

原状软碎岩体室内被动三轴变形特性研究

夏 维 学， 张 巨 会

(中国水利水电第七工程局有限公司 第一分局,四川 彭山 620860)

摘 要:岩体变形特征是水利水电工程建设中最重要的参数之一,其可以合理地评价岩体的工程特性,并且科学地获取岩体的变形参数,是岩体稳定性分析、水工支护设计和工程地质定量评价的核心内容。岩石三轴压缩强度是岩石物理力学性质之一,系指岩石试件在三向压应力作用下所能抵抗的最大轴向应力。本次研究依托固增水电站引水隧洞工程,采集典型软碎岩体试样,通过室内试验对岩体的被动三轴变形特性展开研究,对变形参数进行分析,获得了岩体分级加载应力和变形参数之间的关系,进而对其工程特性进行了系统的评价,为地下工程支护设计提供了相对可靠的设计参数。

关键词:水利水电工程;软碎岩体;被动三轴变形特性;研究;固增水电站

中图分类号:TV7;TV223.1;TV41

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2021)01-0001-06

Laboratory Study on Passive Triaxial Deformation Characteristics of Undisturbed Soft Fractured Rock Mass

XIA Weixue, ZHANG Juhui

(First Branch of Sinohydro Bureau 7 Co., LTD, Pengshan, Sichuan, 620860)

Abstract: Deformation characteristics of rock mass, which can reasonably assess the deformation parameters and scientifically obtain the deformation parameters of rock, is one of the most important parameters in water conservancy and hydropower engineering, and it is also the core content of rock mass stability analysis, hydraulic support design and quantitative evaluation of engineering geology. The triaxial compressive strength is one of the physicomechanical properties of rock mass, which refers to the maximum axial stress that rock specimen can resist under triaxial compressive stress. This paper studies the passive triaxial deformation characteristics of typical soft fractured rock samples from the diversion tunnel of Guzeng Hydropower Station through laboratory tests, analyses the deformation parameters, obtains the correlation between grading loading stress and deformation parameters of rock mass, systematically evaluates the engineering characteristics, and finally provides relatively reliable parameters for the design of underground support engineering.

Key words: water conservancy and hydropower engineering; soft fractured rock mass; passive triaxial deformation characteristics; study; Guzeng Hydropower Station

1 概 述

工程岩体的物理力学特性是地下工程开挖和支护设计的前提,合理、准确地获取工程岩体的物理力学性能参数,一方面可以据此制定合理、有效的施工开挖方案,以保证施工安全;另一方面,准确的岩体物理力学性能参数用于围岩支护设计,在保证支护效果的同时,将显著降低工程冗余造成的浪费,提高经济效益。

长期以来,以板岩为代表的各向异性软岩一直受到工程界和学术界的关注,钟志彬等采用天然裂隙发育的流纹岩开展常规三轴压缩试验,并

且引入 Oda 裂隙结构张量对岩石内天然随机裂隙网络发育特征进行定量描述,据此评价裂隙网络发育特征与岩石弹性模量、泊松比等变形参数影响特征^[1~3]。

固增水电站所在场址的工程岩体受不同尺度复杂的区域构造作用及成岩过程的影响,使得岩体呈碎裂状。笔者所进行的研究系针对固增水电站炭质板岩、千枚岩等为代表的软弱岩体开展。

2 试验设计

实验室按照围压是否相等可分为常规三轴和真三轴试验。针对软碎岩体,利用自制的内外钢筒通过 CSS—JXE1000 kN 电液伺服试验机在室

内开展被动型常规三轴压缩试验,探究软碎岩体在被动常规三轴压缩下的变形特征并获取压缩模量等参数^[4],同时佐证现场试验获取的岩体变形参数。

按照普通岩石的取样方法,软碎岩体难以取得试样进行室内或室外试验。为此,参考细粒土原状试样取样筒和环刀取样及制样方法取得软碎岩体(断层岩)的原状试样^[5]。选取并制作了 3 个试样依次命名为 Y01,Y02,Y03 进行室内被动型常规三轴加载试验。

