

单轴压缩下砂岩内部P波速度的变化特征

邵顺妹 李刘玉 周建国

单登龙 高中强 谢原定

(兰州地震研究所)

摘 要

平行或垂直岩石层理进行单轴向加载直至样品破坏强度的95%左右稳压, 在充水或不充水时, 观测到的干燥样品及饱和样品内部P波速度的变化特征如下:

1. 样品临破坏前P波速度在垂直与平行岩石层理方向上的变化具有很大的差异性。

2. P波振幅及波形也随着应力的不断增加而发生变化。

一、实 验 方 法

我们选取细砂岩作实验用的岩石样品, 样品层理清楚, 粒细而均匀, 一般粒度在0.12—0.20毫米之间, 砂粒成分以石英、长石为主, 胶结物主要是钙质, 有少量硅质, 略显重结晶, 有时见有泥质团块, 裂缝中有碳酸盐填充。

我们把岩石样品分别做成 $6 \times 6 \times 12$ 厘米和 $5 \times 5 \times 10$ 厘米, 两端面平行度误差小于0.05毫米的两种试件, 然后用甲苯或丙酮处理, 以除去机械加工所残留的油污, 并在105℃下烘干24小时, 再用自来水浸泡三天, 测量其吸水量(表1)。实验时选用长江500型三轴压力机及200吨液压式压力机, 进行单轴向分级加载, 其速度为 $5—6$ 公斤/厘米²·秒⁻¹, 对饱和样品(自来水浸泡三天)——Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ组的样品及干燥样品(室内自然干燥)——Ⅲ、Ⅴ两组样品, 加载到岩石破坏强度的95%左右, 然后稳压, 观测充水或不充水情况下, P波速度的变化。

用SYC—2声波岩石参数测定仪测量P波(压缩波)初到走时。ST—50夹心式换能器发射频率为50千赫, 自制换能器发射频率为1.3兆, 接收频率为1.0兆。在样品上安放换能器时, 要使换能器收发方向有垂直岩石层理构造的(如Ⅱ、Ⅲ组的样品), 也有平行岩石层理构造的(如Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ组等样品)。换能器与样品间用黄油耦合, 用YJ—5型静态电阻应

样 品 吸 水 量

表 1

组别		样 品 吸 水 量 (g)						清洗液	备注
I	样 品	I—1	I—2	I—3	I—4	I—5	I—6	丙 酮 甲 苯	样品尺寸是 6 × 6 × 12厘米
	吸水量	10.736	10.333	10.182	10.480	10.216	10.042		
II	样 品	II—1	II—2	II—3	II—4	II—5	II—6		
	吸水量	16.004	15.969	15.194	15.903	15.432	11.279		
III	样 品	III—1	III—2	III—3	III—4	III—5	III—6		
	吸水量	12.072	11.666	11.674	11.789	12.008	11.847		
IV	样 品	IV—1	IV—2	IV—3	IV—4			丙 酮 甲 苯	5 × 5 × 10厘 米
	吸水量	15.131	15.332	14.777	8.574				
V	样 品	V—1	V—2	V—3	V—4	V—5	V—6		
	吸水量	8.613	7.483	5.534	6.722	7.846	7.726		
VI	样 品	VI—1	VI—2	VI—3					
	吸水量	9.750	9.078	9.504					

变仪及YJD—7型静态电阻应变仪测定样品的纵横向应变。应变片的表、底面均用防潮剂防潮。以保证高度绝缘。

二、实验结果与分析

1. P波速度与应力的关系

干燥状态下的样品加载时,随着应力增加 V_p 增加,当应力达到样品破坏强度的 50—60%时(或略高一些), V_p 开始下降,速度降至初值或小于初值后,样品就开始破坏,波形消失。也就是说曲线的变化可分成两个阶段(图 1a),即上升阶段和下降阶段。样品在饱和状态下加载时, P 波速度的变化特征与干燥状态下不同,主要表现在:大多数饱和样品在刚开始加载时, V_p 有一下降过程,然后才开始随应力的增加而增大,当应力达某一值(此值同干燥样品)后, V_p 又随应力的增加而下降。饱和样品在加载过程中, V_p 曲线可划分成下降—上升—下降三个阶段(图 1b)。

