

南水北调西线工程地质灾害初步研究

王学潮, 张 辉, 刘振红, 赵自强, 牛书安

(黄河水利委员会勘测规划设计研究院, 河南郑州 450003)

摘要: 南水北调西线工程位于新构造活动强烈的青藏高原东北部, 采用深埋长隧洞方案经巴颜喀拉山输水入黄河, 工程区的主要地质灾害包括活动断层和地震、冻土冻害、高地应力及岩爆、地温异常、库区岸坡变形等。其中, 活动断层及地震是调水工程区的主要地质灾害。对主要地质灾害的特征和破坏形式进行了探讨, 并提出了有关治理措施。

关键词: 南水北调; 地质灾害; 地震; 活动断层。

中图分类号: P642; P694

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)03-0297-07

作者简介: 王学潮(1964), 男, 高级工程师, 1997年毕业于北京大学, 获理学博士学位, 主要从事工程地质专业研究。

1 概述

从长江上游通过巴颜喀拉山引水到黄河上游是中国南水北调工程的西线方案(简称南水北调西线工程), 是补充黄河水资源不足、繁荣发展西部经济和改善生态环境的一项跨流域调水工程^[1]。目前, 正在进行规划的南水北调西线工程是从长江干流通天河、雅砻江及大渡河调水入黄河; 后续调水工程是从长江干支流调水的延伸, 可以扩展到与黄河相距较远的澜沧江、怒江调水; 远期工程是从雅鲁藏布江调水, 从而形成从通天河、雅砻江、大渡河、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江6条江河调水的西线南水北调方案^[2]。

西线调水工程区位于青藏高原的东北部, 海拔3 000~4 500 m, (图1)。根据规划方案, 在长江上游的通天河、雅砻江和大渡河上游筑坝建库, 总库容最大为 $318.2 \times 10^8 \text{ m}^3$; 采用深埋长隧洞穿过长江—黄河分水岭巴颜喀拉山引水至黄河上游^[3]。考虑可调水量及工程规模, 目前选取通天河的歇马—直门达、雅砻江的宜牛—仁青里和大渡河的灯塔—斜尔尕为规划研究的重点引水河段, 黄河贾曲口以上为受水河段^[4]。

地质灾害的评估目前处于半定量—定量状态, 不同的地质灾害有不同的发育规律; 地质灾害风险

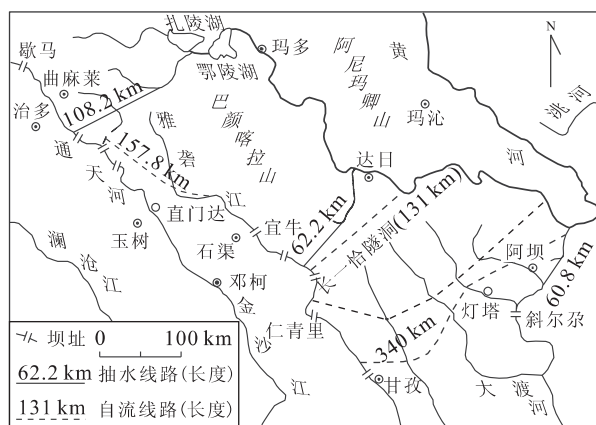


图1 南水北调西线工程方案示意

Fig. 1 Sketch of west line project of water diversion from the upper Yangtze River into the upper Yellow River

是制定减灾对策、土地利用规划、社会发展与经济建设规划及保险产业的基础^[5]; 同样, 调水区的工程地质条件是制约国家投资、引水方案选择、水利枢纽布设、工程后期安全运行及维护的重要前提, 由地质灾害导致水利枢纽和重要场址的变更及投资扩大的例子常有发生。南水北调西线工程的实施对我国西部大开发有着不可替代的作用; 但工程区位于青藏高原东北部, 自然条件恶劣, 是中国地震多发区之一, 也是新构造活动发育相对强烈的地区, 在地理上又属于高寒区, 地质灾害严重, 对南水北调西线工程构成不同程度的威胁。南水北调西线工程采用自流和

抽水方案,需要在取水河段修建水利枢纽、开凿深埋长隧洞,这些调水方案多采取高坝蓄水、长隧洞输水;任何引水线路及输水隧洞都不能避开活动断层的影响,输水线路一般要穿越地震烈度Ⅶ~Ⅷ度区,部分洞段穿越Ⅸ度区.因此,南水北调西线工程的地质灾害问题不容忽视,在某种程度上,地质灾害制约着西线工程的实施,轻则使得工程延期或投资规模膨胀,重则危及工程的安全.

