

大理石板中心受压至断裂时 P 波速度变化的实验研究*

许昭永 李忠富 李佩林 华培忠 张万普
(云 南 省 地 震 局)

摘要

本文叙述无水注入情况下, 中心受压的大理石板 ($600 \times 600 \times 20$ 毫米) 破裂前, P 波走时变化的实验结果。

路径穿过未来裂缝、靠近受压中心时, 走时上升一回降; 不靠近受压中心则走时只上升。路径近于平行且靠近未来裂缝, 走时一般不变。路径不穿过未来裂缝和受压中心, 发射点附近形变小时, 走时不变; 发射点附近形变大时, 走时一般下降。路径穿过受压中心时, 有些走时先上升后恢复再下降。有些则下降后回升。这说明在岩石破裂前, 破裂孕育区附近同时存在 P 波速正负异常区和正常区。

同时还观测到, P 波速度负异常区随中心压力增加逐步扩大。由裂缝一侧波源所得的正常区正好是由另一侧波源所得的负异常区。

一、问题的提起

研究用波速比异常预报地震的工作中, 冯德益、Y. P. Aggarwal、董颂声等指出^[1-3], 主震可能发生在平均波速比负异常区的边缘。Л. Б. Славина, G. A. Sobolev, A. A. Лукк等指出^[4-6], 主震可能发生在单台波速比正异常区, 或者在负异常区, 也可能在二者交界处。究竟发生在哪? 为此, 我们用岩石试件来模拟破裂位置与波速比异常区的分布关系。目前, 国内外的岩石试验, 无论是观测速度变化, 还是破裂位置和破裂过程, 选用试件都很小, 通常长约 50 毫米, 横截面线度约 20 毫米, 且往往是整个试件表面受力。这对于观测破裂孕育区、波速正负异常区和正常区显然是困难的。D. Lockner, J. H. Dietrich^[7-8] 等虽然使用了大试件, 但仍采用均匀加力方式。为了更好地模拟地块受力不均匀的实际情况, 我们采用大平板试件, 并在中部加压, 以产生不同的应力应变区域, 从而观测各区域波速变化与破裂位置之间的关系。

二、仪器及实验方法

加压用长江 500 型三轴应力机; 走时测量用 SYC-2 岩石参数测定仪; 换能器用 PZT-

* 1980年10月4日收到初稿, 1981年3月23日收到修改稿。

5(频率 1MC) 钛锆酸铅压电陶瓷片(*P* 波换能器), 直径 20 毫米。换能器壳直径 28 毫米, 应变测量用 y6D-2 型动态应变仪及 SC-16 光线示波器。

试件为圆形或正方形大理石板(直径 600 毫米或 600×600 毫米, 厚度 20 毫米), 在板中心单轴向加压, 压头直径为 38 毫米, 长 60 毫米的钢圆柱体。换能器围绕板中心分布。四个发射换能器(I—IV)固定在板下方, 距受压中心 50 毫米, 16 个接收换能器(1—16)固定在板上方, 距受压中心 250 毫米, 靠近发射点布置 8 组应变片(图 1)。

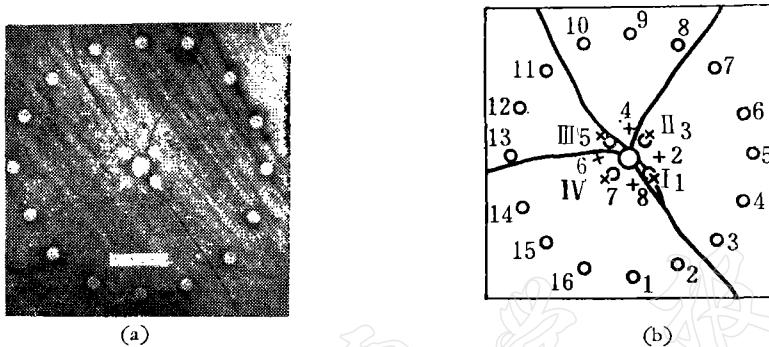


图 1 试样上的点位及断裂位置(穿过 2—3, 10—11 为主断裂)