3 软碎岩体原状样室内试验分析

3.1 分级加载应力应变分析

试验过程中,CSS-JXE1000 kN 电液伺服试验机计算机主机自动采集轴向荷载、轴向位移数据,应变箱所连计算机自动采集内外钢管不同部位轴向和环向两向应变数据。轴向荷载通过原状样面积换算变成轴向应力,轴向位移也通过原状样原长换算成轴向应变。图 1~8 为不同轴向压力下软碎岩体轴向应力-应变曲线。

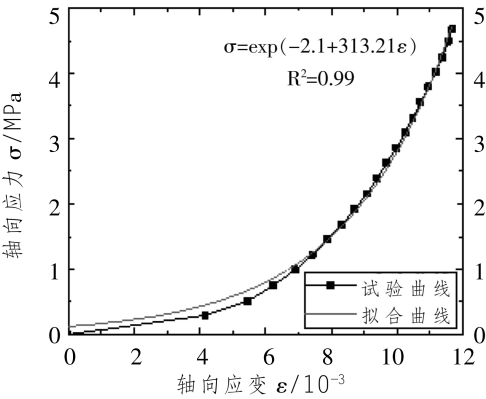


图 1 第 1 级

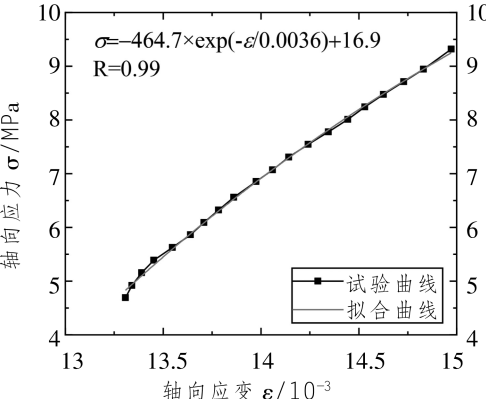


图 2 第 2 级

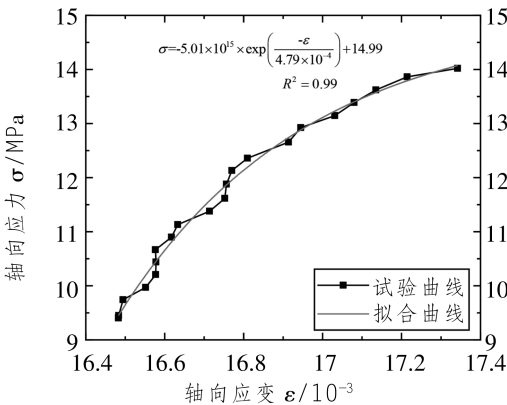


图 3 第 3 级

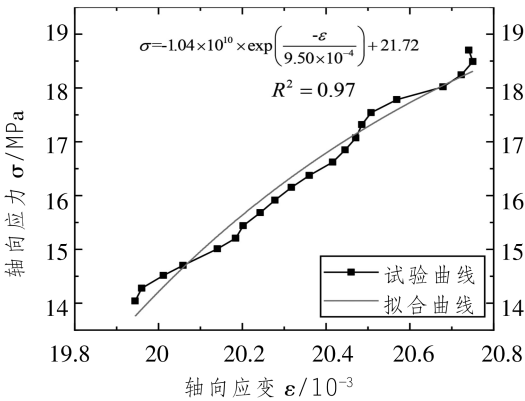


图 4 第 4 级

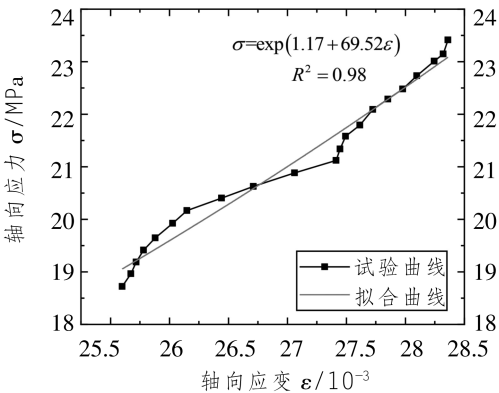


图 5 第 5 级

