

地下工程岩石力学本构试验的失真过程

Distortion course of rock mechanics constitutive experiment in underground engineering

汤 雷, 洪晓林

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘 要: 本构试验是岩石力学的基础, 本构试验失真就会导致岩石力学的分析和计算失效。目前地下工程围岩的分析计算与实际的差异较为显著, 本文通过机理分析, 阐述了本构试验失真的原因, 通过“散开”和“挤出”试验, 图示了失真的过程, 最后依据试验数据分别计算了岩性参数, 说明了两者的显著差异。

关键词: 本构试验; 失真; 峰值阶段; 峰后阶段

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)03-0335-05

作者简介: 汤雷 (1972-), 男, 博士, 南京水利科学研究院高级工程师, 主要从事水工结构工程和岩土工程研究。

TANG Lei, HONG Xiao-lin

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Constitutive experiment is fundamental to rock mechanics. The analysis and calculation will be wrong if the constitutive experiment is distorted. The difference between calculated and measured results is obvious in underground engineering. Based on the analysis of mechanism and experiments, the reason of distortion is presented, and the distortion course is shown with pictures. Mechanical parameters are calculated, and it has proved that the constitutive experiment is distorted.

Key words: constitutive experiment; distortion; peaking phase; post-peaking phase

0 岩石力学本构试验失真的研究意义*

二滩水电站地下厂房开挖完成后, 上下游边墙位移量数值计算值 $0.2 \sim 4.3 \text{ mm}^{[1]}$, 实测值 $31.6 \sim 80.0 \text{ mm}^{[2]}$; 定量上分析, 定性上使用, 在许多情况下定性上使用都办不到^[3]。随着岩体工程由低应力弹性阶段发展到高应力和峰后的非线性阶段, 岩石力学理论已经落后于工程实践的发展了。

工程实际与理论分析的差异被归因于两个方面, 一是岩性参数不准确, 二是本构模型不适合。关于岩性参数, 近年来主要从以下三方面着手解决, 其一, 大型工程采用现场岩体力学试验来确定参数。但一般只能取得峰前参数, 并且耗费巨大; 其二, 研究岩体参数的尺寸效应。但发现尺寸效应十分复杂^[4], 难以用来将岩石参数演算出岩体参数; 其三, 采用参数反分析理论, 在其基础上发展出了参数随机反分析^[5]和基于神经网络的智能反分析方法^[6], 岩体参数的确定获得了重要进展。但反分析理论的根本问题——解的唯一性问题仍然没有解决。关于本构模型, 一直是岩土力学的核心, 岩体显著的峰后应变软化特性成为各种模型难以模拟的难题。塑性模型解决不了峰后屈服面缩小而塑性应变增大的矛盾; 断裂力学模型只能模拟少数或规则缺陷的岩体; 损伤力学模型难以合理确定岩体的损伤参量^[3]。上述各方面的研究均促进了岩石

力学的发展, 但问题的解决可能还需要其它实质性原因的发现和研究。

科学研究的根本方法是分析和归纳, 分析具体、归纳规律适用于全体。具体到岩石力学主要是开展和分析岩石力学试验、归纳和抽象本构关系和岩性参数 (二者实质统一)、运用到岩体工程。该根本方法隐藏了一条假设, 即目前常用的主要岩石力学试验中确实蕴含着与岩体工程相同的规律。在低应力阶段该假设是成立的, 但在高应力和峰后的非线性阶段该假设是否成立, 即岩石力学本构试验是否会失真, 其具体过程如何, 可能就是需要探究的实质性原因之一。

1 岩石力学本构试验的研究现状

岩土力学是在金属材料力学的基础上发展起来的, 岩石力学试验也是在材料力学试验的基础上改进和发展的。在 1966 年前, 一直存在着一种矛盾, 就是实验室岩石试件是突然破坏, 而现场连续性岩体是逐渐破坏, 而且在现场即使当荷载已经明显高于岩体的极限抗压强度时, 破坏也是如此。1966 和 1969 年刚性和伺服试验机的出现, 是岩石力学试验技术的一项重大进步, 它使得岩石重要的峰后软化特性得以显

