

深埋绿泥石片岩变形特征及稳定性分析

刘 宁¹, 张传庆², 褚卫江³, 朱焕春³, 张 伟¹, 张 洋¹

(1. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 根据锦屏二级水电站绿泥石片岩的特点, 在同一断面综合采用变形、应力和钻孔电视多种监测手段, 分析围岩内部的力学状态。为了更加深入地认识绿泥石片岩的工程力学特性及其对变形破坏机制的影响, 开展单轴和三轴压缩试验、灌浆渗透性试验和三轴流变试验, 揭示绿泥石片岩变形、破坏和失稳的多方面原因, 并为支护措施的确定提供参考意见。绿泥石片岩洞段的围岩稳定主要取决于衬砌结构能否抵挡流变和遇水软化 2 种作用导致的挤压效应, 通过引入软化系数和退化的 Burgers 流变模型, 从衬砌结构的受力角度对围岩稳定性进行评价, 数值计算结果表明衬砌结构具有相当高的安全裕度。

关键词: 岩石力学; 绿泥石片岩; 大变形; 高地应力; 遇水软化; 流变

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)10-2045-08

DEFORMATION BEHAVIOR AND STABILITY ANALYSIS OF DEEP CHLORITE SCHIST

LIU Ning¹, ZHANG Chuanqing², CHU Weijiang³, ZHU Huanchun³, ZHANG Wei¹, ZHANG Yang¹

(1. HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310014, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. HydroChina Itasca Research and Development Center, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

Abstract: According to the characteristics of chlorite schist in Jinping II hydropower station, in the same section, multiple monitoring means including the deformation, stress and borehole TV were adopted to analyze the internal mechanical state of surrounding rock. In order to understand the engineering mechanical properties of chlorite schist and its impact on the deformation failure mechanism, uniaxial and triaxial compression tests, grouting penetration test and triaxial rheological test were carried out. And the test results revealed many factors of deformation, instability and destruction of chlorite schist, and provided reference for determination of supporting measures. The stability of chlorite schist depends mainly on whether the lining structure can resist the squeezing effects caused by rheology and water softening. By introducing softening coefficient and Burgers rheological model, the surrounding rock stability from the viewpoint of the force of the lining structure was evaluated. The results of numerical calculation show that the lining structure is in high safety redundancy.

Key words: rock mechanics; chlorite schist; large deformation; high geostress; water softening; rheology

1 引 言

软岩是一种特定条件下具有显著变形的复杂岩

石力学介质, 其工程岩体力学性质主要表现为非线性的大变形。软岩工程力学问题从 20 世纪 60 年代就作为世界性难题被提出来, 在近几十年的研究过程中, 钱七虎等^[1-5]为此做了大量卓有成效的工作,

收稿日期: 2013-05-28; **修回日期:** 2013-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109221, 51079144); 浙江省博士后科研项目择优资助(2011-bsh-019)

作者简介: 刘 宁(1981-), 男, 博士, 2003 年毕业于青岛理工大学土木工程专业, 现任高级工程师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的研究工作。E-mail: liu_n@ecidi.com

取得了丰富的科研成果。其中，我国著名专家陈宗基等^[6-7]对软岩的特性做出了卓越的贡献，将流变力学引入岩石力学，提出的岩石流变、扩容等方面的研究成果，举世瞩目。1995年中国岩石力学与工程学会专门成立了软岩工程专业委员会，标志着我国软岩工程技术问题进入了新的研究阶段。

在浅埋工程中，软岩地层易产生塌方，且多是在重力作用下产生的。而在深埋工程中，软岩在高应力作用下除发生塌方外(见图1)，大变形、高压、难支护现象是控制工程稳定性的难题^[8-9]。



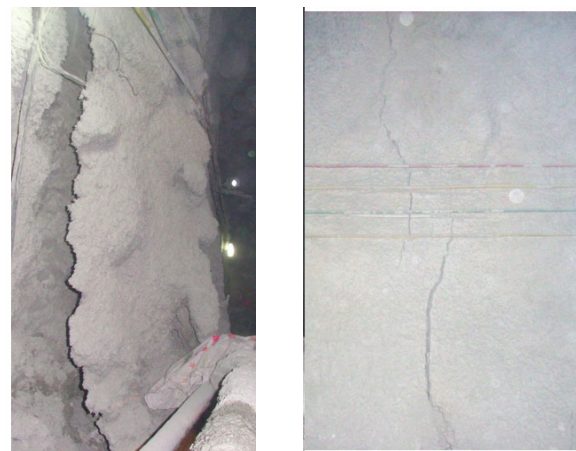
图1 绿泥石片岩洞段塌方
Fig.1 Collapse in chlorite schist section