对西线调水区而言,地震、活动断层、泥石流、冻土和高地应力是主要的地质灾害^[6~8].地质灾害防治的基本思路是地质理论分析和工程技术相结合^[9];在综合分析区域地质资料的基础上,运用遥感手段,结合地面调查和物探成果,查清西线工程区地质灾害分布状况,探讨地质灾害的发育规律;对地质灾害多发区域,进行工程地质评价;全面研究活动断层、地震、冻土等地质灾害对水利工程的潜在不良影响,对影响深埋隧洞安全的岩爆、断层位错、高压涌水等灾害进行评估,优选出稳定条件良好或较好的工程建设区域和地段,是西线调水工程地质灾害防治的基础地质工作.

2 活动断层对调水工程的危害

活动断层对工程的破坏始终是工程地质学界关心的问题^[10~13],活动断层作用能引起多种地质灾害,比较突出的有地震、断错、地裂缝、滑坡岩崩等.对重大的水利工程而言,最重要的是研究清楚工程区活动断层在全新世的活动状态^[14],而研究活动断层的变形型式和变形速率是评价活动断层对工程影响的先决条件.断裂长期缓慢的位错积累量(蠕滑量)与断裂突发性位错量(粘滑量)两者泾渭分明,从理论上很好分辨;但由于断裂在一个长时间段和大空间域内的位错运动往往十分复杂,加上实测和辨别上述两种位错的方法和手段的不确定性,在野外实践中人们是无法区分蠕滑和粘滑的.概括起来,断错地质体的变形方式、断层物质特征及断裂带整体的结构、活动状态的识别是研究断裂滑移方式的 3 个主要方面.研究西线调水区活动断层的变形方式(蠕滑、粘滑机制)、变形期次及最大位错量,对于深埋长隧洞的设计、施工及稳定性分区具有十分重要的意义.

西线工程区的新构造相当发育(图 2),大型的走滑断层基本上都是继承性的.晚更新世以来,北西

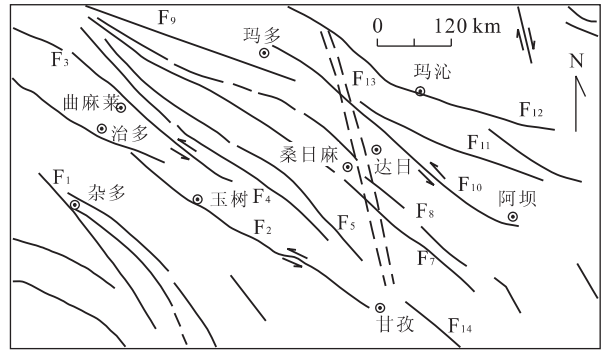


图 2 调水区活动断层分布示意

Fig. 2 Schematic diagram of active faults distributed in diversion water area

F₁. 澜沧江构造带;F₂. 甘孜—玉树断裂;F₃. 曲麻莱断裂;F₄. 宣牛断裂;F₅. 长须贡玛—大塘坝断裂;F₇. 主峰断裂;F₈. 桑日麻断裂;F₉. 鄂陵湖南断裂;F₁₀. 甘德南断裂;F₁₁. 久治断裂;F₁₂. 东昆仑断裂;F₁₃. 甘孜—达日横向构造;F₁₄. 鲜水河断裂

向断裂的活动方式以水平左旋走滑为主,水平滑动速率最大可达 16 mm/a^[15].进入全新世,调水区的大部分断裂停止活动,活动的断裂主要分布在巴颜喀拉山北缘与阿尼玛卿山的交界地带及玉树—甘孜一带,这种断裂的全新世分区活动特征与区内现代地震活动的情况相吻合^[16].在调水区的活动断层中,以甘孜—玉树断层、桑日麻断裂和甘德南断裂对工程的影响最大.南水北调西线工程各个引水方案都不同程度地邻近或穿越一条甚至多条活动性断裂.但目前不清楚主要活断层的蠕滑和粘滑方式及将来的最大位错量.蠕滑对其接触的工程产生缓慢的破坏,可采用柔性结构措施来预防和补救;粘滑为断层两盘的突然相对滑动,工程措施对减少它的危害很难奏效.调水区断层围岩类别高,地质条件差,相对有利于发生粘滑.在强震地区由地震形成的错动量的估计与预测是个很复杂的问题,对工程来说又至关重要.现代地震工程学科的发展尚无解决这一问题的有效途径.这些参数对于深埋长隧洞的支护及抗断设计、水利枢纽场址安全评价极其重要.