我们认为样品在干燥和饱和条件下,单轴向加载时, P 波速度变化不同,主要是湿度引起的。饱和样品在加载前已用自来水浸泡了三天,吸进了一定数量的水分(见表 1)。干燥样品与饱和样品本身的速度就有明显的差别,饱和样品的速度比干燥样品的速度约大 10—20%。A·Nur 等在《水饱和对低孔隙岩石速度的影响》一文中指出:饱和试件在常压下干燥,速度在开头几小时变化相当快,即使样品的孔隙率大约只有 1%,也是如此。水分随时间缓慢蒸发,引起 V_p 的减小。而我们的样品从水中取出到开始加压约需 20 分钟左右,在这一段时间内,波速将显示一定的变化——减小,这时 V_p 的减小量超过了应力增加过程中 V_p 的增大量,所以在饱和样品刚开始加载时,曲线显示下降。

加载过程中,应力小于破坏强度的 50—60%时, V_p 随应力的增加而增大,但当应力超

过此值时, V_p 随应力的增加反而减小。我们认为主要与岩石密度 ρ 的变化有关。开始 V_p 随应力增加, 是由于原始孔隙逐渐闭合, 样品体积变小, 密度增大所引起的。虽然从弹性理论公式来看, 波速似乎与岩石密度成反比, 但事实上, 波速只与 $\sqrt{\rho}$ 成反比, 而动弹性模量受密度的影响则更大, 即岩体的孔隙度很小或岩体密度较大时, 岩体的动弹性模量急剧上升。根据对岩石密度和速度的实测资料, 也可以看出岩体密度不同, 其速度也不同, 两者呈正比关系。

从图1可以看出: 应力为岩石破坏强度的50—60%时, 是 V_p 曲线的转折点, 在此之前 V_p 曲线上升, 在此之后 V_p 曲线下降, 正是样品的体积应变所引起的。图2中I区样品体积

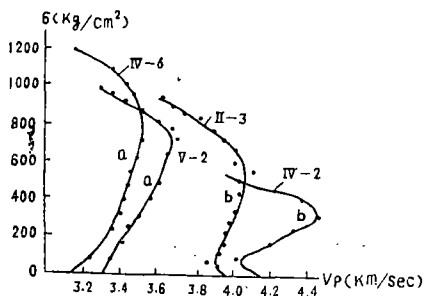


图1 V_p — σ 曲线
a、干燥样品、b、饱和样品

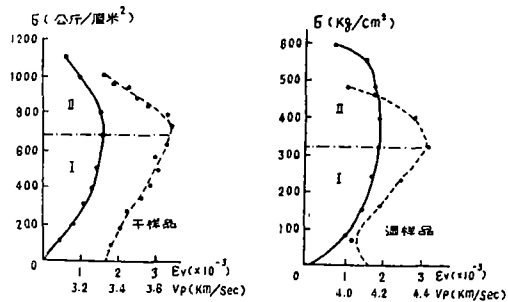


图2 V_p — σ 、 ϵ_v 关系曲线
— 体应变曲线 P波速度曲线

缩小, V_p 上升, 而 II 区样品体积应变曲线反向 (体积膨胀), V_p 下降。这种对应关系甚为密切, 是由于应力的不断增加, 引起岩石内部结构发生变化, 新的微裂隙不断增加, 原有旧裂隙也重新张开并扩大, 样品体积增大, V_p 随之减小。K·Hadley 曾在《膨胀岩石中的波速比异常》一文中指出: 不论饱和度怎样, 剪切波速度和压缩波速度均随膨胀体应变的增加而减小。我们的实验在不同的条件下证明了体应变发生膨胀, P波速度也随之减慢。