○——走时测点; I—IV 发射点; 1—16 接收点; +——应变测点

加压与测量方式 在达到破裂压力的估计值的一半之前每次加压 2 吨, 以后每次加压 1 吨, 每次测定每个发射点至每个接收点的 *P* 波走时。实际测的是第一波峰或波谷的到时, 这样精度较高。采用转换开关逐道测量, 全部共测 4×16 道。加压的同时连续测量各点的应变, 如此往复进行, 直至破裂。

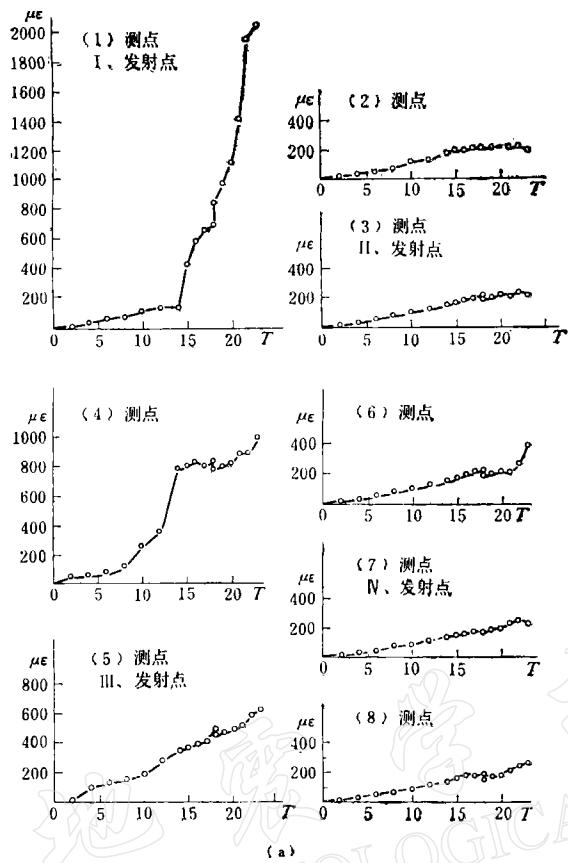
资料处理方法 当 SYC-2 仪器用 0.1 微秒档时, 走时大于 20 微秒。测量相对误差约为 1.5%。走时大于 100 微秒, 测量相对误差约为 0.5%。我们所测的走时都在 50 微秒左右, 故取最大测量误差为 ± 0.5 微秒。同时, 对每一道达到破裂压力一半之前的观测值的平均值作基值。下文各表中基值后所标值为观测值的最大偏离范围, 它们绝大多数小于 ± 0.5 微秒。取其与 0.5 微秒之间最大者为误差范围。走时变化超出误差范围时为异常, 在范围之内为正常。

