

周期荷载下岩石大型三轴试件的 变形和强度特性研究

葛 修 润

提 要

本文介绍了作者在联邦德国卡尔斯鲁厄大学土岩力学研究所利用该所研制的大型三轴试验机进行周期荷载下大型三轴试验的情况和结果。岩石为薄层灰岩，试件直径为60cm，高为120cm。

整个研究工作是基于分析不可逆变形的观点来探讨变形和强度特性的。

在周期荷载作用下，不可逆变形的总量随着循环次数的增加而增长；但在不同的应力水平下，不可逆变形的发展趋势具有显著的，甚至是质的差异。应力水平很低时，最初几次的循环荷载将导致产生较大的不可逆变形；随着循环次数之增加，其不可逆变形的增长率逐步衰减，最终趋向于一个比较稳定的常值。但是当应力水平达到某一“门槛”值后，情景则迥然不同；循环次数之增加将促使不可逆变形的加速增长，最终导致整个试件的破坏。试验结果表明，这一特征应力值略低于常规三轴试验中的所谓“屈服值”。研究结果表明，每一个加荷-卸荷循环过程中的不可逆变形主要发生在超过这一“门槛”值后的区段内。研究这样的特征值对于探讨周期荷载作用下岩体的力学性质是十分重要的。

由试验获得的不可逆变形与循环次数的关系曲线在形态上与流变曲线十分相似。也许，这并不是偶然现象。文章建议研究常规试验的强度值、流变试验的长期强度与周期荷载下的强度之间的关系。显然，这对于解决岩体工程问题中的强度取值和安全储备系数等问题具有重要意义。

一、前 言

在岩体工程中，周期荷载对工程建筑物的安全和基岩稳定的影响常常是不可忽视的。大坝坝基由于水库周期性地蓄水和放水而承受着巨大的周期性荷载变化就是一个典型例子。

米勒和本文作者曾经结合日本黑部川第四号拱坝大型原位试验，特别是对于反复加荷-卸荷情况下节理岩体的原位大型三轴试验资料重新作了分析和研究。这种现场三轴试验的试件体积每个达 11m^3 之巨。基于对黑部川拱坝原位三轴试验的重新研究，提出了节理岩体在周期荷载作用下变形性能的一些重要特征和发展规律^[1]。这一研究成果得到了第五届国际岩石力学大会关于“现场勘测和评价”专题总报告的良好评价^[2]。

由于现场原位试验费用十分昂贵，因此要深入地研究周期荷载作用下岩体的力学性质，

除数量有限的必要的原位试验外,开展尺度适宜的室内试验研究也是一条十分重要的途径。

常规的岩石力学室内试验的试件尺寸很小,尺寸效应、地质上的代表性等方面都存在着许多问题,特别是对于薄层和互层岩体,小尺寸试样所得的结果很难反映其总体的力学性质。为此,人们一直力图通过加大试件尺寸,使试件尽可能地代表所研究的岩体,用这样的大试件进行室内试验。

当前,室内大型试验技术得到了发展,特别是在单轴压缩和三轴试验方面。较软弱岩体的室内大型三轴试件的规模已达 0.4m^3 左右,并已发展了相应的取样技术^[3]。采用这样的试验技术使人们有可能对层面或节理面比较发育的岩体开展室内试验,以研究其总体宏观力学性质。

经验告诉我们,为求层面、节理面比较发育的岩体的总体性质,试样中至少要包括5—10个层面或节理面。对于节理或层面的间距为10—20cm的岩体,当前的室内大型三轴试验的规模是能满足这一要求的。在很多场合,这种大型的室内试验已有可能补充或部分替代昂贵的大型原位试验。值得指出的是,这种大型室内试验有其突出的优点,如边界条件容易控制,应力途径方式多样化,变形、压力等方面都可作更精确的量测。

作者采用室内大型试验技术对薄层灰岩大型试件进行了三轴试验。基于实验结果对一些现象进行了分析和研究,提出了相应的看法和解释,以及今后值得注意的研究方向。此项室内大型三轴试验研究是在联邦德国卡尔斯鲁厄大学土岩力学研究所进行的。在西德期间的研究工作曾得到该所的负责人O.Natau教授的帮助。此项研究工作由本文作者主持,并与该所的Th.Mutschler工程师(Dipl. Eng.)密切合作,于1982年12月到1983年初共同完成。