2. p波速度与岩石层理构造的关系

一般说来, 换能器收发方向平行岩石层理构造的 p 波速度比垂直岩石层理构造的要大 10% 左右, 而它们在加载过程中的变化幅度却是垂直岩石层理构造的比平行岩石层理构造的大一些, 特别是临破坏前, 这种变化特征就更为明显了。图3是样品加载到破坏强度的95%左右时稳压, 虽然随着时间的增长, V_p 都显示下降, 但它们的变化速率却相差很大。换能器收发方向垂直岩石层理构造时, V_p 随着时间的增长迅速下降 (如样品 II—2、II—3); 而换能器收发方向平行岩石层理构造时, V_p 随着时间的增长缓慢下降, 甚至几乎无变化 (如样品 I—5、I—4、IV—2等)。我们认为这种变化特征是岩石的各向异性引起的。加载过程中微裂隙沿着层理方向容易产生, 其它方向则差一些。样品沿着层理面剥开、折断这一破坏形式可充分说明。另外, 我们在平行层理方向测得的应变比垂直层理方向测得的应变要小得多, 特别是临破坏前更为突出 (图4)。这进一步说明了岩石样品的各向异性是明显的, 因此导致不同方向上波速变化的差异性。

3. p波振幅的变化特征

加载开始时, 不论是干燥或饱和样品, 也不论是加载方向平行或垂直层理构造, P波振幅的变化多数表现为略显下降, 然后稳定, 少数无变化或略有上升。但当应力达到岩石破坏

强度的50~60%以后,不论开始变化情况如何,P波振幅都随着应力的继续增加而不断下降(衰减),下降幅度可达50%,甚至更大,但异常时间有早有迟(图5)。

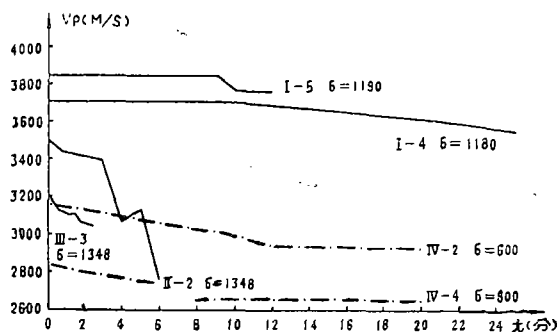


图3 充水稳压后 V_p 随时间的变化特征

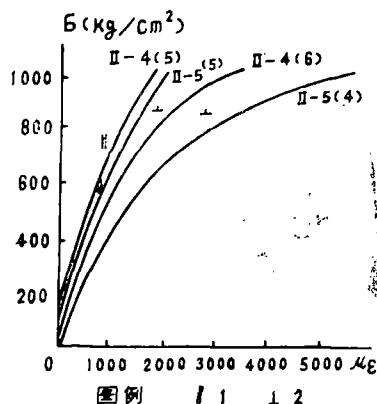


图4 样品Ⅱ—4, Ⅱ—5不同方向的横向应变随应力变化曲线
1.应变片平行层理, 2.应变片垂直层理, 括号内数字为应变片编号

稳压后, 振幅的变化与波速变化显同步。波速变化大的振幅变化亦大, 波速变化小的振幅变化亦小。也就是说: 振幅变化同样显示了明显的方向性(图6)。

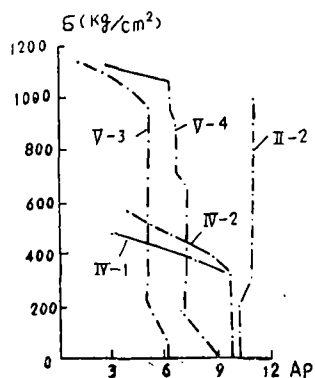


图5 $A_p - \sigma$ 曲线

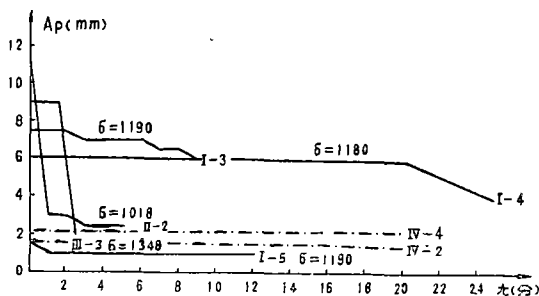


图6 充水稳压后, P波振幅随时间变化曲线
——加载方向平行岩石层理 ~加载方向垂直岩石层理
Ⅱ—2, Ⅲ—3样品换能器收发方向垂直岩石层理, 其他为平行层理。

我们认为振幅变化的原因和波速变化的原因相似, 岩石内部结构发生变化, 微裂隙的形成导致弹性波通过时增加能量的消耗, 振幅衰减, 而岩石的各向异性产生了不同方向上变化的不一致性。