从不同轴压作用下软碎岩体的应力-应变曲线可以看出:整个 8 级加载过程应力-应变曲线可视为 S 型,分为 3 个阶段。第 1 阶段为第 1 级加载,曲线表现为上凹型。第 2 阶段为第 2 级加载,曲线表现为近似直线型。第 3 阶段为第 3 级加载~第 8 级加载,曲线表现为下凹型。

由拟合曲线整体上看轴向应力与轴向应变呈正相关关系。第 1 级加载拟合曲线为 2 参数斜率

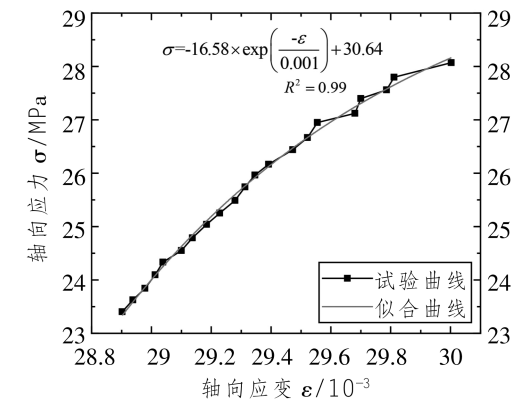


图 6 第 6 级

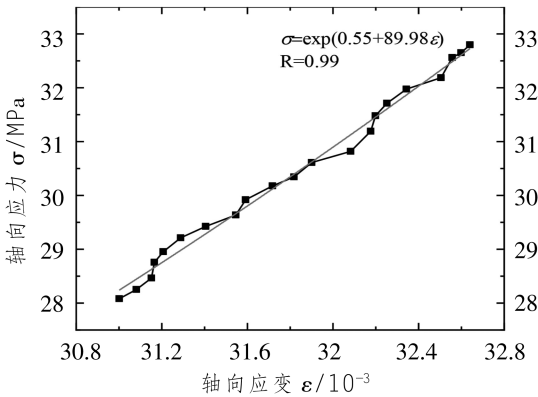


图 7 第 7 级

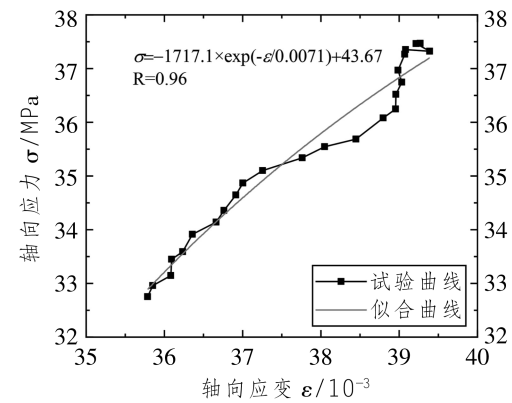


图 8 第 8 级

递增型指数正相关关系,第 2 级加载拟合曲线虽为 3 参数斜率递增型指数关系,但斜率递增极其缓慢,可以认为近似直线型关系。第 3 级加载~第 8 级加载拟合函数虽偶有变化,但均表现为斜率递减型指数正相关关系。