多年来卡尔斯鲁厄大学土岩力学所曾进行过数以百计的室内大型三轴试验,也已开展了卓有成效的“单块法”试验以便从单个试件推求强度包线^[3]。但是用这套装置对大型三轴试件(体积达 0.34m^3)开展在周期荷载作用下力学性能的实验研究可能还属首次。

二、试验装置和试件尺寸

室内大型三轴试验装置见图1。试件最大直径为60cm,最大高度为170cm。

该装置的轴向加荷能力 6.4MN ,轴向荷载用三只 2.5MN 的Glötzl型荷重传感器测定。三轴室最大围压为 $\sigma_2 = \sigma_3 = 2.0\text{MPa}$,用水作为传递围压的介质。此设备要是采用棱柱形试件,配以附加的一对加荷板亦可开展真三轴试验。

在本次试验中我们采用圆柱形试件,其直径为60cm,高为120cm。岩石为薄层灰岩,相当软弱,层厚从数毫米到数厘米不等。试样共两个,系专用的取样钻机在现场钻取后立即放入特制的钢皮保护壳内并灌以石膏密封后运回试验室。试验时拆去保护壳,去除石膏层并用特制的橡皮套封闭

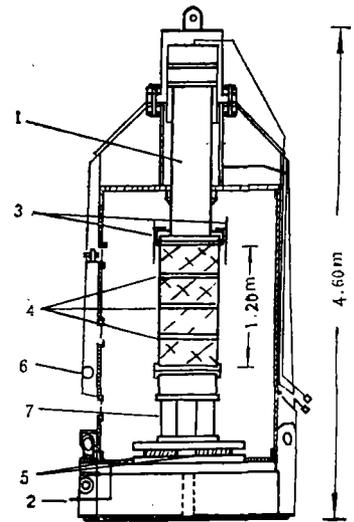


图1 大型三轴试验装置示意图

1. 轴向荷载(最大出力 6.4MN);
2. 围压(最大为 $2.2\text{MN}/\text{m}^2$);
3. 轴向变形量测; 4. 环向变形量测;
5. 轴向荷载量测; 6. 围压量测; 7. 高度适配器。

以防止三轴室内的压力水进入试件。

设轴向变形量尺两根，并在试件的上、中、下部位各设置环向变形量尺一条。轴向变形和环向变形的量测都是通过三轴室的观测窗由人工测读的。

取样方法、试件安装及变形量测方法等详见参考文献[3]。

三、关于试验方式

兹以编号 *ESP2* 的试样为例对试验过程作一简要介绍。

周期荷载试验是分阶段进行的。

第 I 阶段的围压为： $\sigma_2 = \sigma_3 = 0.4\text{MPa}$ ，并保持不变。 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的值在 $0 - 3.41\text{MPa}$ 间变化。 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 自零逐步增加到 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} = 3.41\text{MPa}$ ，并维持一段稳定时间后逐步卸荷到 $(\sigma_1 - \sigma_3) = 0$ 。阶段 I 共进行了 60 次加荷-卸荷循环，这期间的围压一直保持恒定。每次加荷-卸荷循环历时约 5 分钟。

对每一次加荷-卸荷循环都记录其最大轴向变形量及卸荷后的残余变形量，并同时记录相应的环向变形量。

当循环次数 $n = 1, 3, 5, 10, 20, 40, 60$ 时，在加荷段及卸荷段各增加记录中间点 4 个，测量项目包括轴向荷载，轴向变形和环向变形。

第 I 阶段的 60 次加荷-卸荷循环进行完毕后试体是完好的。紧接着开展在常规荷载情况下的三轴试验。为了能通过一个试件的试验取得强度值，我们采用“单块法”试验方式。共用了三种围压： $\sigma_3 = 0.4, 0.8$ 和 1.6MPa ，相应于“破坏点”的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的试验值分别为 $5.6, 6.96$ 和 10.04MPa 。对上述试验结果依照库仑强度准则加以整理。为了更直观和方便，作了如下处理：

引入由下式定义的平均应力 σ_m 和最大剪应力 τ_m 。

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3), \tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (1)$$

