用管棚支护结合格栅拱架和喷射混凝土的方式对开挖部分进行支撑。开挖期间无需进行掌子面支护，因为早期完成的固结灌浆能维持掌子面的稳定性。

由于隧洞上方的岩石覆盖厚度非常小，所以在通过隧道拱顶时安装管棚支护（10点钟到2点钟的角度），在英云闪长岩内的全断面岩石开挖开始之后，持续40 m设置格栅拱架和喷射混凝土。尽管地面覆盖厚度超过200 m，但钻探结果显示岩石覆盖厚度小于6 m。在岩石覆盖层的厚度达到全隧洞直径（6 m）后，继续采用锚杆和喷射混凝土进行正常的地面支护。

为保护仰拱免受侵蚀并防止格栅拱架基础受到侵蚀，在通过过渡带沉积物时需设置混凝土仰拱板。在全长2500 m的隧洞中连续设置混凝土仰拱板，以防止之前遇到的其他软弱带受到侵蚀，同时方便未来的隧洞检验。

施工期间，观察到熔结角砾岩某些区域的熔结程度相较其他区域的要差，这些熔结程度较差的区域随着时间的推移在逐渐退化。更确切地说，隧洞壁和拱顶的表面在开挖之后立即露出坚硬岩石，这些岩石表面已经分解到能将其上的疏松砂岩刮掉的程度。实验室测试，包括耐崩解试验、改进的耐崩解试验、乙二醇测试和X射线衍射（XRD）矿物鉴定试验，均未表明岩石可能出现劣化问题。然而，在薄断面中，从采取的显示劣化的样本和未显示劣化的样本之间确实能鉴定出不同的熔结程度。为防止在隧洞作业期间隧洞壁出现进一步劣化并防止可能的侵蚀，沿隧洞拱顶和隧洞壁确认了熔结程度更

差的角砾岩，绘制了其地图，做了标记，并在这些区域采用最终衬砌进行覆盖。最终衬砌由100 mm的喷射混凝土组成，并采用焊接钢丝网提高喷射混凝土在岩石上的黏附力。

## 4. 一般项目挑战

由于是在偏远的北不列颠哥伦比亚省进行作业，所以除了在隧洞掘进期间面临的地质挑战外，ULHP还面临许多其他挑战。

### 4.1. 滑坡风险

米格峰杂岩体恰好在上游洞口和隧洞取水构筑物处横跨河谷，其被称为加拿大最易发生滑坡的山体[6]。ULHP之前的研究表明，此山体有发生火山[7]滑坡和非火山[6]滑坡的风险，可能直接影响ULR，影响范围远至下游。

北不列颠哥伦比亚省曾于1999年委托制定一项滑坡管理计划，以减少由米格峰杂岩体引发的山体滑坡对公众造成的危险。该计划包括米格山谷的停业规程，防止人们在发生可能增加滑坡可能性的特定气候因素时进入该区域，这些因素包括可能导致过度融雪，从而在山上形成径流的降水和温度阈值。

在2010年8月，当连续6天的温度阈值达到25℃以上时，便实行了停业，并封闭米格山谷，禁止公众进入。2010年8月6日，摩羯溪（Capricorn Creek）流域（米格峰杂岩体南面附近的主河谷）发生了一次山体滑坡，先进入米格溪，再进入ULR。滑坡差一点就掩埋了在ULR河谷省级露营地露营的野营者，该露营地恰好在利卢埃特河与米格溪交汇处以北。在2010年的滑坡之后，该露营地就被永久封闭了。随后此次滑坡事件被命名为摩羯溪滑坡，它被确定为加拿大历史上记录的第二大滑坡[8]。

众多研究记录都表明，米格峰杂岩体存在其他潜在的不稳定性。摩羯溪滑坡体先进入米格溪，再进入ULR，在项目南部大约3 km处；因此其不会直接影响到项目或项目的基础设施（图2）。与ULHP有特殊关系的是山体的东侧以及来自乔布溪流域的危险，乔布溪正好位于ULR项目取水口的上游。

为规避施工期间的风险，制定了类似的滑坡管理计划，其中概述了“低风险”“高风险”和“极端风险”的管理。该管理计划包括限制进入受降水或温度阈值

影响的项目区域。若超过4 d的温度均高于平均值25℃，或者若降水量达到50 mm以上，则实行“高风险”类别的管理。这涉及在场地大部分区域实施进入/离开规程且仅允许白天出行，以及完全封闭上游洞口和取水口水口工作区。一旦24 h内的温度达到35℃或者降水量达到70 mm以上，就超过了“极端”阈值。在“极端”阈值情况下，整个利卢埃特河上游水电站项目现场会有效关闭，同时锁上FSR大门，以防任何人进入。

在整个项目期间，温度阈值导致2015年有20 d无法进行生产，导致2016年有31 d无法进行生产；有3次的降水量达到了阈值，一次发生在2015年，导致有6 d无法进行生产，两次发生在2016年，导致4 d无法进行生产。