值得重视的是,在雅砻江调水区还发育近南北向的甘孜—达日横向构造,它是一种典型的叠加性构造,具有明显的弥散性,可能是青藏高原北部 NNW 向活动构造的一部分^[17].与北西向构造的交汇部位往往成为诱发地震活动的重要地段,1947 年 3 月 17 日达日 7.75 级地震就发生在横向构造与北西向构造的交汇部位^[18].这种弥散性的构造使得山体破碎,降低了硐室围岩的稳定性,给隧洞的防渗处

理带来困难,增加了施工的难度和工程成本。弥散性构造带的发育在一定程度上改变了工程区地下水的循环动力条件,可以降低高地温^[19]。

3 地震对西线工程的影响

西线调水区及邻区是地震最为强烈的地区之一,位于可可西里—金沙江地震带内。区内中震及强震与断裂构造关系密切,震中常沿活动断裂分布。地震烈度等烈度线分布的总体方向为北西向,工程区南北两侧为Ⅷ和Ⅸ度区,中部和东部为Ⅷ度及其以下的低烈度分布区。地震重演的规律为:(1)强震发生的数十年至 100 年前后,有多次地震发生,且在 $M \geq 7.5$ 级地震发生的前后,多有中强地震和 6~7 级地震的重复(极震区重复)活动。(2)5~6.5 级地震发生区,会在数十年期间重复同样级别的地震。(3) $M \geq 7.5$ 级地震的重复时间较长,一般多在 1000 年~数千年左右,但在断裂活动的活跃期内,其重演时间也仅在数十年至 100 年左右。

从西线工程区及巴颜喀拉周边断裂带 $M-T$ 图(图 3)可以看出,从公元 1880 年至今的 100 年间,巴颜喀拉山及周边活动断裂带上共发生 12 次 $M \geq 7.0$ 级以上地震,大致分为 3 个时间段。调水区北部东昆仑构造带(F_{12})的花石峡—玛沁段是区内断裂活动、地震活动较强的地区,沿断裂带有 7~8 级地震发生。调水区南部的甘孜—玉树断裂(F_2)和鲜水河断裂(F_{14})也是地震活动较强烈的地区。据研

究,甘孜—玉树断裂带在未来 50 年内具有强震复发的高危险性^[20],而且,调水区发生里氏 7 级地震的危险性在增大^[21]。

活动断层与破坏性地震的发生有直接的成因联系,而且活动断层的非地震滑动也会影响工程的安全^[22]。活动断裂对工程的影响主要表现在由震动引起的破坏(抗震问题)和由错动造成的破坏(抗断问题)。震动破坏往往随工程埋深的增加而衰减,其原因在于深埋洞室在地下不具备大尺度的自由面,周围又有岩体互相约束和支撑。所以,对于西线工程来说,大坝、地面厂房、明渠等地面建筑物易受到震动破坏,需要进行高烈度设防,而引水隧洞和地下厂房埋深较大,其抗震性能较好。活断层的错动破坏对工程的影响往往是比较严重的,这种破坏不仅使工程难以修复,甚至可能造成工程的彻底毁坏。蠕滑断裂产生的错动破坏是缓慢的,对此可采取柔性结构等结构措施来预防和补救,而粘滑断裂由于活动突然,一般的工程措施则很难奏效。西线引水隧洞在抗震方面,即使在Ⅸ度区,深埋隧洞仍是较稳定,在规划时,应力求避免浅埋洞段和旁山洞段,洞口则应避开活动断裂。但在抗断方面则存在不利因素,强震可能给隧洞安全带来严重影响。

深埋隧洞的围岩为坚硬或中硬岩类,断裂活动发生错动的可能性较大,然而断裂活动的时间、错动量及其对工程的破坏程度难以预测,现只能根据工程区及外围有限的几个研究程度较高的历史地震形变资料进行分析类比。1947 年青海达日 7.75 级地震,水平和垂直位错量分别为 1.77 m,0.75~2.00 m;1896 年四川邓柯 7.0 级地震,位错量分别为 5.0 m,0.3~0.5 m;1973 年四川炉霍 7.6 级地震,位错量分别为 3.6 m,2.0 m;1954 年甘肃山丹 7.5 级地震,位错量分别为 2.8 m,1.2 m。这些主要是根据地表形变调查得出的数据,对于深埋隧洞来说,断裂活动在地下深部的错动位移预计比上述数值小,可在隧洞抗震设计中参考。