3.2 分级加载模量-应变关系

通过试验获得分级加载软碎岩体全过程压缩模量 E_q -应变关系曲线和加载阶段切线模量 E_j -

应变关系曲线,分别采用不同函数对试验数据进行拟合分析。试验过程中,计算机每隔 1 s 记录一个轴向荷载值和一个应变值。其中全过程变形模量 E_q 系指加载中全部所施加的应力与产生的总应变之比,因此计算时直接采用轴向荷载面积换算变成的轴向应力除以计算机记录到的总应变即可得到 E_q 。加载阶段的切线模量 E_j 系指各级荷载加载阶段应力增量与应变增量之比,利用每相邻两秒的轴向应力应变数据可以算得加载阶段的切线模量。图 9~16 为分级加载软碎岩体全过程压缩模量-应变关系曲线和加载阶段切线模量-应变关系曲线。

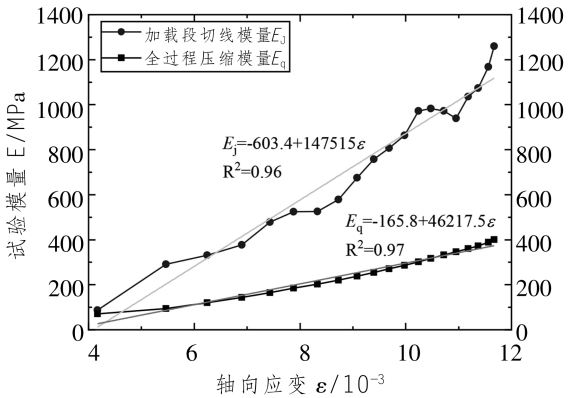


图 9 第 1 级加载软碎岩体压缩模量或切线模量-应变曲线图

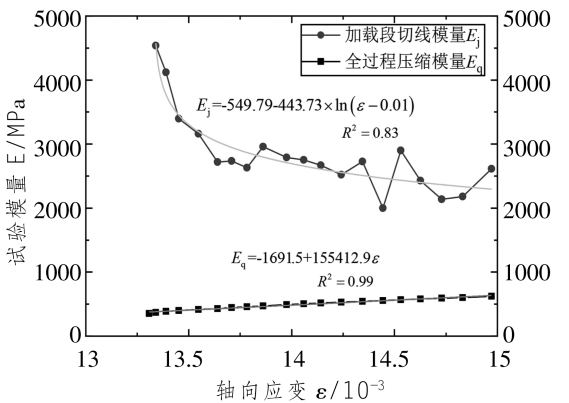


图 10 第 2 级加载软碎岩体压缩模量或切线模量-应变曲线图

从分级加载软碎岩体全过程压缩模量-应变关系曲线和加载阶段切线模量-应变关系曲线可以得出:在被动三轴应力条件下,固增水电站软弱软碎岩体的应力-应变特征整体上表现为:起始的压密阶段和后期的弹塑性变形过程,在此过程中,随着轴向压力的增大,环向约束力亦相应增大,岩