## 4.2. 气候挑战

### 4.2.1. 夏季施工

在偏远森林位置作业的风险之一是森林火灾。不列颠哥伦比亚省的森林在夏季的几个月里容易遭受自然火灾和人为引起的火灾。为了能在火灾危险性高的时候在森林地区作业，承包商须采取预防措施，包括在整个现场准备好消防设备。但是，即使预防措施到位了，风险仍然存在。在2014年夏季，不列颠哥伦比亚省有将近 $3.6 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的土地被烧毁，这是该省历史上第三大火灾损失。2015年火险季节的火险概率也高于平均水平，导致从世界各地增派人手进入当地救火。2015年该省最大的火灾之一是巨石溪火灾；这场大火始于巨石溪流域上游附近的雷击（图2），烧毁了 $6700 \text{ hm}^2$ 以上的土地[9]。

巨石溪火灾始于2015年6月30日，在巨石溪谷上游，离项目现场大约5 km（图2）。火势相对较小，持续将近一周，然后顺着山谷向下朝项目移动。2015年7月4日，大火蔓延到山顶后进入ULR河谷，人员撤离项目现场（图8）。项目现场在近两个月内都处于强制疏散状态。然而，即使在整个项目区内有大量的森林被烧毁，项目也只遭受相对较小的有形损失。主要损坏的是在最近完工的输电线路，对整个项目进度有重大影响。在解除森林火灾疏散之后不久，发生大量降水，导致ULR发生重大洪水灾害，同时各支流发生泥石流。FSR多处受损，通向现场的道路切断两天，由于没有紧急通道，所以要求停止现场作业。

### 4.2.2. 冬季施工

最初没有计划冬季作业，然而，滑坡风险停业、巨石溪森林火灾、洪水和泥石流导致夏季施工期间工作天

数减少，且岩石质量比最初预期的更差，所以在2015—2016年以及2016—2017年的冬季进行施工，以便减小对整个项目进度的影响。2015—2016年的冬季相对暖和，降水量要高于平均水平；项目现场各区域都有不同程度的积雪，且经历高雪崩风险。林道需要不断铲雪和维护，以保持对外交通安全（图9）。许多值得注意的雪崩槽沟都与整个现场的FSR相交，这就要求派训练有素的雪崩专业人士在整个冬季持续进行雪崩监测和控制。由于雪崩控制和清理，许多工作时间都受到影响。

## 4.3. 环境挑战 —— 野生动物

ULHP毗邻利卢埃特省级公园，拥有“公园般”的环境和公园的许多自然特征。在该区域生活有大量物种，其中一些是受保护的物种。这就要求采取缓解措施减少项目对受保护物种的影响。为确定在施工期间



图8. 巨石溪火灾，大火于2015年7月4日蔓延至项目现场上面的ULR河谷，也正是在这天进行现场撤离。



图9. 清理FSR上厚厚的积雪。

该区域存在的物种、整体影响以及对哪些物种需要采取管理和缓解措施，在施工之前进行环境影响评价的过程中做了大量的环境研究。要求注意的著名物种有大灰熊、狼獾、沿海尾蟾，尤其是山羊。缓解措施包括：在动物迁徙期间限制现场人员的出行时间，在动物迁徙和入穴冬眠期间不开展施工活动，监测噪声水平，以及视觉监控。在野火发生之后，对上述某些限制措施进行了修改，同时新增了一些缓解措施，以便能够在冬季继续进入现场，而原先未预料到在冬季会有这些限制因素。

针对山羊采取缓解措施是项目面临的众多更具挑战性的条件之一。山羊在整个冬季居住在山谷下陡峭的悬崖上，在夏季迁徙到山坡上，而它们的一条主要迁徙走廊正好位于Truckwash溪隧洞的下游洞口，在FSR 44.7 km处。迁徙走廊的位置毗邻下游隧洞和通往取水口的施工便道，造成了严格的作业限制。在下游隧洞周围修建了视觉上美观的隔声护道，同时所有施工作业须在春季和秋季动物迁徙期间（以设定的雪阈值为依据）完全停工两周。此外，在11月和5月实行每日停工，停工时间为日出前2 h和日出后1 h，以及日落前1 h和日落后2 h。在这些限制时间内，禁止在FSR上行走，且不允许在下游洞口作业，以便不打扰山羊通过走廊。若看到山羊在走廊内，那么也须停止施工。在迁徙月份，减少下游洞口的工日，每班工作的时间从正常的10 h减少到5 h。在整个冬季，每天派人观察山羊的动态，确保山羊的正常活动不受任何施工活动干扰（图10）。在山