4 冻土地质灾害

西线调水区多年冻土广布,季节冻土仅分布于海拔 4 200 m 以下的沟谷内。引水工程建筑物多布置在多年冻土区和多年冻土与季节冻土的混交地带内,所以区内冻土工程地质问题复杂。冻土在冻结时有较大的冻胀力,表现为冻胀性;溶化时表现为融陷

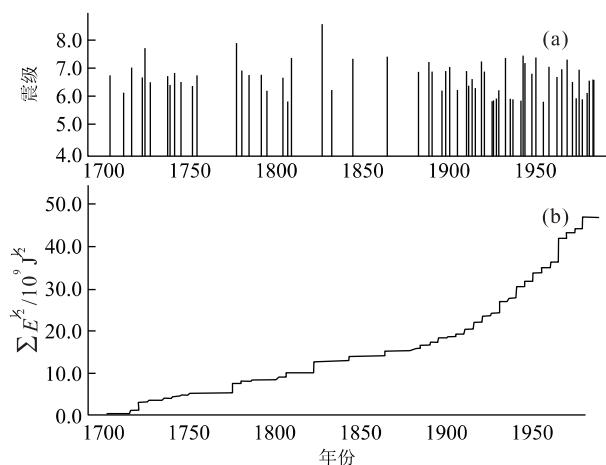


图 3 可可西里—金沙江地震带时序

Fig. 3 Time-series correlogram of Kekexili-Jinshajiang earthquake zone

a. $M-T$ 图; b. 蠕变曲线图

性. 由冻到融, 冻土的密度、可压缩性、强度指标均有成倍的变化, 冻土的物理特性变化对有关水工建筑物的稳定有较大的影响. 多年冻土主要表现为融沉危害, 季节冻土主要表现为冻胀危害. 冻土及冻害对调水线路, 尤其是对通天河、雅砻江调水线路的影响较为严重.

4.1 季节冻土的冻胀危害

根据调水区建筑物布置状况, 位于季节冻土区的引水建筑物有引水枢纽、引水隧洞进出口及抽水线路上的明渠、抽水站、输水管道及配套工程等. 冻胀引起的法向冻胀力和切向冻胀力常造成建筑物基础的上拔和上抬, 同时因水平冻胀推力的存在能引起挡土建筑物的水平位移, 使建筑物产生裂缝、斜歪以致倒塌.

在季节冻土区修建引水渠道, 当渠床的土质、水分和温度条件不同时, 各部位的冻胀也会出现差异. 如渠床为粗粒土时, 冻胀量很小, 为细粒土(尤其是粉质土)时, 则冻胀量明显增大; 渠顶的含水量比渠底的含水量要小, 所以其冻胀量要小; 阴坡温度比阳坡低, 所以其冻胀量要大. 所有这些就决定了渠道各部位的衬砌将受到不均匀冻胀力的作用, 引起衬砌的破坏, 降低了衬砌的防冲、防渗能力, 进而使渠道报废. 防治方法是在衬砌下换填为不冻胀物质.

位于季节冻土区的隧洞进出口翼墙, 往往受其背后土体冻结时所产生水平推力的影响而前移, 其间隙随后被横向扩张的土所填塞. 融化时, 翼墙在复位过程中必然受到墙后填土的阻抗不能恢复原位, 这样年复一年的冻融, 墙体变位残余逐年积累, 从而引起翼墙的前倾变位.

在季节冻土区铺设输水管道时, 因规模大, 管线长, 沿线土质、地温和冻结条件不可能一致. 年复一年的冻融作用就会产生管节脱位, 或全管线的扭曲, 轻者影响水流的畅通, 重者造成管线的毁坏.

4.2 多年冻土的融沉危害

位于多年冻土区的引水工程主要有引水隧洞和抽水线路的抽水站、输水管道、渡槽和壅水坝等. 与季节冻土的冻胀性相反, 多年冻土在融化后, 由冰融化为水时体积缩小, 使土体产生不均匀热融沉陷, 造成建筑物的开裂和破坏.