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50109002)

收稿日期: 2003-05-20

现^[7,8]。1993 年我国研制成功的 RMT-64 岩石力学试验系统在动态性能和功能方面较国外产品又有了重要的提高^[9]。1998 年肯塔基大学教授 K. F. 昂鲁格等研制成功可直接在原岩体上测得岩石强度的钻孔贯入度仪^[10]。在岩石力学试验理论方面主要是研究试块与试验机的相互作用关系,这其中具有重要贡献的有:Whitney 1943 年第一次解释了试验机刚度对试块破坏的影响,Hudson 1972 年提出试验系统稳定的条件为 $K_m > K_s^{[11]}$,1992 年葛修润提出新的岩石全过程曲线的分类是我国对岩石试验理论的重要贡献^[12]。

遗憾的是没有有关岩石力学本构试验是否会失真问题的研究,在应力峰值和峰后阶段常规本构试验的结果与工程岩体实际越去越远,上文中指出的被隐藏的假设,在毫无证明的情况下,实际上一一直被接受。这是一个根本性的问题,在当今岩石力学发展很困难的时期,更加具有重大的研究价值。

2 岩石力学本构试验失真的机理分析

岩石力学本构试验是指以获取力学参数和本构关系为目标的岩石力学试验,它是解析计算和数值模拟的输入,是岩石力学理论分析的基础,也是开展最普遍最重要的岩石力学试验。目前的岩石力学本构试验是以单轴压缩试验为主(常规三轴压缩试验可认为是增量单轴压缩试验),在低应力阶段,试块和工程岩体均处于弹性阶段(固有裂隙为岩体稳定性主要影响因素的情况是岩石力学另一重要研究方向,在此不予考虑),应力和应变在二者内部的扩散和传递是本质相似的,因此试验结果(应力应变关系、弹性模量、泊松比等)可以运用到岩体工程中去。在高应力和峰后阶段,单轴压缩试块是出现一条或几条大的破坏面,并逐渐贯穿试块,试块是被迫散开;地下工程的岩体一般是发生平行于自由面的破坏,越近自由面,破坏面越密,自由面的位移量逐渐增大,岩体是被迫从自由面挤出。考察应力和应变,单轴压缩试块的应变逐步地、几乎完全地集中于少数的破坏带,应力也在破坏带处消散;地下工程岩体的应变先在近自由面处集中,该处出现破坏,应变又在略深处集中,应力和应变的集中点是逐渐地由浅入深发展。以压缩模量 E 为例,单轴压缩试验获得的是试块被迫散开过程中表现出来的 E ,而地下工程需要的是岩体从自由面挤出过程中表现出来的 E' 。任凭试验技术和数据处理再好,也无法从 E 中获得真正的 E' 。试验和地下工程围岩的力学过程出现了本质的不同,从试验中提取岩体工程可用的规律便无法实现,即本构试验失真。

岩性参数和本构关系一般是通过本构试验确定的。随着从峰前、峰值到峰后阶段,本构试验与地下工程围岩的力学过程越去越远,所获得的岩性参数和本构关系应用到工程实际中就会出现较大的偏差,在地下工程中,尤其是高地应力或者是软岩工程中,围岩不可避免地要进入峰后区,试验与工程的差别就会表现得更为明显。

3 失真过程

失真是指岩石力学本构试验不能反映工程实际情况,所谓“真”即指工程实际。根据上文对失真机理的论述,作者分别设计开展了使试块“散开”和使试块“挤出”的力学试验,“散开”试验即为单轴压缩试验,是岩石力学测定岩性参数和本构关系的常规试验,“挤出”试验是平面和半平面应变压缩试验,其试验原理如图 1 所示,阴影平面表示平面应变试验台的一对侧壁,具有极大的变形刚度,保持基本不变形。试块放在两侧壁之间,与侧壁密贴。 Z 方向为加载方向, Y 方向为试块的变形方向。半平面应变是指变形的方向只能为 Y^+ 或 Y^- 。两种试验试块的材料是相同的。地下工程的围岩大多处于平面和半平面应变状态,因此“挤出”试验可用来表示地下工程围岩的力学过程。在峰前阶段,一般不会发生失真。失真的过程主要发生在峰值和峰后阶段。