锦屏二级水电站引水隧洞在开挖过程中遭遇绿泥石片岩地层，该地层洞段总长约400 m，埋深为1 550~1 850 m，若按自重应力考虑，则该部位的最大地应力为42~50 MPa，属于高地应力区。隧洞上断面开挖支护后，短期内即出现了围岩大变形导致的缩径，二次扩挖支护后再次出现缩径问题，且不同断面变形严重程度差别较大。施工期所遭遇到的大变形问题及揭示的控制性因素无疑对引水隧洞运行期衬砌的长期安全造成极大的威胁。因此，认识绿泥石片岩在高应力下的工程力学特性，把握其变形破坏的机制，有利于从根本上有针对性地制定应对策略、提出设计和施工方案，保证隧洞围岩和结构的长期稳定性。但是由于深埋软岩地下工程较少，特别是水利工程，对于深埋软岩在水、时间、灌浆等因素作用下的力学性能如何，缺少系统认识，并没有达到深埋硬岩的水平。本文从锦屏二级深埋绿泥石片岩段开挖后的现场表现入手，通过多种监测仪器全面了解围岩状态，利用多种试验手段更加深入地认识绿泥石片岩的工程力学特性及对变形破坏机制的影响，进而评价隧洞的长期稳定性，可为类似的深埋软岩工程设计应提供参考。

2 围岩力学状态特征分析

2.1 现场表现

在现场可以清楚地观察到如图2(a)左所示的凸起变形现象，凸起高度达到数十厘米，肉眼清晰可见，显示出此处曾出现过严重变形，并且变形所在部位与已有的关于隧洞断面地应力状态的认识基本相符。在图2(b)中，边墙下部出现了竖向裂纹，裂纹形态具有剪切特征，推断该部位的喷层脱空和喷层竖向开裂现象与拱架安装质量相关，很可能是因为拱架底部缺乏有效约束发生滑移变形的结果。



(a) 喷层脱空 (b) 喷层竖向开裂

图2 现场出现的喷层张开脱空和开裂现象
Fig.2 Void and craze of shotcrete layer in site

通过对现场破坏现象的总结归纳可以得到如下认识：

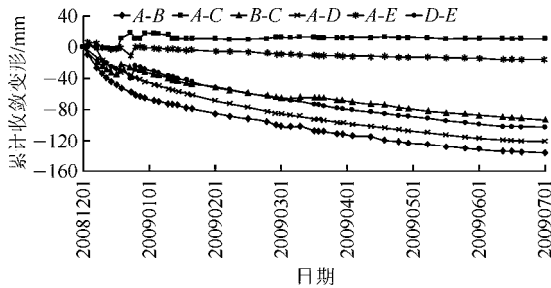
- (1) 岩性因素是导致该洞段围岩变形和喷层破坏的最根本的因素，尤其是岩体内普遍发育的软弱条带明显影响了围岩的整体承载力。
- (2) 断面上大变形部位与断面上初始地应力状态密切相关，可以认为大变形部位代表了断面最大主应力与断面相切的位置。
- (3) 支护安装质量对控制围岩变形有着重要意义，现场观察到的一些喷层破坏可能直接与支护质量有关。

2.2 监测数据

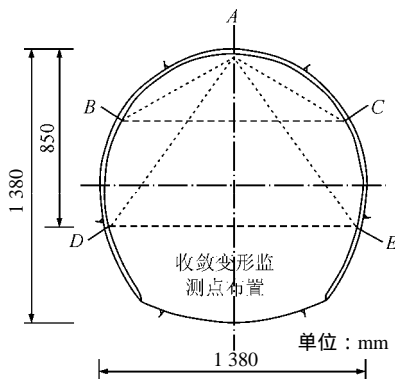
为了更好地了解和判断围岩状况，在绿泥石片岩洞段布置了若干监测断面，并布置了多种监测仪器，包括收敛变形、多点位移计、锚杆应力计、压应力计等，可以帮助全面了解和认识断面围岩状态。

- (1) 变形监测

图 3 为收敛变形监测结果。由图 3 可知，位于顶拱一带的围岩变形得到了控制，而底部一带的变形明显，且到目前为止仍在持续，现场喷层也出现开裂现象，说明所实施的加固措施对隧洞底部一带围岩变形缺乏约束。



(a) 收敛变形时程曲线



(b) 收敛点布置图

图 3 收敛变形监测结果

Fig.3 Convergence deformation monitoring results

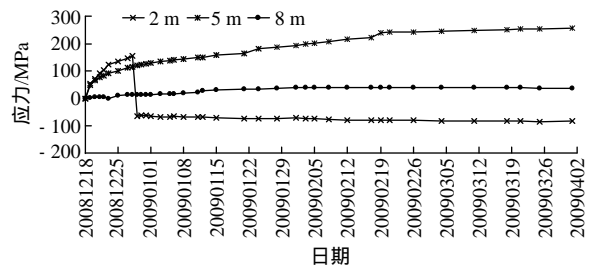
绿泥石片岩段被关注的一个问题是，某些断面的收敛变形观察结果显示的不收敛变形现象。这一监测结果的工程意义显然非常重要。如图 3(b)中左侧的点 B 和 D 受断面地应力状态的影响出现大变形，并且变形仍在持续增加，揭示了绿泥石片岩所具有的流变效应。