对于引水隧洞, 因其埋深大, 最浅的也在几十 m 以下, 而区内多年冻土下限最大深度花石峡地区为 55 m^[23], 平均为 40 多 m, 隧洞埋深远远大于多年冻土的下限, 所以多年冻土对引水隧洞洞身不会产生

任何危害. 但在隧洞口附近, 由于工程建筑的营造, 导致洞口部分地段的融化深度加大^[24], 可造成大面积的向源滑塌和溯源侵蚀, 引起斜坡失稳, 因此在施工中必须加强护坡和排水设施.

由于多年冻土的厚度较大, 其对建筑物基础产生的冻胀力也大, 因此对于基础不可能置于冻层之下的渡槽、抽水站和输水管道等工程来说, 因法向冻胀力的作用使基础上拔和上抬; 当地基融化时, 由于土质和含水量的不同, 将出现不均匀沉降, 在这种升降的往复过程中, 渡槽便出现弯曲和舞龙等现象; 位于斜坡上的桩墩常因水平冻胀力和切向冻胀力的联合作用, 使其断裂、倒塌; 抽水站则因土层的不均匀冻融作用使基础发生沉陷, 导致抽水机械发生倾斜, 影响正常运转; 多年冻土对输水管道的危害机制与季节冻土的危害接近. 对上述冻害可以采用保护多年冻土的原则进行处理. 在寒区修建壅水坝, 为保证大坝安全, 必须将永冻层彻底清除, 不留后患.

在寒区修建水库, 除了存在非寒区影响库岸稳定的因素外, 还发育一些特殊的地质灾害. 水库蓄水必然会因为热容量的增大而改变当地的小气候环境, 两岸原来冻结的残坡积层将融化, 形成热融滑塌和冻融泥石流而壅入库内, 增加了库内淤积. 特别是当地下冰被库水冲掏暴露于地表后, 其溯源滑塌的危害性更大, 是一个不可忽视的地质灾害.

5 深埋长隧洞的工程地质灾害

西线调水工程的引水隧洞长度范围在 47.5~288 km 之间, 均属于特长隧洞; 在一般浅埋隧洞中存在的工程地质问题在深埋长隧洞中都可能存在, 但高地温、高地应力、高压涌水和岩爆是深埋长隧洞典型的工程地质灾害^[25]. 深埋长隧洞多发地质灾害的评估目前只能在计算模拟的基础上进行, 可以借鉴其他工程的实例进行类比和预测, 关键是要选取正确的计算模型和合理的计算边界条件. 建立西线地区的地温演变曲线、地应力的垂向变化曲线是正确解决高地温、高地应力与岩爆问题的关键. 此外, 长隧洞中因活断层发育而诱发的氡异常^[26]也是影响西线工程隧洞施工的次生灾害.

5.1 高地温问题

影响地温场的主要参数是岩石的传热系数和地下水的流向及流速, 隧洞施工中出现高地温现象不但恶化作业环境、影响施工材料的运用并危及隧洞

的稳定^[27],而且还可能影响到调水方案的可行性;因此,西线工程深埋长隧洞的高地温灾害引起了广泛的重视。经计算,西线调水区平均地温梯度介于 $18\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 之间,平均值多在 $22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右。地温梯度的高值区主要分布于清水河、达日—久治、玉树以及甘孜附近的马尼干戈—温拖四地区,其平均地温梯度达到 $24\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,是调水区中内中高温地下热水的主要排泄区。据有关资料推算,深埋隧洞高程处的地温可达 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,局部地温异常区的硐室围岩温度可达 $53\sim 68\text{ }^{\circ}\text{C}$,这仅是按正常的地热增温考虑,如果存在深部岩浆补给,则可能形成高温气流。通天河引水方案中的引水隧洞将穿越清水河地温梯度的高值异常区;雅砻江引水方案中的隧洞则要穿越达日—久治高地温梯度区。

清水河地区温泉分布较为集中,总体呈北西向展布在长约 120 km ,宽约 30 km 范围内,见有 12 个温泉(群),西端温泉最高水温 $51\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大流量 7.3 L/s ,一般在 $1\sim 3\text{ L/s}$ 左右。达日地区的尼吉娄温泉水温为 $49\text{ }^{\circ}\text{C}$,流量 12 L/s 。温泉的存在,说明上述隧洞经过地区有可能存在由高水热活动引起的高温地层问题。这些地下热水的存在,将增加工程的施工难度,影响到围岩的稳定性;同时,水质分析表明,高温的地下热水对金属铁可能具有潜在性腐蚀作用。