4. 波形变化特征

实验过程中, 我们还观测了波形的变化。几乎每一块样品在加载过程中, 随着应力的增加, 波形均显示不同程度的变化, 我们将较为明显的初到波形的变化过程, 作了现场素描(图7)。

随着应力由小到大的变化过程, 波形逐渐产生分叉的毛刺, 显得比原波形复杂。

其次振幅和走时也随着应力的不断增加而逐渐变化, 波形变化的这种现象反映了应力的

变化和岩石内部结构的变化，导致波谱成分发生变化。

地震时波谱成分的变化，在实际观测中已有人开始进行研究〔1〕。初步结果表明：在一个地震系列中随着临近较强地震（ $M_L \geq 3.2$ ）的发生，微震P波在10—60周频率范围内的谱值增高，其置信水平在70%以上，较强地震发生以后，微震P波在相应的频率范围内的谱值下降。

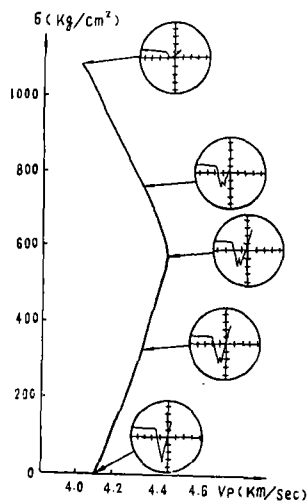


图7 初到波形的变化特征

四、结 论

本实验做了应力方向垂直或平行岩石层理构造，加载到岩石破坏强度的95%左右，稳压充水或不充水情况下P波速度变化特征的观测研究。同时又做了干燥样品与饱和样品在加载过程中P波速度变化特征的比较。根据以上结果与分析得出下列几点结论：

1. 不论应力方向是垂直还是平行岩石层理构造，干燥样品和饱和样品在加载过程中，应力—P波速度曲线形态是不同的，前者呈现上升—下降两个阶段，后者呈现下降—上升—下降三个阶段。
2. 应力方向垂直岩石层理构造时，垂直应力方向上的P波速度为各向同性，而应力方向平行岩石层理构造时，垂直应力方向上的P波速度为各向异性。
3. P波振幅的变化，不论应力方向是垂直或平行岩石层理构造，也不论样品是干燥或饱和状态，低应力时变化不大，但当应力达某一值后，振幅随应力的增加明显减小。
4. P波形态随应力的增加而变化，主要表现在由光滑的正弦波逐渐产生分叉的毛刺使波形显得复杂化。

参 考 文 献

- 〔1〕朱传镇等，新疆西克尔地区微震波谱的初步研究，地球物理学报，Vol.18, No.4, 1975.



VARIATION CHARACTERISTICS OF P-WAVE VELOCITY IN THE SANDSTONE UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

Shao Shun-mei Li Liu-yu Shan Deng-long Zhou Jan-guo
Gao zhong-qiang Xie Yuan-ding
(*Lanzhou Seismological Institute*)

Abstract

The rocks of parallel bedding and vertical bedding were loaded under uniaxial compression until stable was kept about 95 percent of failure intensity of the specimen. When the specimen were full of water or dry, the variation characteristics of p-wave velocities interior and saturated specimen observed were as follows:

1. Changes of p-wave velocities were quite different in both direction of parallel bedding and that of vertical bedding when the rock would soon become a failure.

2. The amplitude of p-wave and its shape varied with ever-increasing stress.