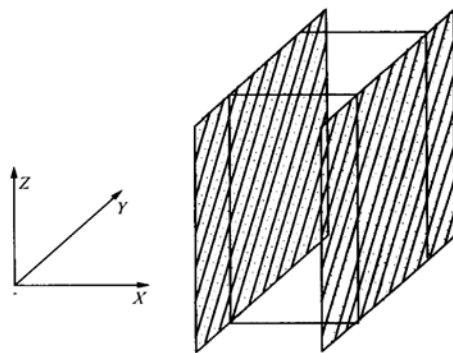


图1 “挤出”试验装置示意图

Fig. 1 Equipment of “squeezing” experiment

3.1 “散开”试验

试验采用的是石膏、水泥、沙子和水的相似材料试块,试块的形状为长方体,在压力机上获得了全过程曲线。在进行的约30个试块的单轴压缩试验中,归纳出其典型的破坏形式如图2中的4幅照片所示。文献[13]研究了40多个岩样的伺服试验机上的全过程压缩试验结果,归纳出典型破坏形式如图2中的4幅线条图所示。对比分析发现两者特点基本是一致的,有一点区别是线条图中表示的张拉裂纹较明显,照片实

际上也有张拉裂纹,但不明显。无论是照片还是线条图,存在共同的根本特点是有一个明显的剪切破坏面贯穿试块,它是试块丧失承载能力的根本原因。

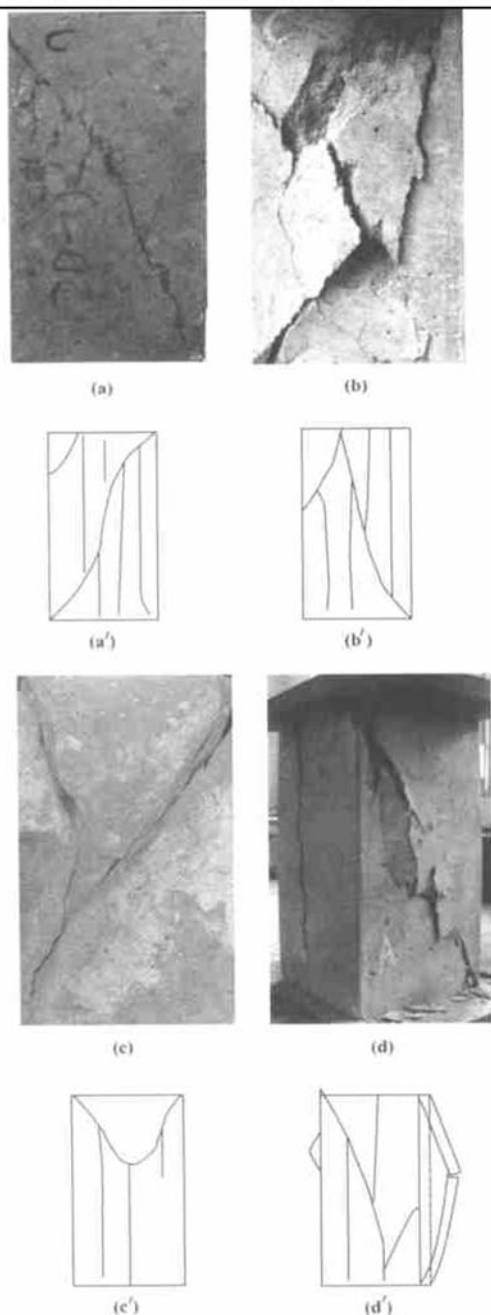


图2 “散开”试验试块破坏特征

Fig. 2 Failure characteristics of specimen in “dispersing” experiment

通过对约30个“散开”试验试块裂缝发展过程的观察,将其划分为起裂阶段、扩展阶段、发散阶段和连通阶段。裂缝的发展并不是一定按照图3的次序进展,其中的扩展阶段和发散阶段往往是交替进行的。随着发展阶段和扩散阶段的不同,最终的破坏形式可以归结为图2中所示的任一种。但是裂缝的发展一般