在 σ_m 和 τ_m 平面内，*ESP2* 的“单块法”试验结果如图 2 所示。由图可见线性关系十分良好，直线的倾角 $\theta = 32.8^\circ$ ，它在 τ_m 轴上的截距为 $b = 0.75\text{MPa}$ 。内摩擦角 φ 和粘结力 c 可按下式求得：

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \sin^{-1} \tan \theta \\ c &= \frac{b}{\cos \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

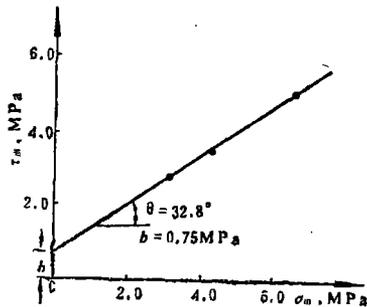


图 2 大型三轴试件 *ESP2* 的强度包线 ($\sigma_m - \tau_m$ 空间)

将 θ 和 b 值代入后得： $\varphi = 40.1^\circ$ ， $c = 0.98\text{MPa}$ 。

对 *ESP2* 试件作完“单块法”试验后再次进行周期荷载试验。

第 II 阶段周期荷载试验的 $\sigma_3 = 0.4\text{MPa}$ ， $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} = 3.41\text{MPa}$ ，这就是说阶段 II 的 σ_3 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 与阶段 I 的相同。阶段 II 共进行 40 次加荷-卸荷循环，试验后仍无明显的破坏征兆。

于是接着进行第Ⅲ阶段的周期荷载试验。此阶段的 σ_3 仍为0.4MPa,但剪切应力水平增加到 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} = 4.01\text{MPa}$ 。第Ⅲ阶段也进行了40次加荷-卸荷循环。阶段Ⅲ的不可逆变形的累积量明显地大于阶段Ⅱ的,但整个试体仍未破坏。

于是接着进行第Ⅳ阶段的周期荷载试验。 σ_3 还是0.4MPa,但 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 增加到4.41MPa。加荷-卸荷循环一开始就出现了明显的破坏征兆,除了轴向变形增长很快外,环向变形更是急剧增长。当循环达到10次时,试件已完全破坏,加荷已无法进行。

ESP2试件主应力差值与轴向变形量、循环次数的关系见图3。

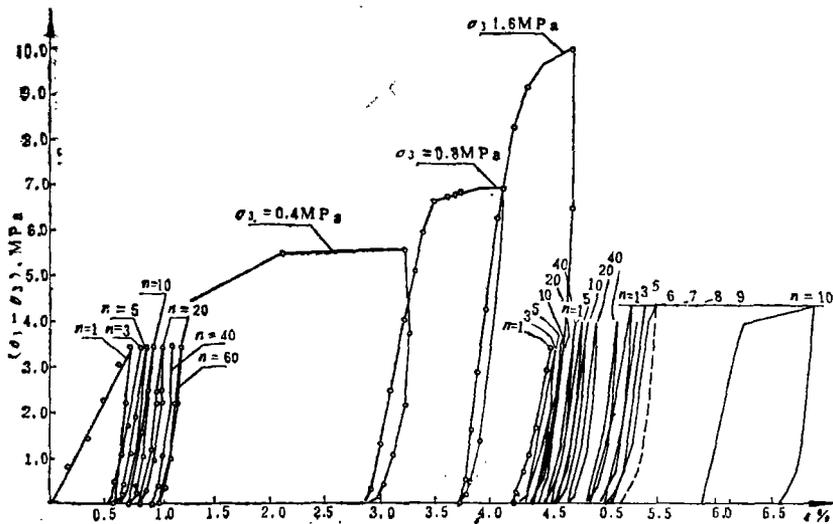


图3 ESP2试件的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 和轴向应变的关系曲线

另一大型三轴试件的岩性与ESP2相似。

对该试件首先进行常规试验,取 $\sigma_3 = 1.0\text{MPa}$,当 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 达到11.01MPa时,试件呈现“屈服”征兆后即停止试验,并将 σ_1 值降到1.0MPa。