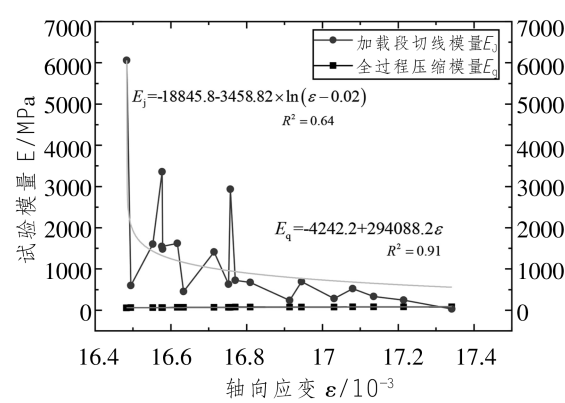


图 11 第 3 级加载软碎岩体压缩模量或切线模量-应变曲线图

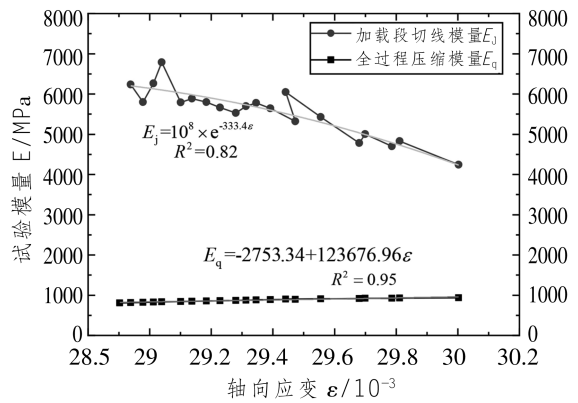


图 14 第 6 级加载软碎岩体压缩模量或切线模量-应变曲线图

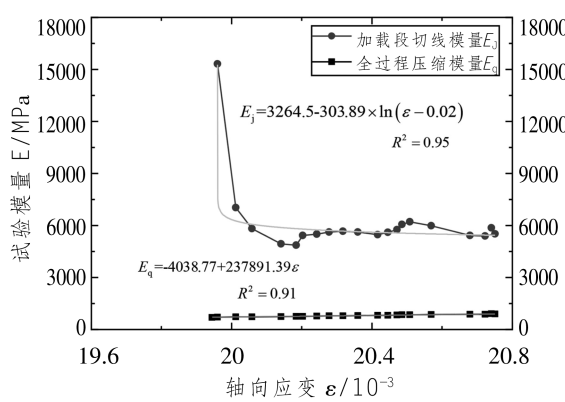


图 12 第 4 级加载软碎岩体压缩模量或切线模量-应变曲线图

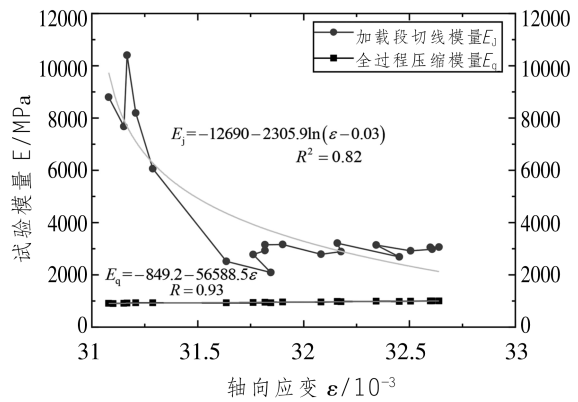


图 15 第 7 级加载软碎岩体压缩模量或切线模量-应变曲线图

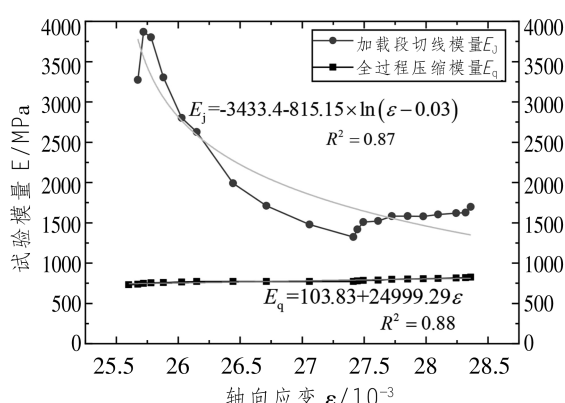


图 13 第 5 级加载软碎岩体压缩模量或切线模量-应变曲线图

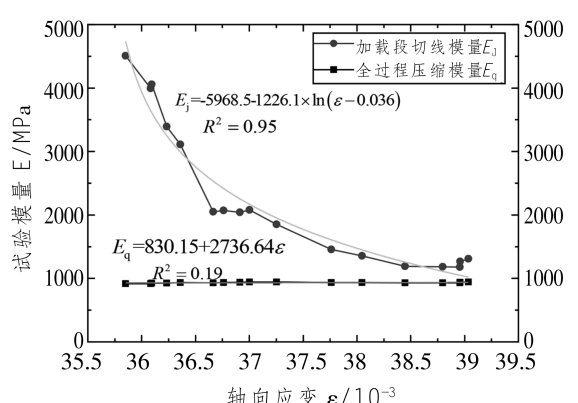


图 16 第 8 级加载软碎岩体压缩模量或切线模量-应变曲线图

体的变形特征参数也相应呈不同的变化特征,这些特征表明:对于软弱软碎岩体,其变形量大且与围压呈相应关系,围岩对变形的影响显著。

4 软碎岩体原状样变形参数分析

4.1 被动三轴试验理论

为通过原状样室内被动约束三轴压缩试验成果获得岩体的变形参数,研究中将内外钢筒受力问题看做平面应变问题。利用弹性力学原理,从外向内一步步进行计算,求得等效围压 q_3 ,同时考虑钢筒和试样之间的摩擦力,经侧压力系数转

换求出试样泊松比,并利用压缩模量定义求出试样似压缩模量。

4.2 软碎岩体变形参数的计算分析

软碎岩体似压缩模量及泊松比计算过程为以下 5 步:(1)求外筒环向应变值 $\epsilon_{\theta e}$; (2)求内钢筒环向应变值 $\epsilon_{\theta i}$; (3)求内钢筒轴向应变 $\epsilon_{\perp 2}$; (4)将上述 $\epsilon_{\theta e}$ 、 $\epsilon_{\theta i}$ 及 $\epsilon_{\perp 2}$ 的起点应变值代入弹性力学原理推导出的公式,求得的岩体压缩模量和泊松比即为起点应变法下的计算结果;(5)分别取 $\epsilon_{\theta e}$ 、 $\epsilon_{\theta i}$ 及 $\epsilon_{\perp 2}$ 的终点应变值和中点应变值,仿照起点应变法,分别求出终点应变法及中点应变法下岩体压缩模量和泊松比的值。