5.2 地下水及高压涌水问题

地下水是影响围岩和硐室施工安全的重要因素,隧洞的涌水更是常见的工程地质灾害。涌水多出现在断层带、岩石破碎带和围岩稳定性极差的地段,而且,深埋长隧洞的涌水还具有涌水量大、水头压力高、补给丰富的特点。因此,要针对不同的地质条件和水文地质背景,对涌水发生的环境地质条件进行分类,对隧洞施工中发生的高压涌水问题,视具体情况采取不同的措施。应对施工比较关心涌水地段进行重点研究,划分出危险洞段,指导隧洞的施工,减少涌水灾害的发生概率。

西线引水洞线区赋存的松散岩类孔隙水、冻结层上水、风化带网状基岩裂隙水等因硐室埋藏深,对围岩稳定影响甚微,影响较大者主要为构造裂隙水。引水洞线区围岩主要为砂岩、板岩及其组合的韵律互层,砂岩中裂隙发育,富水性中等,为透水含水层;板岩裂隙不发育,水量贫乏,为相对隔水层。由于三叠系构造异常发育,在背向斜轴部地带岩层破碎,裂隙发育,有利于地下水的富集、运移,常赋存有较丰富的地下水。此外,在由砂、板岩互层组成的向斜核

部地段,由于板岩隔水亦有形成较好储水构造的条件。引水线路地区第四纪活动性断裂多,断裂带内水量丰富,易于集中渗流,尤其是某些顺河发育断层与地表水有密切的水力联系,地下水源补给充沛,硐室的开挖必将形成地下水富集廊道。在静、动水压作用下,可能出现涌水甚至爆发突水,从而使断层破碎带内充填物和褶皱核部的破碎岩石涌出造成事故,严重的突涌水可能迫使工程改线甚至使工程无法实施。根据西线工程区的实际情况,可采用冻结法、掌子面预注浆法和深孔预注浆法的防治措施。对隧洞施工中发生的高压涌水问题,视具体情况采取不同的措施。在涌水量不大时,采取排水措施,掘进机逆坡开挖;遇到断层破碎带内水压力较高时,可从洞内打排水钻孔,降低洞前方的地下水压;在超前钻探的基础上,如发现有的涌水地段,可以采用超前纵向灌浆,降低涌水流量,局部少量渗水通过集水井排到洞外。

5.3 高地应力及岩爆灾害

岩爆与岩性、围岩应力有密切的关系,而围岩中发育高地压力主要与硐室开挖前的原始应力状态有关。一般地,当岩石的荷载—变形全过程曲线具有Ⅱ或Ⅲ型的形态,且满足弹性应变能指数 $W_{el}>5$ 的条件,围岩就具有产生岩爆的可能。治理岩爆的原则是改善硐室围岩应力状态,释放围岩中储存的应变能和改善岩石的力学性质;合理选择硐线、走向、硐室断面型式及开挖方法等,可减少岩爆发生的概率。

对于深埋隧洞而言,其硐室的稳定不可避免受到高地应力和岩爆的威胁。西线调水工程的自流线路洞体深埋于山体基岩之内,上覆岩体厚度一般为 $500\sim 800\text{ m}$,最大厚度达 $1\,100\text{ m}$ 。抽水线路除部分洞段上覆岩体太薄不易成洞外,大部分洞段上覆岩体厚度在 $100\sim 300\text{ m}$ 之间,远大于常规的 $2\sim 3$ 倍洞跨要求。隧洞的围岩主要为三叠系的浅变质砂板岩,局部洞段为脆性的中生代花岗岩、花岗闪长岩,这些坚硬脆性岩体具备了储存高能量的条件;同时部分洞段将穿越高地应力区。因此,西线工程的深埋隧洞具备了发生岩爆的工程地质条件。

岩体中的应力状态是影响地下工程及其围岩稳定的重要因素。理论与实践均已证明,洞轴与最大主应力的作用方向平行或以小角度相交较为有利(尤其是水平地应力为最大主应力时);若垂直于最大主应力方向或以大角度相交布置,洞体应力较大,易造成侧墙围岩失稳破坏。据西线调水工程区(即巴颜喀