接着在 $\sigma_3 = 1.0\text{MPa}$ 的情况下进行周期加荷-卸荷试验,共分四个阶段进行。每个阶段的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 分别取11.01MPa的65%, 80%, 85%和90%左右。也就是说阶段Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ和Ⅳ的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 值分别等于7.17, 8.87, 9.34和9.89MPa。阶段Ⅰ和阶段Ⅱ的循环次数各为20次,阶段Ⅲ为30次,而阶段Ⅳ仅进行了四次加荷-卸荷循环后试件就完全破坏了。

四、试验结果与讨论

岩体变形的弹性部分在卸荷过程中将会得到恢复,但不可逆变形将残留下来。每次加荷-卸荷循环导致的不可逆变形量的大小、增长趋势以及总的累积量等在本质上乃是度量岩体力学性能的重要标志之一。不可逆变形量随着循环次数的增加而呈现出的急剧增长趋势,正是试件濒临破坏的重要征兆。以下的讨论是基于对不可逆变形的分析及与循环次数及应力水平的关系作出的。

(一) 当应力水平较低时岩体不可逆变形随循环次数增加的发展趋势

ESP2试件的第 I 和第 II 阶段周期荷载试验的围压是相同的，而采用的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 值约为在相同围压下试件发生屈服时的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 值的75%左右。可以认为这两阶段的应力水平较低。这两个阶段的轴向应变的不可逆部分 $\epsilon_{i,rr}$ 与周期荷载循环次数 n 的关系见图4。分析它们的关系得出如下看法：

1. 第 I 阶段的第一次加荷-卸荷循环，因是整个试验过程中的第一次周期荷载，故不可逆变形量很大，达0.5%。经历第一阶段60次周期荷载与单块法试验后进行的第二阶段周期荷载，虽然围压和加载的应力水平与阶段 I 的相同，但第二阶段的第一次加荷-卸荷循环的不可逆变形量仅为0.07%。由此可见，历史上已积累的不可逆变形量及初始压密状态对后期周期荷载阶段中的初始几次循环的不可逆变形量有影响。

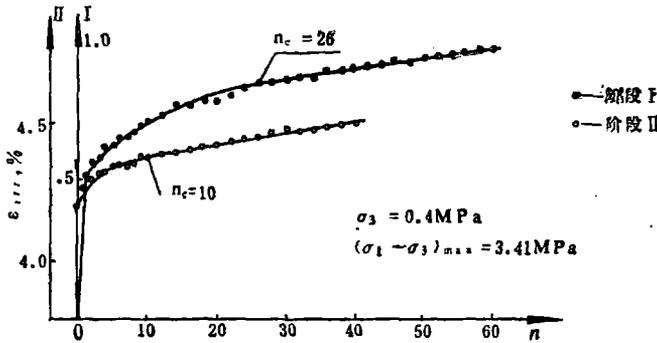


图 4 ESP2 试件第 I, II 阶段周期荷载的不可逆变形量和循环次数的关系

2. 应力水平不高时，每一加荷-卸荷循环的不可逆变形量将随着循环次数的增长而减小。从图 4 可以看出，经过临界循环次数 n_0 之后，每一加荷-卸荷循环的不可逆变形量将趋向一个稳定值（或者呈现缓慢的衰减趋势），而且其绝对量值也很小。就 ESP2 试件的第一阶段周期荷载的60次循环而言， n_0 大致为26, 过此循环数后的每次循环的不可逆变形量 $\Delta\epsilon_{i,rr} = 0.004\%$ 。对于第 II 阶段周期荷载， $n_0 = 10$ 左右， $\Delta\epsilon_{i,rr}$ 亦为0.004%。

3. 一些大坝坝基观测资料也显示出经过数年或十余年的周期蓄水-放水后，坝基岩体的变形趋向于稳定，每一蓄放水循环周期所导致的不可逆变形量趋向于一个稳定值，且量值很小。图 5 是根据日本黑部川四号拱坝坝基变形的实际观测曲线整理出来的。坝基岩体的变形发展规律与前述的试验结果是相吻合的。如果某一大坝的岩基变形观测值经过多年的蓄水-放水循环后未见有衰减，或者甚至于出现加剧的趋势时，那就意味着坝基岩体内出现了严重的不正常工作状态，需予以高度重视，认真查清原因和采取相应措施。