笔者在文中仅列举了采用中点法计算岩体的似压缩模量和泊松比。表 1 为采用中点法计算的 Y01 原状软碎岩体应变表。

表 1 中点法 Y01 原状软碎岩体应变表

加载级数	轴向 σ_1 /MPa	$\epsilon_{\theta i}$ / $\mu\epsilon$	$\epsilon_{\theta e}$ / $\mu\epsilon$	$\epsilon_{\perp 2}$ / $\mu\epsilon$
1 级	4.68	207	96.8	—208
2 级	9.35	279.8	111.5	* 50.5
3 级	14.04	179.1	43.8	* 691.5
4 级	18.72	192.1	41.1	—900
5 级	23.41	304.8	14.4	—356.5
6 级	28.08	130.8	31.8	—368.5
7 级	32.76	441.0	42.3	—176.5
8 级	37.44	30.0	52.2	—378.5

注:“*”为无数据或数据异常。

由表 1 可以看出:

(1)Y01 原状软碎岩体内筒环向应变 $\epsilon_{\theta i}$ 和外筒环向应变 $\epsilon_{\theta e}$ 均为拉应变,而内筒轴向应变 $\epsilon_{\perp 2}$ 多为压应变。内筒环向应变 $\epsilon_{\theta i}$ 普遍比外筒环向应变 $\epsilon_{\theta e}$ 数值要大,说明环氧树脂砂浆对原状样有约束效果。

(2)Y01 原状软碎岩体内筒环向应变 $\epsilon_{\theta i}$ 在 30~441 $\mu\epsilon$ 之间,且随着加载级数的增加呈先减后增的趋势,外筒环向应变 $\epsilon_{\theta e}$ 在 14.4~111.5 $\mu\epsilon$ 之间,且随着加载级数的增加呈先减后增的趋势。内筒轴向应变 $\epsilon_{\perp 2}$ 在 -900 ~ -176.5 $\mu\epsilon$ 之间。应变的小值均是由第 5~8 级加载测得,内筒环向应变 $\epsilon_{\theta i}$ 的大值由第 7 级加载测得,外筒环向应变 $\epsilon_{\theta e}$ 的大值由第 2 级加载测得,内筒轴向应变 $\epsilon_{\perp 2}$ 的大值由第 4 级加载测得。