(2) 应力监测

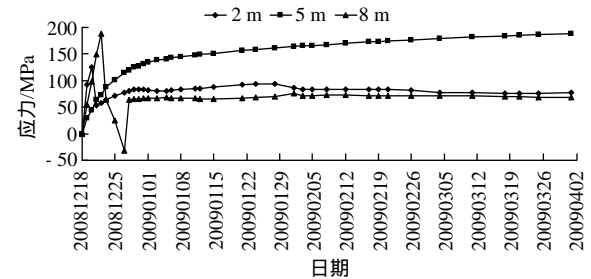
该断面上的锚杆应力计监测成果如图 4 所示，锚杆应力反映的是围岩内部变形的结果，具体特征如下：

在锚杆安装的 1 个月以内，锚杆应力基本平稳，该断面上顶拱锚杆在浅部 2 m 处的最大锚杆应力超过 300 MPa，但 5 和 8 m 深度处锚杆应力很小，基本不受力。这说明支护对围岩变形的控制需要一段比较长的时间。

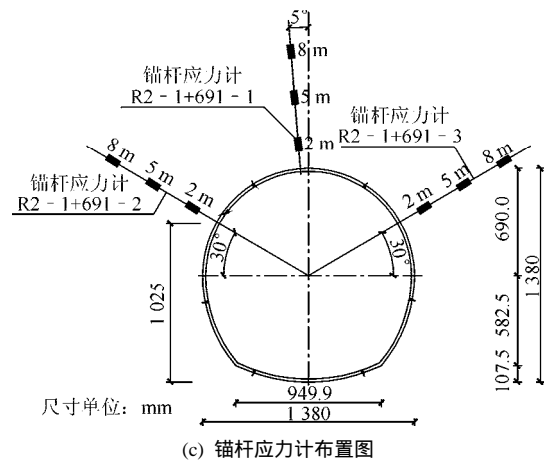
位于左拱肩部位的 2[#]锚杆应力计 R2-1+169-2(见图 4(a))在 5 m 深度处明显受力，最大测值超过 250 MPa，8 m 处锚杆受力较小，最大不超过 50 MPa。



(a) 2[#]锚杆应力计 R2-1+169-2 应力时程曲线



(b) 3[#]锚杆应力计 R2-1+169-3 应力时程曲线



(c) 锚杆应力计布置图

图 4 锚杆应力计监测成果

Fig.4 Anchor stress monitoring results

位于右拱肩 3[#]锚杆应力计 R2-1+169-3(见图 4(b))在 2 m 埋深部位应力接近 100 MPa，5 m 埋深部位达到近 200 MPa 的水平，而 8 m 埋深处锚杆也明显受力，达到接近 50 MPa 量级。

很高的锚杆应力测值说明锚杆与围岩能紧密黏结，适合于绿片岩段的围岩支护，这可能得益于绿片岩本身所具备的性质。

顶拱浅部锚杆受力大、而表面收敛变形小的现象，说明表面支护系统(喷层+拱架)起到了良好的限制变形的作用，也说明变形的可控性。

(3) 钻孔电视

以上对锚杆应力计监测结果的分析旨在通过监测结果了解围岩状态，而钻孔电视成像结果可以较好地补充说明围岩基本状态，图 5 给出了该断面左侧拱肩(对应图 4 中的 2[#]锚杆应力计位置)钻孔成像结果。成像资料清晰显示，在左拱肩部位 2 m 深的

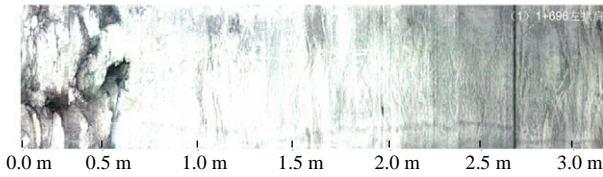


图5 钻孔电视揭示的围岩状况

Fig.5 Condition of surrounding rock by borehole TV

范围内，围岩状态发生了显著变化，承载力显著降低，围岩变形已经不能给锚杆提供良好的锚固力，锚杆应力计读数低。这种围岩结构破坏严重部位围岩承载圈会向更深部位推进，导致5 m深度部位锚杆应力计读数增大。