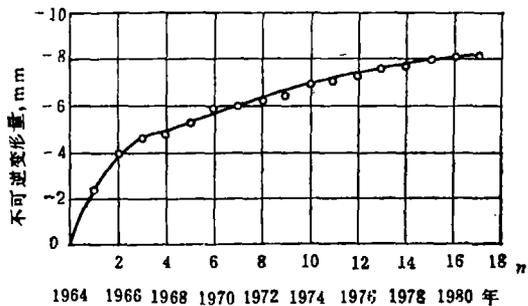


图5 根据日本黑部川 4 号拱坝左岸1320高程第 2-14号基岩变形计实测资料整理的不可逆变形量与周期荷载次数的关系

4. 在我们的试验研究中有意识地将“单块法”试验安排在第 I 阶段和第 II 阶段周期荷载试验之间，并且对这两个阶段的周期荷载试验采用相同的围压和应力水平。由于“单块法”

试验并不是破坏性试验,经过这样试验后的试件可以认为其内部受到很大损伤,但并未解体和破坏。对比第 I 阶段和第 II 阶段的试验结果可以看出,即使受到损伤的岩体,只要未解体、崩溃,若限制其应力水平,则仍然有可能正常地承受周期荷载。

(二) 应力水平对不可逆变形的影响

1. *ESP2* 试件的第 II、III、IV 阶段周期荷载试验的结果如图 6 所示。这三个阶段采用相同的围压,即 $\sigma_3 = 0.4\text{MPa}$,但代表剪切应力水平的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 分别为 3.41、4.01 和 4.40 MPa。剪切应力水平不同,这三个阶段的不可逆变形量与循环次数的关系曲线亦很不相同。对于第 II 阶段,如前所述,当 $n > 10$ 后,曲线的斜率基本上为常值(每次循环的不可逆变形量仅为 0.004%)。对于第 III 阶段,剪切应力水平增加,而每次加荷-卸荷循环所引起的不可逆变形量也有很大的增加,每一循环达到了 0.009%,但随着 n 的增加仍能维持常值。第 IV 阶段,剪切应力水平增加到 4.40 MPa,由于其量值已与“单块法”试验时的屈服值十分接近,所以第 IV 阶段的 $\Delta\varepsilon_{i,r,r} - n$ 关系曲线出现了质的变化。在 $n = 1-4$ 次循环时尚呈现出每一循环的不可逆变形量随循环次数略有衰减的征兆,不过此时的 $\Delta\varepsilon_{i,r,r}$,每一循环约为 0.05%,此值为第 II 阶段稳定值的 12 倍,为第 III 阶段的 5.5 倍。但第 5 次循环以后,随着次数的增加,不可逆变形则急剧发展。到第 9 次时,此值已剧增到每一循环为 0.34%,最终导致试件的彻底破坏。

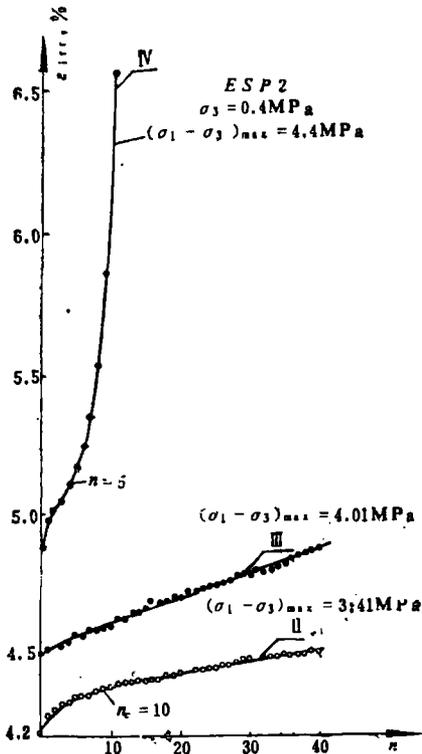


图 6 *ESP2* 试件不可逆变形与应力水平的关系

2. 分析实验结果后我们认为可能存在一种阈值。当应力水平低于此值时,不可逆变形量不会随着循环次数的增加而加速增长,当应力水平高于此阈值后情景就迥然不同,循环次数的增长将促使不可逆变形的加速