三、实验结果

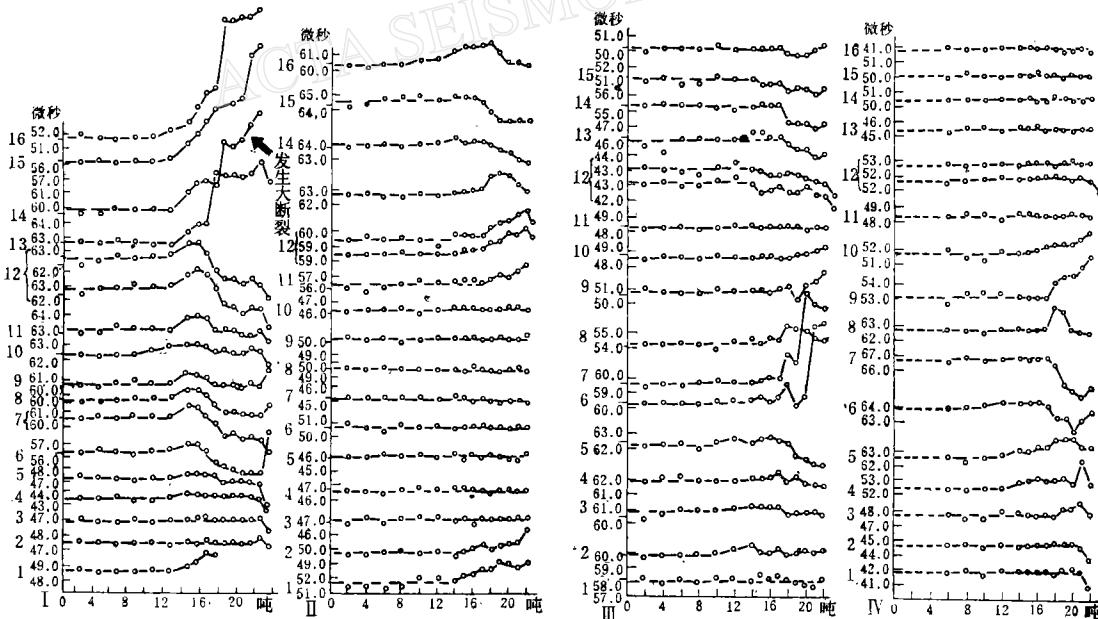
图 1 给出了断裂位置。压力加到 16 吨时, 靠近发射点 I 的地方出现可见裂纹; 压力继续增加, 裂纹逐步延伸。压力达到 23 吨后, 穿过接收点 2—3、10—11 间发生断裂(主断裂), 另两条断裂出现很晚。

图 2(a) 是 8 个测点上的应变随中心压力变化的曲线。图 2(b) 是 4×16 道路径上 *P* 波走时的变化曲线。由于点位固定, 两点间由裂隙或形变所引起的距离变化与走时变化相比, 可忽略不计。所以图中选中心压力为横坐标, 走时为纵坐标。

从图中可以看出, 岩石破裂前有如下现象:



(a)



(b)

图 2

(a)—8个测点上的应变变化 (b)—各路径的走时变化

I—IV 为发射点； 1—16 为接收点(为了重复观测,接收点 12 先后观测两次,两次间隔约 10 分钟。发射点 IV 在压力为 4 吨时移位了,故从第 6 吨开始计数。箭头表示发生主断裂的时间)。

1. 路径不通过受压中心和未来裂缝, 附近形变很大的发射点 III, P 波走时下降, 如图 2(b) 中的 III-12, III-13, III-14, III-15 等。

路径不通过受压中心和附近形变很大且处于未来裂缝上的发射点 I, P 波走时有的先上升, 而后下降并低于原走时, 如图 2(b) 中的 I-6, I-7, I-8; 有的只是下降, 如图 2(b) 中的 I-3, I-4, I-5。表 1 给出这些曲线的基值、误差和异常的最大幅度及其开始和结束的时间。

表 1

路 径	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	I-8	III-12	III-13	III-14	III-15
基值(微秒)	46.9 ±0.1	43.6 ±0.1	47.2 ±0.3	56.2 ±0.1	60.5 ±0.1	60.1 ±0.1	43.1 ±0.4	46.0 ±0.7	55.4 ±0.3	51.1 ±0.3
误差(微秒)	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.7	±0.5	±0.5
开始(吨)				12	12	12				
幅度(微秒)				+0.7	+0.8	+0.7				
恢复(吨)				16	16	16				
开始(吨)	22	22	22	16	16	16	15	17	17	17
幅度(微秒)	-0.7	-0.8	-1.7	-1.3	-2.3	-1.0	-1.8	-1.1	-1.5	-0.9
结束(吨)				23						