有一个核心,就是主剪切裂缝的扩展和贯穿。一旦主剪切裂缝贯穿,试块的承载力就会大幅度降低或者试块散开。

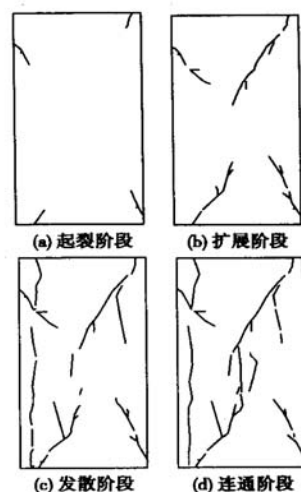


图3 “散开”试验试块裂缝的发展过程

Fig. 3 Cracking of specimen in “dispersing” experiment

3.2 “挤出”试验

图4(a)是Z方向的俯视照片,(a')是X方向的正视线条图。图4表示了“挤出”试验试块典型的破坏特征,即由浅部向深部逐个地产生基本平行于自由面的裂面,而不产生倾斜的、贯穿试块的剪切破坏面,试块也不存在主裂面。

通过对约30个“挤出”试验试块裂缝发展过程的观察,将其划分为起裂阶段、扩展和发散阶段、连通阶段和向深部发展阶段,如图5所示。与“散开”试验不同的是:①裂缝的发散不仅有原裂缝上长出分叉裂缝,更主要的是表现为新的裂缝产生和扩展;②裂缝的连通并不意味着试块承载力会大幅度下降或丧失;③向深部发展阶段是“挤出”试验区别于“散开”试验最显著的过程特点,“散开”试验没有这一阶段。

3.3 失真过程分析

岩性参数和本构关系是材料的物质属性,是指岩体中某一点的应变对应力变化的响应,只要材料不发生变化,该性质也应不发生变化。岩石力学本构试验的试块是从岩体中取出的,显然与岩体是同一种材料,为何本构试验会失真呢?其原因在于峰值和峰后阶段裂缝的产生和发展。本构关系是定义在岩体中的质点,在均质各向同性假设下,本构关系便可适应于整个岩体,当然也适应于被取出做试验的试块。又因为质点的应力应变无法测定,试验中便以荷载和变形的测值代替。当出现裂缝以后,荷载和位移关系中不仅包含材料的应力应变关系,而且也包含了裂缝的张开与错动。应力应变关系是材料的物质属性,试块与围岩