表 2 为中点法 Y01 原状软碎岩体变形参数,由表 2 可以看出:

(1)压缩模量并非一个常数,其在 279.09~11 457 MPa 之间变化,且随着加载级数的增加呈先增后减的趋势。模量的小值系由第 1 级加载算得,模量的大值系由第 6 级加载算得。

表 2 中点法 Y01 原状软碎岩体变形参数表

加载级数	轴向 σ_1 /MPa	q_3 / MPa	F_{ax1} /kN	F_{ax2} /kN	μ	E_s /MPa
1 级	4.68	5.99	3 941.6	39.4	* 0.65	279
2 级	9.35	7.14	956.9	9.5	0.42	2 678.1
3 级	14.04	3.20	13 103.9	131	0.27	2 466.1
4 级	18.72	3.15	17 055	170.5	0.21	2 028.8
5 级	23.41	2.49	6 755.7	67.5	0.1	6 602.7
6 级	28.08	2.33	6 983.1	69.8	0.08	11 457
7 级	32.76	4.66	3 344.6	33.4	0.12	6 794
8 级	37.44	2.75	7 172.6	71.7	0.07	10 638.1

注:“*”为无数据或数据异常。

(2)压缩模量与加载级数或与轴向压力 σ_1 显著相关。总体上表现为:加载级数越高,轴向压力 σ_1 越大,所算得的 E_s 越大。并且第 6 级加载所得模量几乎是第 1 级加载所得模量的 41 倍。第 2 级加载和第 3 级加载是整个加载过程中模量相差最小的,第 7 级加载和第 8 级加载算得的模量值相差小于 57%,反映了软碎岩体由原状到密实的变化过程。

(3)泊松比并非一个定值,其在 0.07~0.42 之间变化,且随着加载级数的增加呈递减的趋势。泊松比的大值是由第 2 级加载测得,泊松比的小值是由第 8 级加载测得。泊松比随加载级数的变化大体上和模量随加载级数的变化趋势相反。

(4)泊松比与加载级数或与轴向压力 σ_1 显著相关。总体上表现为:加载级数越高或轴向压力 σ_1 越大,所算得的泊松比 μ 越小。并且第 2 级加载所得泊松比最大,是第 8 级加载所得泊松比的 6 倍。第 5 级加载~第 8 级加载每两级加载增量比刚开始第 2 级加载~第 5 级加载小,到第 8 级加载时原状样已很难被压缩, μ 取到最小值反映了软碎岩体由原状到密实的变化过程。表 3 及表 4 为原状软碎岩体各级载荷下的变形参数。

从表 3 和表 4 对软碎岩体原状样进行的压缩试验结果中可以总结出软碎岩体的以下特征:

(1)原状软碎岩体试样总应变较大,试样总应变达 3.93%,由总应变所得的变形模量 E_q 介于 22.7~1 005 MPa,变形模量值随着轴向压力的增加而变大;

(2)加载阶段的变形模量 E_j 亦随轴向压力增加而变大,且波动较大;

表 3 原状软碎岩体各级载荷下的变形参数表

加载级数	压力值 /MPa	加载阶段模量 E_j /MPa		
		最小值	最大值	平均值
1 级	4.68	64.7	432.7	271.4
2 级	9.35	2781	7 049	3 617
3 级	14.04	5 934	190 657 *	12 024
4 级	18.72	3 198	15 316	5 653
5 级	23.41	1 202	4 552	2 170
6 级	28.08	4 243	15 941	5 771
7 级	32.76	2 089	14 454	4 248
8 级	37.44	1 146	129 301 *	3 789