3 力学特性试验

软岩工程变形、破坏和失稳的原因是多方面的，但其根本原因是其具有复杂的变形力学机制。为了能够更加深入地认识绿泥石片岩的工程力学特性及其对变形破坏机制的影响，针对绿泥石片岩开展了单轴和三轴压缩试验、灌浆渗透性试验和三轴流变试验，以期通过试验成果给现场支护和加固方案的确定提供评价基础。

3.1 单轴压缩试验

绿泥石片岩的单轴压缩试验结果如表1所示，由表1可以看出，所得的结果离散性较大，这可能是由于该洞段绿泥石片岩岩层产状复杂，且绿泥石片岩与绿砂岩互层分布，层厚较小等原因造成的。由于锦屏二级引水隧洞以大理岩为主，绿泥石片岩地层非常短，因此，将其与大理岩进行了比较，以揭示绿泥石片岩变形特征。

表1 干燥和饱和条件下绿泥石片岩的力学特性参数
Table 1 Mechanical characteristic parameters of chlorite schist under conditions of dry and saturated

岩样状态	岩样编号	峰值应力/MPa	弹性模量/GPa	变形模量/GPa	泊松比
饱和	1	37.09	6.01	3.92	0.35
	3	20.24	4.78	3.96	0.70
	4	14.03	1.95	1.82	0.36
	5	6.52	1.44	1.92	0.05
	平均值	19.47	3.54	2.90	0.36
干燥	6	53.37	19.81	17.17	0.38
	7	50.13	13.18	11.83	0.23
	8	35.51	11.35	7.77	0.22
	9	16.18	8.36	6.52	0.18
	平均值	38.80	13.18	10.82	0.25

表1中，绿泥石片岩岩样饱和条件下的平均弹性模量为3.54 GPa，干燥条件下的平均弹性模量为

13.18 GPa。而锦屏深埋大理岩饱和和干燥条件下的弹性模量分别约为30.13和36.53 GPa^[10]，分别为绿泥石片岩的2.8和8.5倍，这意味着仅考虑弹性变形的话，如果大理岩发生20 mm的变形，绿泥石片岩将会发生170 mm的变形。可见，绿泥石片岩的大变形问题是相当突出的，与大理岩破坏模式截然不同，所导致的工程问题和控制措施也完全不同。另外，从干燥和饱和条件下的弹性模量对比可以看出，绿泥石片岩的软化系数达到了0.27，而大理岩的弹性模量并没有出现明显的下降，说明绿泥石片岩的软化效应非常突出，一旦遇水后，强度降低将非常严重，将对衬砌结构产生巨大的作用力。

干燥条件下，绿泥石片岩单轴抗压强度的平均值为38.8 MPa，饱和时为19.47 MPa，后者为前者的50%，强度的软化系数为0.5，强度降低非常明显。其干燥强度约为大理岩强度的43%，这说明，除大的弹性变形外，较低的强度导致岩体破坏时产生的塑性变形也成为该洞段大变形的主要因素之一。且仅对完整岩石来讲，饱和后的强度降低一半，由此导致的工程稳定性问题将非常突出。

3.2 三轴压缩试验

图6为绿泥石片岩在不同围压下的应力-应变曲线，从图中可以看出，绿泥石片岩在围压较小时，应力值出现较大的降幅，随着围压的不断增大，应力降幅变小，逐渐趋向于理想弹塑性状态，并且弹性模量表现出随围压线性增长的趋势。5和20 MPa围压下试样的破坏形态如图7所示。2种围压下试样的破坏均是剪切破坏，较低围压下，试样基本上为宏观单一断面的剪切破坏，通过对岩石试样宏观断口的观察，低围压时破裂面较粗糙，并在破裂面附近出现许多细小的碎裂块；随着围压的增大，破裂面愈加平整，并且附有强烈摩擦作用产生的白色粉末。说明随着围压的不断升高，绿泥石片岩结构

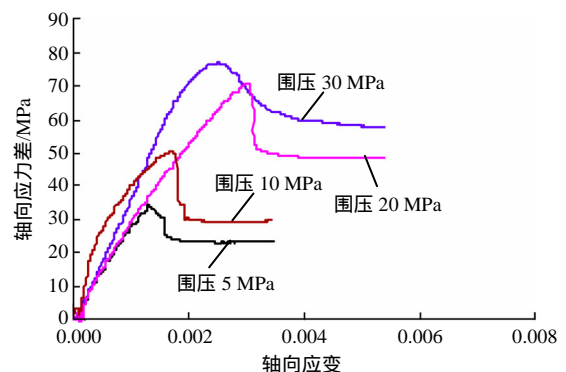


图6 不同围压下绿泥石片岩的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of chlorite schist under different confining pressures