增长,最终导致试件的破坏。这一特征应力值——阈值——低于常规三轴试验中的所谓屈服值。

3. 从图 6 所示的不可逆变形量与循环次数曲线的形态来看,它们与岩石的流变曲线十分相似。*ESP2* 试件的第 IV 阶段周期荷载试验曲线与典型的岩石流变曲线的第 III 阶段即加速流变阶段的曲线相似。而 *ESP2* 试件的第 II、III 阶段的曲线则与岩石流变曲线的等速流变阶段相类似。*ESP1* 号试件的不可逆变形总量与各阶段循环次数的累计量的关系曲线见图 7。图中标明了对应的剪切应力水平。这些实验曲线与流变曲线的相似性也许并非偶然。如果将循环次数的增长在某种含义上视为“时间增加”,那么前述的两类曲线有类似之处是可以理解的。当然,在周期性加荷-卸荷情况下所得到的强度,实质上是代表了一种疲劳强度。这种疲劳强度与静态的长期强度之间有什么联系?这两种强度之间的接近程度如何?是否可能利用比较快速的反复加荷-卸荷试验所得到的强度值去估算试验周期很长的静态的长期强度?

这些问题尚有待进一步去探索。

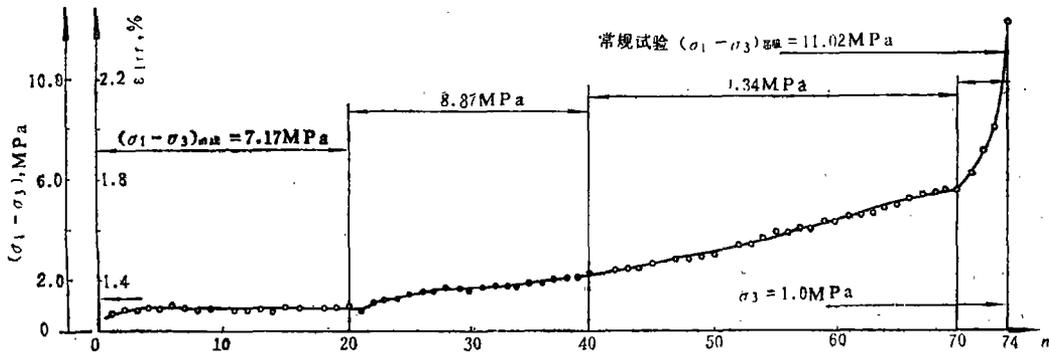


图7 ESP1试件不可逆轴向应变与循环次数的关系曲线

(三) 关于环向变形问题

当剪切应力水平很低时环向变形量是很小的,甚至可忽略不计;当剪切应力水平很高,并接近破坏时,环向变形量很大,并且试件的上、中、下各部位的环向变形量也很不相同,它们与破坏发生在试件的哪个部位有关。根据试验中实测的环向变形量和轴向变形量可以求出相应的泊松系数。剪切应力水平低时,泊松系数值非常小,而剪切应力接近破坏值时,泊松系数突然增大,达到甚至超过0.5。对于岩体说来泊松系数也许并不是一个常值,特别是对于节理或层面发育的岩体更是如此。在试验或工程监控中,注意观察泊松系数随着荷载之增加而变动的情况,特别是急剧增长的情况作为岩体临近破坏的重要征兆是值得重视的。

(四) 加荷-卸荷循环的变形发展规律

每次加荷-卸荷循环的应力和应变曲线见图3。ESP2试件第I阶段周期荷载试验中的第一次循环的滞后环很大,随循环次数增加,滞后环逐步缩小。上述的是剪切应力水平较低的情况。当剪切应力水平很高时,情况就完全不同。ESP2试件的第IV阶段周期荷载试验的剪切应力水平已接近破坏值,因此随着循环次数的增加,滞后环越来越大。值得注意的是,即使在第IV阶段,滞后环很大的情况下,当加荷时剪切应力水平($\sigma_1 - \sigma_3$)未达到4.0MPa时,应力与应变仍然具有良好的线性关系,且其斜率与第I、II、III阶段的斜率基本相同,但当($\sigma_1 - \sigma_3$)值超过4.0MPa后,斜率明显变缓。对于第IV阶段的第一次加荷-卸荷循环, ($\sigma_1 - \sigma_3$)从4.0增加到4.4MPa时的轴向应变增加量为0.02%左右,但随着循环次数的增加,相应于($\sigma_1 - \sigma_3$)为4.0—4.4MPa区段的轴向应变急剧增加,当 $n = 10$ 时,此值已增到0.6%左右。整个试件的不可逆变形的主要部分发生在当($\sigma_1 - \sigma_3$)由4.0增加到4.4MPa这一很小的应力区间内。巨大的滞后环也是由于在此应力区间内试件产生很大的不可逆变形而形成的。这一现象有力地表明了存在有一个阈值。对于周期荷载而言,过此阈值后不可逆变形将急剧增长,并导致破坏。因此,当岩体处于周期荷载作用时要十分重视所谓的屈服征兆,并应该作为临界状态来控制,以避免岩体在周期荷载下发生破坏。