表 4 原状软碎岩体各级载荷下的变形参数表

加载级数	压力值 /MPa	全过程模量 E_q /MPa		
		最小值	最大值	平均值
1 级	4.68	22.7	400.4	244.8
2 级	9.35	352	622	492
3 级	14.04	570	811	696
4 级	18.72	704	902	802
5 级	23.41	731	822	778
6 级	28.08	810	937	876
7 级	32.76	903	1 005	953
8 级	37.44	910	962	935

注:(1)全过程变形模量 E_q 指全部加载中所施加的应力与产生的总应变之比;(2)加载模量 E_j 指各级荷载加载阶段应力增量与应变增量之比;(3)压缩模量 E_s 指考虑侧向约束下各级荷载增量与应变增量之比;(4)泊松比 μ 指根据侧向约束筒变形推算试样侧向应变与轴向应变之比;(5)“*”为无数据或数据异常。

(3)似压缩模量 E_s 随着轴向压力的增加明

显变大,呈似线性关系;

(4)泊松比随着轴向压力的增加而减小;

(5)各级荷载下,稳压阶段的试样仍出现较大的时效变形,说明软碎岩体具有固结变形特征。

5 结 语

研究结果表明:环向约束作用对软碎岩体变形特性的影响十分显著,隧洞开挖后围岩的约束作用减小,软碎岩体变形参数显著劣化,围岩稳定性显著降低。因此合理、及时的初期支护措施能够有效提高围岩的环向约束作用,从而提高围岩的稳定性。

软弱碎裂岩体力学参数的有效测试是岩石力学与工程领域的一个难题,软碎岩体现场原状取样和室内三轴压缩试验方法实现了隧洞软碎岩体的原状取样和室内被动三轴压缩试验,获得了原状软碎岩体的压缩变形特性及相关变形参数,为水工隧洞的设计和施工提供了可靠的依据。

参考文献:

[1] 钟志彬,邓荣贵,李 佳,等.天然裂隙性流纹岩三轴力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报.2014,33(6):1233—1240.

[2] 高春玉,徐 进,李忠洪,等.雪峰山隧道砂板岩各向异性力学特性的试验研究[J].岩土力学.2011,32(5):1360—1364.

[3] 钟志彬,邓荣贵,尹 静,等.基于 Oda 裂隙结构张量的流纹岩各向异性试验研究[J].实验力学.2015,30(2):199—206.

[4] 周洪福,聂德新,陈津民.深部破碎岩体变形模量的一种新型试验方法及工程应用[J].吉林大学学报(地球科学版).2010,40(6):1390—1394.

[5] 工程岩体试验方法标准,GB/T50266—2013[S].

作者简介:

夏维学(1972-),男,四川仁寿人,总工程师,正高级工程师,从事水利水电工程与市政工程施工技术与管理工作;

张巨会(1976-)女,吉林九台人,工程师,从事水利水电工程与市政工程施工技术与管理工作.

(责任编辑:李燕辉)

水电七局白鹤滩党组织获评央企基层示范党支部

2020 年 12 月 28 日,国务院国资委党委下发《关于命名中央企业第二批基层示范党支部的通知》,水电七局白鹤滩施局第二党支部获评中央企业第二批基层示范党支部。此次获评的第二党支部管理的 31 名党员均来自工程一线(包含 1 名劳务党员和 8 位农民工党员)。该党支部始终坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引,认真学习贯彻党的十九大、十九届历次全会精神,以《党章》和《中国共产党支部工作条例(试行)》为基本遵循,坚持“四好四强”标准,扎实开展“党建巩固深化年”专项行动计划各项工作,积极推动党建与生产经营深度融合,在疫情防控、生产经营及高质量发展中充分发挥党支部的战斗堡垒作用,真抓实干,带领广大职工取得了突出成绩,为白鹤滩工程冲刺 2021 年 7 月首批机组投产发电、向建党 100 周年献礼的目标提供了坚实的保障。电建集团党委印发通知,在集团范围内通报表扬。

(水电七局 供稿)