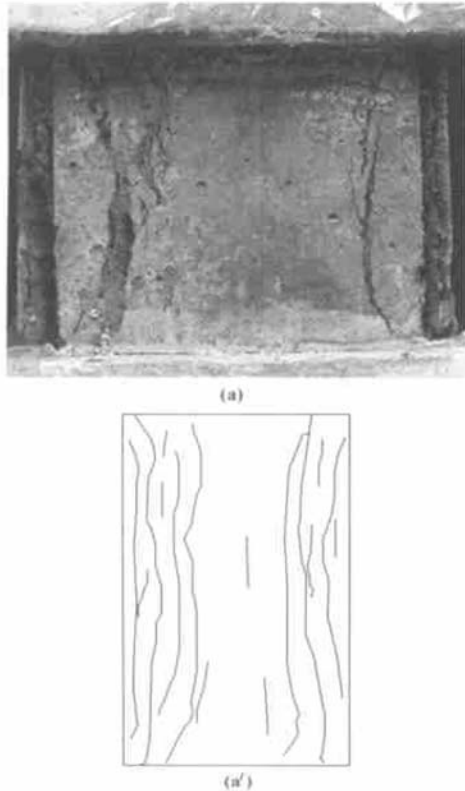


图4 “挤出”试验试块破坏特征

Fig. 4 Failure characteristics of specimen in "squeezing" experiment

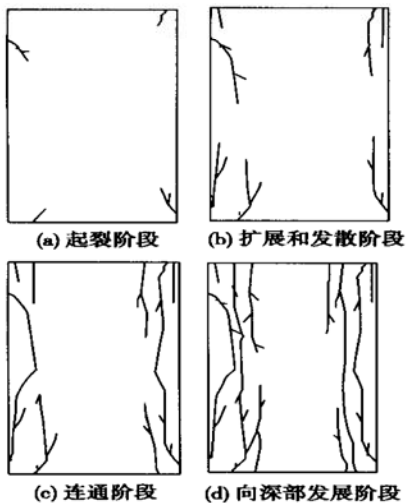


图5 “挤出”试验试块裂缝的发展过程

Fig. 5 Cracking of specimen in "squeezing" experiment

是一致的,但是由于试块与围岩的裂缝状况不同,随着裂缝的发育与发展,两者的荷载和位移关系就会相差得越来越远。岩性参数和本构关系是依据荷载位移关系确定的,因此本构试验失真的根本原因在于裂缝的不同。对比“散开”试验和“挤出”试验:

(1) 失真从起裂阶段开始的,但这一阶段失真

并不明显,除了两者的起裂具有相似性以外,裂缝造成的荷载和位移的变化在总荷载和位移中所占的比例较小;

(2) 在经历扩展、发散和连通等阶段的过程中,裂缝造成的荷载和位移的变化在总荷载和位移中所占的比例越来越大,并逐渐成为其主要部分,则失真也越来越明显;

(3) 最终“散开”试块的裂缝少而疏,有一个主裂缝,“挤出”试块的裂缝多而密,没有主裂面,两者相差悬殊,失真也达到最大。

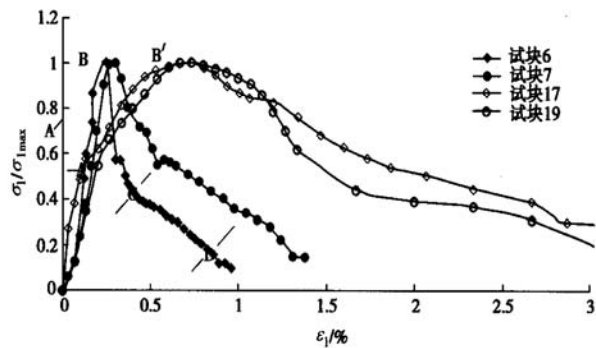


图6 “散开”和“挤出”试验的荷载位移曲线

Fig. 6 Loads-displacement curve of "dispersing" and "squeezing" experiment

图6为典型的单轴压缩和平面应变压缩的荷载位移曲线,试块6和7为单轴压缩,试块17和19为平面应变压缩。在图6中可将各阶段划分为:AB为起裂阶段,BC为扩展和发散阶段,CD为连通阶段;A'B'为起裂阶段,B'C'为扩展、发散和连通阶段,C'D'为向深部发展阶段。

假设微小增量范围内荷载位移关系是线性的,分别依据“散开”试验和“挤出”试验测得的 σ_1 、 ϵ_1 和 ϵ_3 (计9个试块的数据,包括图6中4个试块),计算峰前的压缩模量 E 和峰后弱化模量 Y (单位塑性应变增量 ϵ_p 所引起的岩样承载力的降低)。在 $\sigma_1/\sigma_{1max} = 0 \sim 0.5$ 区域,两者峰前压缩模量 E 值约在0.5~2.0 GPa范围内,平均值约为1.0 GPa;在 $\sigma_1/\sigma_{1max} = 0.5 \sim 0.8$ 区域,单轴压缩试块的 E 值仍在0.5~2.0 GPa范围内,平均值约为1.1 GPa,但平面应变试块的 E 值有所降低,其平均值只有0.3 GPa;在峰后的 $\sigma_1/\sigma_{1max} = 0.8 \sim 0.2$ 区域,单轴压缩试块的 Y 值在0.0~0.4 GPa范围内,平均值约为0.15 GPa;平面应变试块的 Y 值在0.0~0.06 GPa范围内,平均值约为0.025 GPa,两者出现了十分显著的差异。