2. 路径近于平行且靠近未来裂缝, 附近形变虽大的发射点 I、III, P 波走时不变或变化较小且出现较晚, 如图 2(b) 中的 I-2, III-11 走时不变; I-3、III-10 虽有变化但幅度较小且出现较晚。

路径不通过受压中心和未来裂缝, 附近形变小的发射点, P 波走时不变, 如图 2(b) 中的 II-3, II-4, II-5, II-6, II-7, II-8, II-9, II-10, IV-13, IV-14, IV-15, IV-16, 其变化范围都未超出 ±0.2 微秒。

3. 路径穿过未来裂缝且靠近受压中心, P 波走时先上升后回降, 逐步恢复到正常值, 如图 2(b) 中的 II-12, II-13, II-16, IV-4, IV-5, IV-8 等。表 2 给出了这些曲线的基值、误差和异常的最大幅度及其开始和结束时间。

表 2

路 径	II-12	II-13	II-16	IV-3	IV-4	IV-5	IV-8
基值(微秒)	59.4±0.2	62.6±0.2	60.2±0.2	47.8±0.3	52.4±0.2	62.6±0.3	62.6±0.2
误差(微秒)	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5
开始(吨)	17	17	12	18	12	12	17
幅度(微秒)	+1.8	+1.4	+1.5	+0.8	+1.6	+1.2	+1.6
结束(吨)			21	22	22		22

路径穿过未来裂缝且不靠近受压中心, P 波走时只上升, 如图 2(b) 中 I-1, I-9, I-13, I-14, I-15, I-16, II-1, II-2, II-11, III-6, III-7, III-8, III-9, III-10, IV-9, IV-10, 且随

着中心压力增加,出现波速负异常的路径逐渐增多。表 3 给出了这些曲线的基值、误差和异常的最大幅度及其开始时间。

表 3

路 径	I-1	I-9	I-13	I-14	I-15	I-16	II-1	II-2	II-11	III-6	III-7	III-8	III-9	III-10	IV-9	IV-10
基值(微秒)	48.6 ±0.1	60.6 ±0.2	62.6 ±0.2	60.8 ±0.2	58.1 ±0.1	51.7 ±0.1	51.7 ±0.1	49.8 ±0.2	56.3 ±0.4	60.2 ±0.2	59.6 ±0.2	54.2 ±0.4	50.8 ±0.3	48.7 ±0.2	53.0 ±0.4	50.7 ±0.4
误差(微秒)	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5
开始(吨)	14	22	12	12	12	12	14	15	18	17	17	17	19	19	17	17
幅度(微秒)		+1.1	+5.6	+6.6	+7.1	+8.7	+1.5	+1.5	+1.4	+5.6	+6.1	+1.2	+1.4	+0.7	+2.7	+1.5

4. 路径穿过受压中心, P 波走时变化有三种情况: 有的先上升后下降并低于原走时, 如图 2(b) 中的 I-12, III-5; 有的先上升后回降, 如图 2(b) 中的 III-2, III-3, III-4, 但不明显; 有的先下降后回升, 如图 2(b) 中的 IV-6, IV-7, II-14 和 II-15 只下降。这些情况的不同也与发射点附近的形变有关。I、III 附近形变很大; II, IV 附近形变较小。表 4 给出了这些曲线的基值、误差和异常最大幅度及其开始和恢复到正常的时间。这里再次观测到破裂前 P 波速度先下降后回升超过原值和先上升后回降的现象。

表 4

路 径	I-10	I-11	I-12	II-14	II-15	III-2	III-3	III-4	III-5	IV-6	IV-7
基值(微秒)	62.2 ±0.2	62.9 ±0.3	62.7 ±0.4	63.9 ±0.4	64.5 ±0.4	59.8 ±0.2	60.7 ±0.4	61.9 ±0.2	62.2 ±0.2	64.1 ±0.2	66.6 ±0.2
误差(微秒)	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5
开始(吨)	12	12	12				12		14		
幅度(微秒)	+0.6	+0.9	+1.3			+0.7	+0.6	+0.6	+0.6		
恢复(吨)	18	17	17				18		18		
开始(吨)	21	21	17	18	17				18	17	17
幅度(微秒)	-0.7	-0.8	-2.6	-1.8	-1.3				-1.2	-1.8	-2.6