(五) 关于周期荷载作用下的强度问题

ESP2试件在周期荷载作用下,当 $\sigma_3 = 0.4\text{MPa}$ 时的极限强度($\sigma_1 - \sigma_3$)约在4.0—4.4MPa之间。

ESP1试件在周期荷载作用下,当 $\sigma_3 = 1.0\text{MPa}$ 时的极限强度($\sigma_1 - \sigma_3$)约在9.34—9.89MPa之间。

如果以试件的常规静荷载试验中的屈服强度作为对比标准,则上述两个试件所得的周期荷载作用下的强度值〔用($\sigma_1 - \sigma_3$)来表示〕约为静载的屈服强度值($\sigma_1 - \sigma_3$)的85—90%左右。

从周期荷载试验结果来看,我们认为进一步探讨常规试验所得的强度、流变试验所得的长期强度和周期荷载作用下所取得的强度之间的关系是很有意义的。试验结果表明周期荷载下的门槛值和流变试验的长期强度值都与常规试验中的屈服值有着密切的关联,并略低于它。因此对于服务年限很长,或作用有周期荷载的许多岩体工程中的岩体强度的取值问题应考虑以常规的“屈服”强度为基准并加以适当的安全储备。

参 考 文 献

- [1] Müller-Salzburg, Leopold and Ge Xiurun, Untersuchungen Zum Mechanischen Verhalten Geklüfteten Gebirges Unter Wechsellasten, Proceedings of the 5th Congress of the Int. Society for Rock Mechanics (ISRM), 1983, Melbourne, Australia.
- [2] Stapledon, H. and Rissler, P., General Report, Theme A—Site Exploration and Evaluation, Proceedings of the 5th Congress of the ISRM, 1983, Melbourne, Australia.
- [3] Natau, O.P., Fröhlich, B.O. and Mutschler, Th.O., Recent Developments of the Large-scale Triaxial Test, Proceedings of the 5th Congress of the ISRM 1983, Melbourne, Australia.

Study on Deformation and Strength Behaviour of the Large-sized Triaxial Rock Samples under Cyclic Loading

Ge Xiurun

Abstract

When in Institute of Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe University, Federal Germany, the author of this paper performed some cyclic loading tests on the large-sized triaxial testing machine developed in this institute. The rock sample used were 60cm in diameter and 120cm in height. The work mainly included the study of deformation and strength behaviour of the samples and was based on the viewpoint of analyzing the irreversible deformation.

Under cyclic loading, although the irreversible deformation generally increased with the number of cycles, the deformation trends obtained at various stress levels distinctly differed from each other. At low stress levels a comparatively large irreversible deformation arose from the first few cycles of loading. With the increase of the number of cycles, its growth decayed gradually and tended finally to a stable constant value. When the stress level reached a certain "threshold" value, the situation became entirely different. The increase of the number of cycles caused an accelerated growth of the irreversible deformation till a complete failure of the whole sample.

The test results also illustrated that this characteristic stress value was slightly lower than the so-called "yield" value in conventional triaxial tests, and that within each loading-unloading cycle, the irreversible deformation mainly occurred in the section where the stresses were over this "threshold" value. The study of such a characteristic value is of great importance for understanding the mechanical properties of rock masses under cyclic loading.

The experimental curves of irreversible deformation vs. the number of cycles show a remarkable resemblance to corresponding rheological curves, which, perhaps, may not be accidental.

It is proposed in this paper that the relation of the strength obtained in conventional tests, the long-term strength in rheological tests and the strength under cyclic loading should be studied. Undoubtedly, it is significant for evaluating the strength and safety factor in rock engineering problems.