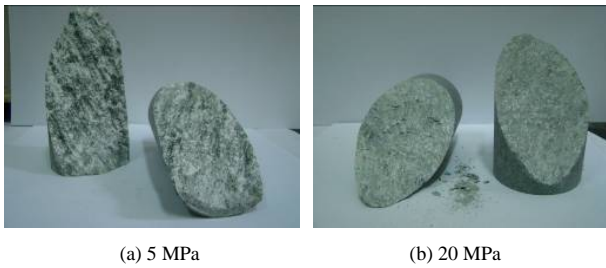


图 7 三轴压缩条件下的破坏形式
Fig.7 Damage forms in triaxial compression

内部被压密，弹性性质的压缩硬化效应明显，围压效应对于控制绿泥石片岩的变形具有重要意义。

3.3 灌浆渗透性试验

绿泥石片岩具有明显的遇水软化特性，为了能够有效降低其渗透性，提高绿泥石片岩的强度，评价灌浆对于绿泥石片岩渗透性的影响，设计了围压作用下灌浆单裂隙面渗透性试验。浆液的配比按现场实际的配比，采用水灰比 0.5(0.6) 1~1 1 的纯水泥浆液。由于现场实际裂隙的开度多在毫米或小于 1 mm 的量级，在实验室制备试样时，受到技术条件的限制，裂隙的开度不能精确控制，最终形成的浆液厚度在 2 mm 左右，如图 8 所示。



图 8 裂隙面灌浆岩样
Fig.8 Grouting in fracture surface of rock sample

试验取围压 15 MPa、渗透压 2 MPa，试验过程中记录每小时的渗流量，试验结果如图 9 所示。含裂隙面岩样在围压作用下，渗流量起始时略有增大，而后呈线性减小趋势，充填过水泥的单裂隙面岩样在围岩作用下，渗流量呈指数形式减小。这一方面说明围压导致空隙坍塌，孔隙率降低，裂隙面愈合；另一方面说明灌浆封堵裂隙对减小岩体渗透性有显著效果。由此可知，现场施工中，一方面应增大围岩的围压，另一方面应封堵裂隙面岩体。据此，应采用 2 种方法相结合以取得较好效果，即进行衬砌等支护，以及对裂隙面岩体进行水泥灌浆。

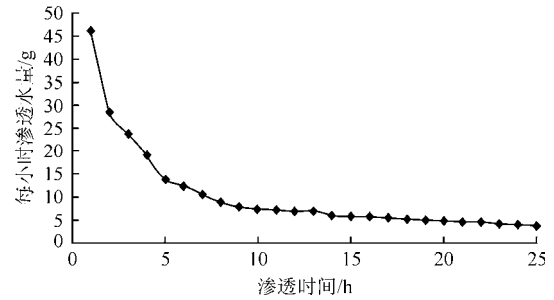


图 9 灌浆岩样渗透水量变化曲线
Fig.9 Water permeability curve of grouting rock sample

3.4 三轴流变试验

绿泥石片岩是一种非常典型的软岩，有着非常强的流变特性，图 10 为绿泥石片岩在饱水条件下，10 MPa 围压下的蠕变试验曲线。可见，在加载应力水平较低时，其蠕变变形较小，流变特征不明显；而当应力水平较高后，绿泥石片岩的流变特性非常明显，在接近长期强度时存在明显地由稳态蠕变向加速蠕变的转变过程。

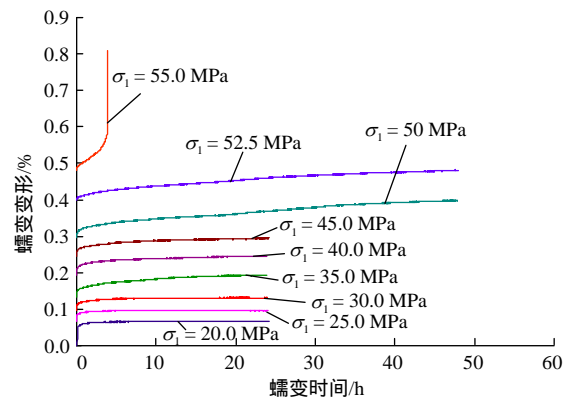


图 10 绿泥石片岩在围压 10 MPa 下的蠕变曲线
Fig.10 Creep curves of chlorite schist under confining pressure of 10 MPa

4 力学特性的工程含义

根据上文对绿泥石片岩力学特性的分析，可以得出以下对于工程的指导建议：

(1) 试验结果表明，绿泥石片岩的弹性模量较小，可变形能力强，仅弹性变形部分就可以导致该岩层中开挖隧洞后的大变形问题。因此，要有效控制这一部分变形，需要施以强有力的表面支护，控制围岩内围压的丧失或者恢复一定的围压。