4 结 论

(1) 本构关系(岩性参数)是指材料中质点的应变对应力变化的响应,是材料的物质属性。但本构试验测得的是荷载位移关系,在峰前的弹性阶段可以用来分析计算地下工程围岩的本构关系,在峰值和峰后阶段由于裂缝的影响,本构试验会逐渐失真。

(2) 失真是从起裂阶段开始,随着裂缝的扩展、发散和连通,失真越来越明显。

(3) 目前本构试验常用的“散开”试验方式,其破坏的显著特点是有一条主裂面贯穿试块,裂缝少而疏;反映地下工程围岩变形特点的“挤出”试验试块没有主裂面,裂面是不断地向试块内部发展,裂缝多而密。

(4) 依据两种不同试验数据计算的压缩模量和弱化模量在峰值和峰后阶段出现了显著差异,从数量上证明了目前常规本构试验的失真现象的存在及其程度。

参考文献:

- [1] 李协生. 地下水电站建设[M], 北京: 水利水电出版社, 1993. 101- 103.
- [2] 陈仲先, 汤 雷. 高地应力大型地下洞室的位移和锚杆应力特性[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 294- 298.
- [3] 陈子荫. 岩石力学学科中急待解决的若干问题[A]. 朱向荣. 岩土力学与工程的理论与实践[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 25- 29.
- [4] Bazant Z, Chen E P. 结构破坏的尺度律[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 383- 433.
- [5] 刘 杰, 王 媛, 刘 宁. 地下巷道弹性位移反分析中改进的 Gauss- Newton- Marquit 方法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 599- 603.
- [6] 张治强. 岩体力学参数与变形特征的智能识别研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 17(6): 812.
- [7] 郑雨天, 傅冰骏. 国际岩石力学学会试验室和现场试验标准化委员会 岩石力学试验建议方法(上)[M]. 煤炭工业出版社, 1982.
- [8] Fairhurst C E, Hudson J A. 单轴压缩试验测定完整岩石应力- 应变全曲线 ISRM 建议方法草案[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 17(6): 802- 808.
- [9] 葛修润, 周百海. 岩石力学室内实验装置的新进展——RM- 64 岩石力学试验系统[J]. 岩土力学, 1994, (1): 51- 56.
- [10] 昂鲁格 K F, 阿尔蒂泽 D. 岩石试验的新进展(一)[J]. 国外金属矿山, 2001, 26(3): 6- 10.
- [11] 卢应发. 岩石类材料试验系统的一些力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 12(1): 59- 67.
- [12] 葛修润. 关于岩石全过程曲线分类的新见解[A]. 朱向荣. 岩土力学与工程的理论与实践[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 30- 35.
- [13] 尤明庆, 华安增. 岩石试样单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 20(3): 292- 296.

第二届全国非饱和土学术研讨会征文通知(第1号)

由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会主办, 浙江大学岩土工程研究所承办, 长江科学院土工研究所、河海大学岩土工程研究所、南京水利科学研究院岩土工程研究所、中国水利学会岩土工程分会和同济大学土木工程学院地下建筑与工程系共同协办的第二届全国非饱和土学术研讨会拟定于 2005 年 4 月 23~ 24 日在风景秀丽的杭州召开。本次研讨会将为全国非饱和土研究者提供一个切磋交流的机会, 以进一步推动非饱和土的基本特性、基本理论、测试技术、分析

方法及工程实践更快地发展。我们热忱欢迎从事非饱和土及相关领域研究和实践的专家、学者及工程技术人员踊跃投稿。被本研讨会录用的部分优秀论文拟将推荐给《岩土工程学报》以专(增)刊形式发表。来稿请于 2005 年 2 月 1 日前寄到: 杭州玉古路 38 号浙江大学岩土工程研究所詹良通博士, 邮政编码: 310027; 联系电话: 0571- 8792415, 0571- 87995403(H); 传真: 0571- 87952269; 电子信箱: zhanlt@zju.edu.cn。

(南京水利科学研究院岩土工程研究所 供稿)