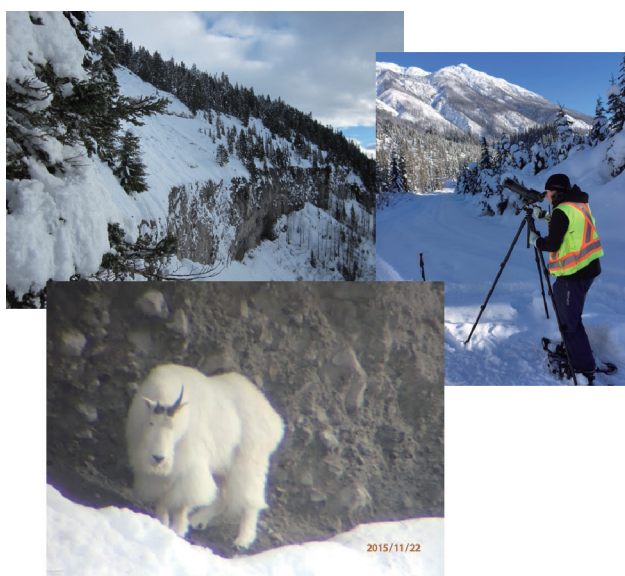


图10. 山羊监测。左上图：钥匙孔瀑布上面的峡谷边——山羊冬季牧地；右图：山羊监控人员正在观察山羊；左下图：钥匙孔瀑布上面的山羊。

羊监测期间，观察到项目对山羊的影响极小，且山羊一般不会受施工噪声或施工活动干扰。

## 5. 结论

ULHP的施工面临许多独特挑战，为完成106.7 MW清洁能源项目，需要克服这些挑战。在施工2500 m长的隧道时，一部分穿过了最近形成的火山堆积物，包括未固结土壤区。为管理意料之外的涌水和加固与在各种项目调查期间发现的沉积物大不相同的、很大程度上未知的材料，设计并实施了最初未计划的灌浆方案。不列颠哥伦比亚省径流式项目遇到了具有挑战性的地质情况以及一些最严格的环境要求，面对这些情况，业主、工程师和承包商团结合作提出解决方案和应对挑战。即使在由于不可预见的不可抗力 and 具有挑战性的隧洞施工条件而导致大量的停工之后，项目交付时间也与最初的时间表相当接近。

## Acknowledgements

The authors would like to thank Renaud de Batz and Oliver Robson of Innergex Renewable Energy for their permission to publish this paper, and acknowledge the hard work and efforts of the full time on-site team—Brittany Linnett, Chase Reid, and Ryan Preston of Golder Associates; the grouting team—Grant Bonin, Bill Lillico, Rob Chu, Jeremy Hoy, and James Smith; and Danny Dugas, David Gagnon, and Joé Duval Bourgault of EBC Inc. Their dedication and professionalism for the duration of the project contributed to a safe and successful excavation through very challenging conditions.

## Compliance with ethics guidelines

Nichole Boulton, Oliver Robson, Serge Moalli, and Rich Humphries declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Stewart ML, Russell JK, Hickson CJ. Discrimination of hot versus cold avalanche deposits: implications for hazards assessment at Mount Meager, British Columbia. *Curr Res—Geol Surv Can* 2001: 2001–A10.
- [2] Boulton N, Robson O, de Batz R, Moalli S, Humphries R. Tunnelling through recent unconsolidated volcanic deposits at the Upper Lillooet Hydro Project,

- Pemberton, BC, Canada. In: Proceedings of the Word Tunnel Congress 2017—Surface Challenges—Underground Solutions; 2017 Jun 9–15; Bergen, Norway; 2017.
- [3] Hickson CJ, Russell JK, Stasiuk MV. Volcanology of the 2350 BP eruption of Mount Meager Volcanic Complex, British Columbia, Canada: implications for hazards from eruptions in topographically complex terrain. *Bull Volcanol* 1999;60:489–507.
- [4] Stewart ML, Russell JK, Hickson CJ. Revised stratigraphy of the Pebble Creek Formation, British Columbia: evidence for interplay between volcanism and mountainous terrain. *Curr Res—Geol Surv Can* 2002: 2002–E3.
- [5] Bonin G, Lillico B, Robson O, de Batz R, Moalli S. Cover grouting through unconsolidated deposits at the Upper Lillooet Hydro Electric Project, Pemberton, BC, Canada. In: Proceedings of the Word Tunnel Congress 2017—Surface Challenges—Underground Solutions; 2017 Jun 9–15; Bergen, Norway; 2017.
- [6] Friele P, Jakob M, Clague J. Hazard and risk from large landslides from Mount Meager Volcano, British Columbia, Canada. *Georisk: Assess Manage Risk Eng Syst Geohazards* 2008;2(1):48–64.
- [7] Simpson KA, Stasiuk M, Shimamura K, Clague JJ, Friele P. Evidence for catastrophic volcanic debris flows in Pemberton Valley, British Columbia. *Can J Earth Sci* 2006;43(6):679–89.
- [8] Friele PA. The August 6, 2010 Capricorn Creek Landslide, Meager Creek Valley, southwestern British Columbia: description, emergency response, infrastructure damage and future hazards. Victoria: BC Ministry of Environment; 2010.
- [9] Wildfire season summary [Internet]. Victoria: Government of British Columbia; c2017 [cited 30 Mar 2017]. Available from: <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/safety/wildfire-status/about-bcws/wildfire-history/wildfireseason-summary>.