四、讨 论

1. 文献 [9, 10] 提出某些地球物理场的变化是由微裂缝的出现所引起。材料的弹性常数增大, 波速上升。我们倾向于这一干模式假说。破裂孕育区附近同时存在波速正负异常区和正常区, 这是由于各部分受力不同, 所处状态不同, 故波速变化形态也不同, 图 2 就证明了这一点。出现微裂缝的区域波速下降; 剧烈形变区域, 原有裂隙闭合, 弹性常数增大, 波速上升; 形变小的区域, 力学性质基本未变, 波速不变。基于上述事实, 我们认为, 对震前不能以和达线求平均波速比, 尤其不能以其线性好坏取舍资料, 否则会掩盖某些事实真相。

2. 利用实验结果 3, 用异常射线交切法作图, 即用每个发射点扇形最边缘上的两条波速负异常路径交出异常区, 结果如图 3 所示。波速负异常区随中心压力增加而扩大。实

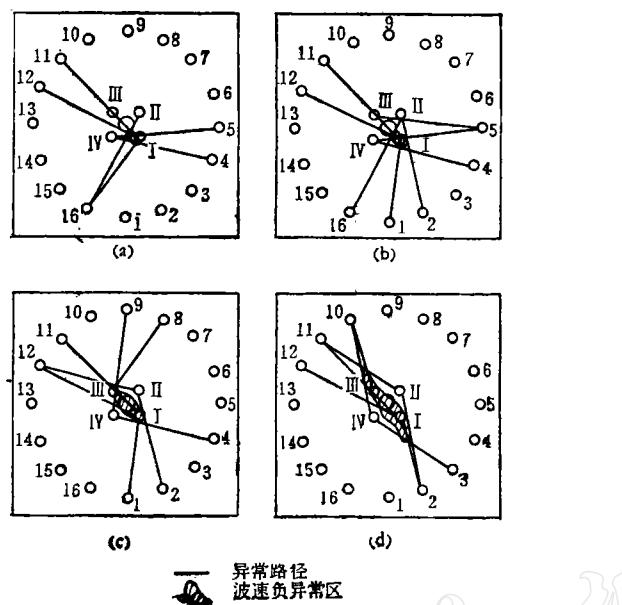


图3 异常区扩展示意图

(a)——压力为14吨时的异常区 (b)——压力为16吨时的异常区
 (c)——压力为18吨时的异常区 (d)——压力为21吨时的异常区

验中观测到，这一扩展过程与裂缝的延伸过程是一致的。董颂声^[3]等人曾猜测震前波速负异常区可能扩展。本实验证明这种现象是存在的。

3. 本实验还观测到：由裂缝一侧的波源所得的正常区正好是由另一侧波源所得的负异常区(可对调性)。如图4中的发射点II：II-12负异常，II-9，II-10正常。而若以600×20毫米侧面为地面观察，随着中心压力增加，又新出现异常路径II-11，IV-10，这样具有可对调的正常区和负异常区的交界区域也就越来越小。

冯锐^[11]曾指出，海城地震时，震中区很晚才出现波速比负异常，且在整个震前的波速比异常期，震中区与外围的变化趋势相反。文献[5]指出，对不同台站和不同小震，波速比正负异常区的位置是不同的，而且随时间变化。我们的实验结果与此是一致的。

五、结 论

岩石破裂前破裂孕育区附近同时存在波速正负异常区和正常区。基于这一事实，不能用和达线求平均波速比以预报地震。P波速度负异常区有逐渐扩大的趋势。可以试用有对调现象的交界区域来预报未来断裂点位置。