(2) 绿泥石片岩的强度很低，而该洞段埋深在 1 500 m 以上，应力水平达到近 40 MPa，开挖后在短时间内围岩就可能发生大变形，大范围围岩破裂松动产生的塑性变形也是该洞段围岩大变形的重

组成部分。因此，必须加固破裂围岩，提高其强度，才能有效地控制这一部分变形。

(3) 绿泥石片岩遇水软化特性给引水隧洞工程带来了巨大的挑战。绿泥石片岩自身强度低、刚度小，而该洞段地应力高，开挖后大变形显现，若在运行期存在内、外水的长期作用，特别是对于破裂岩体，水一旦进入，岩体强度将迅速降低，支护质量也随之下降，给围岩和衬砌结构稳定性带来极大威胁。试验结果表明，随着围压的升高，绿泥石片岩的力学状态将得到明显改善。因此，及时支护、提供围压、减小围岩变形量、降低围岩破裂程度、避免渗透系数降低，对于降低软化效应非常重要。

(4) 水对绿泥石片岩变形性质的影响效应也是非常显著的。室内试验表明，随着围压的升高，弹性模量软化系数逐渐升高，且实际工程中由于高围压对裂隙和结构面的压密效应，导致渗透系数降低，围压效应更加显著。

(5) 高应力下软岩的流变变形也相当可观，且主要是由于强度长期劣化造成的。试验表明，其长期强度较瞬时强度有较大幅度降低，要求在支护设计中也要考虑长期流变效应。

5 围岩稳定性分析

绿片岩洞段的围岩稳定主要取决于衬砌结构能否抵挡流变效应和围岩遇水软化 2 种作用导致的挤压效应^[11]。因此对围岩稳定评价时，主要从衬砌结构的受力角度进行评价。

5.1 围岩遇水软化效应

根据监测资料，绿泥石片岩可能成为明显的透水通道的深度，在左拱肩一带为 2 m 左右，而在其他部位略浅一些，围岩遇水软化的直接结果必然是导致围岩体力学属性的退化，如变形、强度参数的降低。室内试验数据表明，饱水条件下岩石单轴抗压强度可以降低 50%。综合这些信息，假设围岩 2 m 深度充水，其中，第 1 m 深度的岩体强度和变形模量均降低至初值的 65%，第 2 m 降低至 80%。表 2 给出了本次分析所采用的岩体变形参数^[12]，其中，软化系数定义为遇水软化后围岩力学参数与原始参数的比值。

表 2 岩体软化变形参数^[12]

Table 2 Softening deformation parameters of rock mass^[12]

软化系数/%	E/GPa	ν
65	1.44	0.28
80	2.36	0.27
100	4.44	0.25

图 11 为衬砌最大拉应力分布，从图中可以看出，围岩遇水软化过程中，除两侧拱脚外，其他部位均处于受压状态，并且两侧拱脚最大拉应力 1.41 MPa，小于混凝土抗拉强度标准值 2.01 MPa，结构处于安全状态。

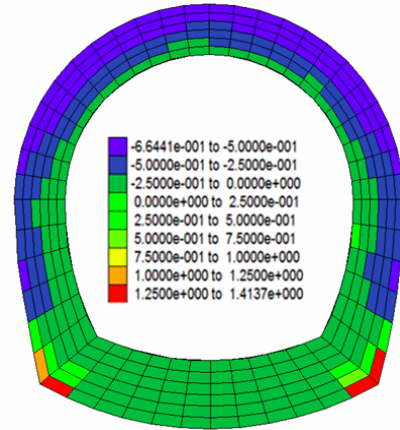


图 11 软化条件下衬砌结构最大拉应力(单位：MPa)
Fig.11 Maximum tensile stress in lining structure under softening condition(unit：MPa)

衬砌结构最大压应力如图 12 所示，图中显示，最大压应力出现顶拱靠近内侧部位，最大压应力为 3.12 MPa，远小于等级为 C30 混凝土抗压强度标准值 20.1 MPa。

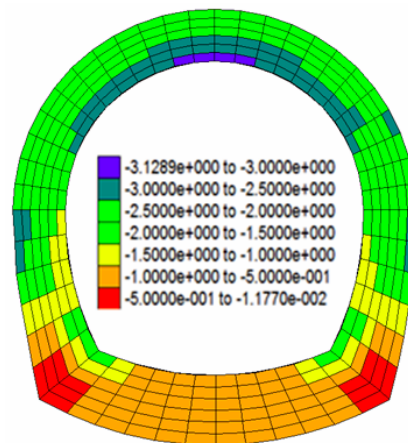


图 12 软化条件下衬砌结构最大压应力(单位：MPa)
Fig.12 Maximum compression stress in lining structure under softening condition(unit：MPa)