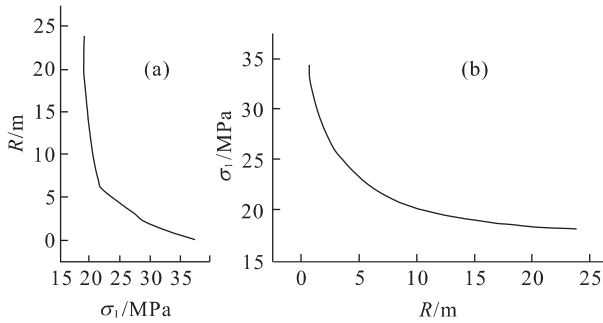


图 4 花岗闪长岩洞段洞顶(a)和边墙(b)应力分布($\lambda=1.10$)

Fig. 4 Stress distribution of roof (a) and flank wall (b) of cavern in granodiorite

拉山地区)中强地震的震源机制解析、卫星影像水系信息宏观资料分析及地应力 Kaiser 效应测量结果,本区现代构造应力场的最大主压应力轴方向由西向东,由 $\text{NNE}19^\circ\sim 32^\circ$ 逐渐东偏至 $\text{NE}50^\circ\sim 60^\circ$ 左右,总体呈 NE 向,与隧洞轴线的交角较小,有利于隧洞的稳定。

水压致裂和地面 Kaiser 测量结果显示,构造应力的量值: σ_1 为 6.0~11.7 MPa,平均值为 8 MPa 左右; σ_2 变化在 1.0~6.0 MPa 之间,平均为 3 MPa 左右; σ_3 变化于 0.3~4.3 MPa 之间,平均在 2 MPa 左右^[28]。海拔 3 000 m 高程位置的 σ_1 量值介于 9~16 MPa 左右,4 000 m 高程位置的 σ_1 量值介于 6~13 MPa 左右。应力形变场的线弹性有限元计算也表明,巴颜喀拉山北坡某些断裂带为构造应力集中区。桑日麻地区还存在 NW 向展布的应变能密度高值区,其值达 $3\,500\text{ J/m}^2$,而其他断裂带上的密度值一般都在 $1\,000\sim 1\,500\text{ J/m}^2$ 左右。计算结果显示,开挖时可能会遇到 50 MPa 左右的高水平挤压应力,在这类地区开洞,可能遇到强岩爆。

科学合理预测岩爆发生洞段是深埋隧道安全施工的重要前提,徐林生等^[29]提出的岩爆“地质超前预报法”和“ σ_θ/r_b 判据现场测定预测法”可以在西线隧道施工中参考应用。对雅砻江方案的长—恰深埋隧洞进行的岩爆预测表明,隧洞经过的黑云母花岗闪长岩洞段肯定会发生岩爆,但强度的大小取决于硐室荷载状况。计算结果表明,最大应力值出现在洞顶和洞底(图 4),这些部位最容易发生岩爆,是工程的重点设防地段;当水平地应力加大到一定程度时,在硐室的边墙附近也会出现应力轨迹线,说明边墙部位也有可能发生岩爆。此外,在辉绿岩、辉长岩

洞段,也会和花岗闪长岩洞段一样,在洞顶和洞底部位将发生岩爆。采用灰色最优归类模型预测岩爆法,预测上述两类岩体施工断面发生岩爆的强度介于弱岩爆和强岩爆之间(Russense 分级)。

参考文献:

- [1] 傅肃性,张崇厚,曹桂发,等.南水北调西线工程与区域持续发展[J].地理科学进展,1997,16(2):32—37.
- [2] 陈效国,席家治.南水北调西线工程与后续水源[J].人民黄河,1999,21(2):16—18.
- [3] 韩振强,张玫.南水北调西线工程可调水量分析[J].人民黄河,1998,20(10):20—22.
- [4] 崔荃,胡建华.南水北调西线工程方案研究[J].人民黄河,1999,21(2):25—28.
- [5] 高庆华,张业成,苏桂武.自然灾害初议[J].地球学报,1999,20(1):81—86.
- [6] 李金都,陈书涛.南水北调西线调水区地质条件与关键地质问题分析[J].人民黄河,1999,21(2):22—24.
- [7] 潘伯敏,李金都.南水北调西线工程地质条件的初步研究[A].见:第三十届国际地质大会组委会.第三十届国际地质大会水利系统论文集[C].郑州:黄河水利出版社,1996.71—79.
- [8] 陈书涛,石守亮,秦建甫.南水北调西线工程环境地质问题分析[J].人民黄河,1999,21(10):29—30.
- [9] 刘传正.地质灾害防治工程的理论与技术[J].工程地质学报,2000,8(1):100—108.
- [10] 李起彤.活断层及其工程评价[M].北京:地震出版社,1991.1—158.
- [11] 孙广忠.工程活动与地质环境[J].第四纪研究,1996,(2):97—102.
- [12] 李兴唐,许兵,黄鼎成,等.区域地壳稳定性研究理论与方法[M].北京:地质出版社,1987.1—231.
- [13] 李兴唐.活动断裂研究与工程评价[M].北京:地质出版社,1991.1—212.
- [14] 李树德.活动断层研究[J].水文地质工程地质,1996,(5):33—35.
- [15] 赵国光.青藏高原北部的第四纪断层运动[J].中国地震,1996,12(12):107—118.
- [16] 张裕明,李闽峰,孟勇琦,等.巴颜喀拉山地区断层活动性及其地震地质意义[A].见:活断裂研究理论与应用[C].北京:地震出版社,1996.154—171.
- [17] 侯康明,石亚缪,张忻.青藏高原北部 NNW 向构造活动方式及形成年代[J].地震地质,1999,21(2):127—135.
- [18] 戴华光.1947 年青海达日 7.75 级地震[J].西北地震学报,1983,5(3):71—77.
- [19] 王学潮,张辉,刘振红,等.南水北调西线工程雅砻江调

水区横向构造的地质特征及成因机制[J]. 华北水利水电学院学报,1999, 20(2): 1—6.

[20] 周荣军,闻学泽,蔡长星,等. 甘孜—玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计[J]. 地震地质,1997, 19(2): 115—124.

[21] 杨继登. 四川西部发生 7 级大震危险性分析[J]. 四川地震,1996, (3): 13—19.

[22] 汪一鹏. 与工程建设有关的活断层性状研究[A]. 见:石宝珩,主编. 中国地质科学新探索[C]. 北京:石油工业出版社,1998. 184—192.

[23] 魏春玲,武生智,李东庆,等. 花石峡气候变化与多年冻土退化的关系预测[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1999, 35(1): 206—209.

[24] 何春雄,吴紫汪,朱林楠. 严寒地区隧道围岩冻融状况分析的导热与对流换热模型[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(增刊 1): 1—7.

[25] 黄润秋,王贤能. 深埋隧道工程主要灾害地质问题分析[J]. 水文地质工程地质,1998, (4): 21—24.

[26] 戴鸿贵,郑正,余刚,等. 地下工程中的氡异常及其治理[J]. 南京大学学报(自然科学版),1999, 35(2): 222—229.

[27] 黄润秋,王贤能,唐胜传,等. 深埋长隧道工程开挖的主要地质灾害问题研究[J]. 地质灾害与环境保护,1997, 8(1): 50—68.

[28] 王学潮,郭启良,张辉,等. 青藏高原东北缘水压致裂地应力测量[J]. 地质力学学报,2000, 6(2): 64—70.

[29] 徐林生,王兰生,李天斌,等. 二郎山公路隧道岩爆特征与预测研究[J]. 地质灾害与环境保护,1999, 10(2): 55—59.

GEOLOGICAL HAZARDS ABOUT WEST-LINE PROJECT OF WATER
DIVERSION FROM UPPER YANGTZE RIVER INTO UPPER YELLOW RIVER

Wang Xuechao, Zhang Hui, Liu Zhenhong, Zhao Ziqiang, Niu Shu'an
(Research Institute of Exploration-Surveying Programming and Designing, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Situated in the north-east of the Tibet plateau where neo-tectonic activity is violent, the west-line project of water diversion from the upper Yangtze River into the upper Yellow River is to divert water by means of long deep-lying tunnels cut across the Bayanhar mountain. The main geological hazards in the project region include the damages from active faults and earthquakes, destructiveness of frozen ground, high ground stress and rock blasting, geo-temperature anomaly, and bank deformation in the reservoir. The most serious geological hazards are the fault activities and earthquakes. This paper discusses the major features and destructive forms caused by the hazards, and presents some measures to deal with these geological hazards.

Key words: water diversion from the upper Yangtze River into the upper Yellow River; geological hazard; earthquake; active fault.