高龙生、陈颙、阙荣举、李白基、闵子群等同志对本文提出过重要修改意见，在此特表示感谢。

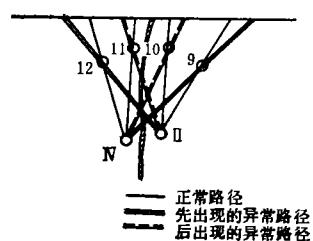


图4 可对调性示意图

参 考 文 献

- [1] 冯德益, 谭爱娜, 王克芬, 近地震波速异常与地震预报, 地球物理学报, 17, 2, 1974.
- [2] Y. P. Aggarwal, L. R. Sykes and D. W. Simpson, Spatial and temporal variation in t_s/t_p and in P wave residuals at Blue Mountain Lake New York: Application to earthquake prediction, *J. Geophys. Res.*, 80, 5, 718—732, 1975.
- [3] 董颂声, 葛煥称, 罗荣联, 许昭永, 王凤起, 根据波速比变化预报地震的一个实例, 地震研究, 3, 1978.
- [4] Л. Б. Славина, Методика и результаты изучения V_p/V_s в фокальной зоне Камчатки, «Исследования по физике землетрясений», Издательство «Наука», Москва, 217, 1976.
- [5] G. A. Sobolev and L. B. Slavina, The spatial and temporal changes in V_p/V_s before strong earthquake in Kamchatka, *Pageoph.*, 115, 1047, 1977.
- [6] А. А. Лукк, И. Л. Нерсесов, Природа временных вариаций скоростей упругих земной коре гармского района, Изв. А. Н. СССР, *Физика Земли*, 6, 1978.
- [7] D. Lockner, J. B. Walsh and J. Byerlee, Changes of seismic velocity and attenuation during deformation of granite, *J. Geophys. Res.*, 82, 5374, 1977.
- [8] J. H. Dieterich (陈颙译), 大尺度摩擦实验中的震前滑动, 国外地震, 5, 1979.
- [9] V. I. Mjachkin, W. F. Brace, G. A. Sobolev and J. H. Dieterich, Two models for earthquake forerunners, *Pageoph.*, 113, 169—182, 1975.
- [10] V. I. Mjachkin, G. A. Sobolev, N. A. Dolbilikina and V. B. Preobrazensky, The study of variation in geophysical fields near focal zones of Kamchatka, *Tectonophysics*, 14, 287, 1972.
- [11] 冯锐等, 海城地震前后地震波速比的变化, 地球物理学报, 19, 4, 1976.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE VARIATION OF P-WAVE VELOCITY IN A MARBLE SLAB LOADED TO FAILURE AT THE CENTER

XU ZHAOYONG LI ZHONGFU LI PEILIN HUA PEIZHONG ZHANG WANPU

(Seismological Bureau of Yunnan Province)

Abstract

The P-wave travel time variation in a dry marble slab of size 600×600×20 mm loaded at its center to failure has been experimentally studied, the results of which are described in this paper.

For the wave paths crossing the forthcoming fracture and the portion nearby the center of loading, the travel time increases first and then decreases as the loading increases, while for the portion farther away from the center, the travel time merely increases. For those wave paths nearby and parallel to the fracture, the travel time remains unchanged. However, for the wave paths not crossing the fracture and passing the center of loading, the travel time remains unchanged if the deformation is small in the vicinity of the wave emitting source but generally decreases if the deformation there is large. For those paths passing through the center of loading, some of the travel times increase first and then decrease while others decrease first and then increase. These results may indicate that before fracturing there exist positive and negative anomalous and normal regions of P-wave velocity around the fracture during the process of its development.

Meanwhile, it is also observed that the regions of negative anomalous P-wave velocity are enlarged by steps as the central loading is increased. The regions of normal P-wave velocity as observed from the wave emitting source located on one side of the fracture is usually the same region of negative anomalous P-wave velocity as obtained from a wave emitting source located on the other side.