5.2 流变变形效应

考察衬砌在运行期间的受力情况需要结合衬砌的施工时机，本次计算参考锦屏二级引水隧洞衬砌施工时间，采用滞后开挖 1.5 a。本次计算采用退化的 Burgers 模型来描述绿泥石片岩的衰减型流变^[12](见图 13)。显然，该模型在恒定荷载作用下，流变速率随着时间的增加而减小，最终趋于稳定，其过程

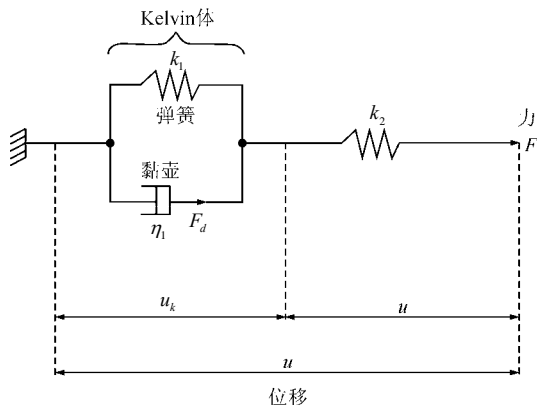


图 13 退化的 Burgers 流变模型

Fig.13 Degraded Burgers rheological model

是典型的衰减流变过程。该模型一共有 7 个参数，其中 4 个参数描述弹性行为，即 Kelvin 体中的弹簧和 Maxwell 体中弹簧，分别为 G_K ， K_K ， G_M ， K_M ，即 Kelvin 体弹簧的剪切模量、Kelvin 体弹簧的体积模量、Maxwell 体弹簧的剪切模量、Maxwell 体弹簧的体积模量。一个参数描述 Kelvin 体黏壶的力学行为，即 Kelvin 体黏壶黏滞系数 η_k 。屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则，其中的 2 个参数描述塑性行为：黏聚力 c 和摩擦角 φ 。相关参数见表 3。

表 3 绿泥石片岩流变参数

Table 3 Rheological parameters of chlorite schist

弹性参数		黏性参数		塑性参数		
G_K /GPa	K_K /GPa	G_M /GPa	K_M /GPa	η_k / (MPa · a)	c /MPa	φ / (°)
1.31	2.30	1.31	2.30	272	1.685	27

计算流程如下：

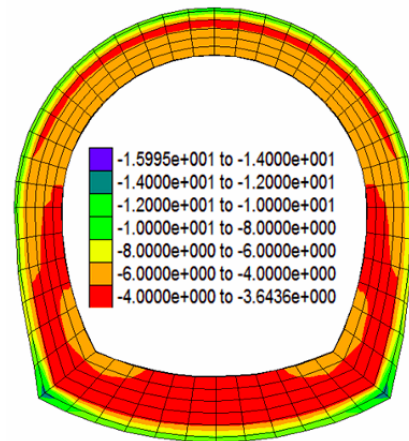
(1) 采用弹塑性本构模型计算引水隧洞开挖后的应力状态和变形特征，此时不考虑流变。

(2) 将弹塑性本构模型替换为黏弹塑本构模型，模拟围岩的流变变形至 1.5 a。

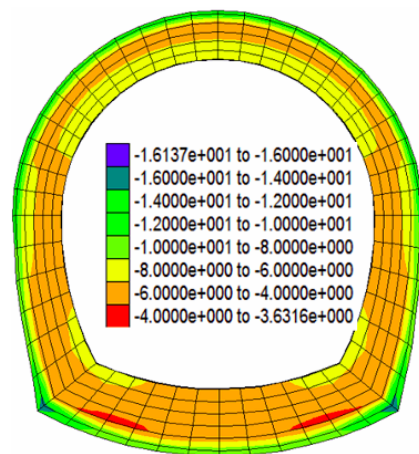
(3) 安装衬砌，继续流变计算。此时，随着时间的增长，围岩流变变形的继续发生，衬砌内部的压应力逐渐增大。

(4) 计算持续至隧洞开挖后 100 a，即考察运行期大约 100 a 的时间跨度内，衬砌结构的受力情况。

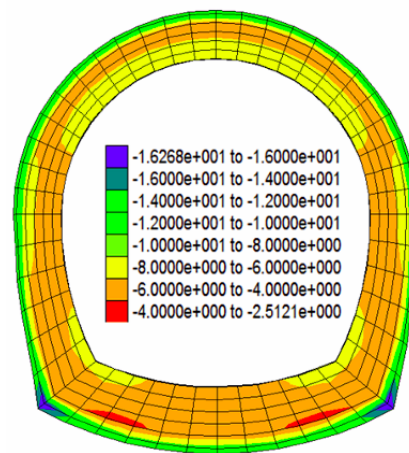
图 14 为衬砌施工滞后 1.5 a 条件下，衬砌最大压应力云图，从图中可以得出，若衬砌施工滞后隧洞开挖 1.5 a，则衬砌断面在 100 a 的永久运行期间，其最大应力均不会超过混凝土抗压强度标准值。



(a) 开挖后 2 a



(b) 开挖后 6 a



(c) 开挖后 100 a

图 14 流变作用下衬砌受力情况(单位：MPa)

Fig.14 Force in lining under rheological effect(unit：MPa)

6 结 论

锦屏二级水电站引水隧洞的绿泥石片岩洞段具有高埋深和大直径的显著特点，在开挖过程中出现

了明显的大变形现象, 本文通过绿泥石片岩围岩状态分析、力学特性试验、数值分析, 得到如下主要结论:

(1) 通过现场观测和监测资料, 深入研究了围岩状态, 对围岩破裂特征、变形特征、应力特征进行了对比分析, 全面解译了不同监测方式对绿泥石片岩围岩状态改变的指示意义。

(2) 绿泥石片岩自身强度低、刚度小, 而该洞段地应力高, 开挖后大变形显现, 若在运行期存在内、外水的长期作用, 将会给围岩和衬砌结构稳定性带来极大威胁, 必须充分把握其强度特性和软化特性。

(3) 灌浆阻水是绿泥石片岩洞段降低岩体遇水软化的重要措施, 通过针对性的灌浆渗透性试验, 评估了绿泥石片岩裂隙灌浆后的阻水效果。

(4) 从遇水软化和流变效应 2 个角度评价了绿泥石片岩洞段的围岩稳定性, 其中通过考虑软化系数反映岩体参数的软化效应, 而流变效应则采用了退化的 Burgers 流变模型。2 种情况下计算的衬砌结构均在安全范围之内。

参考文献(References):

- [1] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展——深部岩体力学的若干问题[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 10–17.(QIAN Qihu. The current development of nonlinear rock mechanics—the mechanics problems of deep rock mass[C]// Proceedings of the 8th Rock Mechanics and Engineering Conference. Beijing: Science Press, 2004: 10–17.(in Chinese))
- [2] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 153–175.(HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Mechanics for soft rocks[M]. Beijing: Science Press, 2002: 153–175.(in Chinese))
- [3] 孙 钧. 岩土材料流变及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 459–562.(SUN Jun. Rheology of geomaterials and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999: 459–562.(in Chinese))
- [4] 何满潮. 软岩巷道工程概论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1993: 36–77.(HE Manchao. General theory of soft rock tunnel engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1993: 36–77.(in Chinese))
- [5] 郭富利, 张顶立, 苏 洁, 等. 地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2324–2332.(GUO Fuli, ZHANG Dingli, SU Jie, et al. Experimental study on influences of groundwater and confining pressure on mechanical behaviors of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2324–2332.(in Chinese))
- [6] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1–20.(TAN Tjongkie. Mechanical problems of long-term stability of underground galleries[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1): 1–20.(in Chinese))
- [7] 陈宗基, 康文法. 在岩石破坏和地震之前与时间有关的扩容[J]. 岩石力学与工程学报, 1983, 2(1): 11–21.(TAN Tjongkie, KANG Wenfa. Time dependent dilatancy prior to rock failure and earthquakes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1983, 2(1): 11–21.(in Chinese))
- [8] 刘志春, 李文江, 朱永全, 等. 软岩大变形隧道二次衬砌施作时机探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 580–588.(LIU Zhichun, LI Wenjiang, ZHU Yongquan, et al. Research on construction time of secondary lining in soft rock of large-deformation tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 580–588.(in Chinese))
- [9] 晏启祥, 何 川, 姚 勇. 软岩隧道施工特性及其动力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 572–577.(YAN Qixiang, HE Chuan, YAO Yong. Study on construction characteristic and dynamic behavior of soft rock tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 572–577.(in Chinese))
- [10] 张传庆. 雅砻江锦屏二级水电站深埋长大引水隧洞施工期围岩稳定性与动态反馈分析研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.(ZHANG Chuanqing. Deep buried long and large diversion tunnel surrounding rock stability and dynamic feedback analysis of Yalong River Jinping II hydropower station[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.(in Chinese))
- [11] ZHANG C S, CHU W J, LIU N, et al. Laboratory tests and numerical simulations of brittle marble and squeezing schist at Jinping II hydropower station, China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(10): 30–38.
- [12] 朱永生, 朱焕春. 绿片岩段衬砌安全性评价[R]. 武汉: Itasca(武汉)咨询有限公司, 2010.(ZHU Yongsheng, ZHU Huanchun. Safety evaluation on lining of chlorite schist[R]. Wuhan: Itasca Consulting Co., Ltd., 2010.(in Chinese))