西北地震学报

# 含孔隙度混凝土样品受压破裂过程中地震波变化特征的综合实验研究

李刘玉 金铭 蒋续媛

(兰州地震研究所)

#### 摘 要

本文用单轴,三轴不等压和围压下混凝土样品的地震波变化特征实验,对含孔隙度混凝土 样品破裂过程中的 V<sub>0</sub>、V<sub>0</sub>,V<sub>0</sub>、A<sub>0</sub>、A<sub>0</sub>、A<sub>0</sub>,A<sub>0</sub>进行了综合实验研究。结果表明:1.含孔隙度混 数土样品对地震波振幅的影响较显著。2.样品破裂过程中 V<sub>0</sub>、V<sub>0</sub>、V<sub>0</sub>,V<sub>0</sub>、A<sub>0</sub>、A<sub>0</sub>、A<sub>0</sub>,A<sub>0</sub>有一个 明显的变化过程。3. 在样品临破裂前地震波振幅变化的各向异性非常明显。4. 地震波振幅的 衰减与样品强度、性质、结构和受力状态有关,即样品强度高,受力状态为( $\sigma > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ )振 幅衰减慢,反之振幅则衰减快。5. 性质相同的样品,波速随密度的增加而增大,由于密度和孔 隙度有关,故波速也受孔隙度的影响。6. 含孔隙度混凝土样品与小岩石样品有着某种相似性, 因此,混凝土样品的实验结果同样对地震波波速异常有启示。

## 一、实验方法

实验用的 I 为砂浆样品, I 一 II 为混凝土样品。我们分别对 I 一 II 样品进行了综合实验。 其中 I 样品的抗压强度为 4.7M<sub>m</sub>,在( $\sigma_1 > 0$ , $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ )条件下实验。 I 样品的抗压强度为 8M<sub>m</sub>,在( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ )条件下实验, II 样品的抗压强度为 7.5M<sub>m</sub>,在( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ )条件下 实验。样品置于湖南某矿区一直井巷道的坑洞室中,围岩为硅化灰岩,深度 199 米,洞室内温度 为 25℃,干湿差 79%。坑道离采石场较远,环境条件基本稳定,除压力外,其它因素可以认为是 不变的。为补充洞室空间,样品下部筑有高标号混凝土基座。样品的实验装置同文献<sup>[1]</sup>,样品制 作的基本参数见表 1。实验采用 96×96×4(厘米)的钢枕施加轴向载荷,用 6.8 厘米厚的钢板 传压,用高标号混凝土封顶。侧向用 150×150×7(厘米)钢枕加合加载,传力板厚 1 厘米, 中间挖有 5 个标点孔,并埋入直径 16 毫米,长 40 厘米的无缝钢管用以测量样品的纵横向变 形。采用 18 号和 14 号长 160 厘米的槽钢组成侧向反力框架,一共架设 14 付<sup>[1]</sup>。各钢枕油管和 高压阀门与油泵相连组成加载油路系统,在油路系统中安装 YB—150M/M 标准压力表,用高 压阀门控制各项压力。

- 169 -

	1	Ⅰ—Ⅱ样品制作的基本参数			
ſ	样品性质	配比	抗压强度	样品尺寸	令期
		水泥:尾砂:碎石	(kg/cm <sup>2</sup> )	(米)	(天)
Ĺ	I砂浆	1:8:2	47.0	1×1×1.5	233
	Ⅱ混凝土	1:5:1	80.0	1×1×1.5	233
ſ	□混凝土	1:5:1	75.0	1×1×1.5	233

Ⅰ—Ⅲ样只制作的基本条数

实验采用 syc-2 型超声波岩石参数测定仪,用频率为 700KHz 的探头作发射和接收换能 器在 I 一 II 样品两端各打一个深 8 厘米的孔,使这两个孔与样品轴向一致。用黄油将探头固定 在孔底。实验先分级加载至静水压力,然后逐级加大轴向压力,直至样品破裂。每加载4公斤 /厘米²,观测一次样品受力变形破裂过程中地震波的变化量。

# 二、实验结果与分析

(1) I — I 样品 p 波和 s 波的变化特征

I 样品,抗压强度为 4.7M<sub>m</sub>,在加载初期,样品处于弹性变形范围,p 波和 s 波速度随应力 增加而缓慢增加,这是由于裂隙逐渐闭合,体积产生微小收缩,样品变得致密造成的。当应力达 到破裂应力的 50%时,波速变化开始减弱,样品开始屈服,处于弹一塑性变形状态。应力继续 增加样品将进入破裂阶段,原有裂隙再次出现,裂口增大,裂隙长度伸展,续而新的裂隙明显出 现,并与原有隐裂隙贯通导致样品急剧破裂。此时,p波和s波速度均显示下降的变化规律,其 中 V。 变化大约为 3.0(km/s)左右, V. 变化大约为 1.8(km/s)左右。 如图 1、2 所示。



图 2 I-II样品S波速度随应力变化曲线 图1 【一〖样品P波速度随应力变化曲线 I样品,抗压强度为 8.0Mm,在加载初期,p 波和 s 波速度随应力的增加而缓慢增加,当应 力超过破裂应力的 60%时,其中 V。变化大约为 3.3(km/s)左右, V. 变化大约为 2.2(km/s)左 右。两种波变化幅度上的差异,可能是差应力的作用引起的。如图1、2所示。

■样品,抗压强度为7.5Mm,在加载初期,p波和s波速度随应力增加而缓慢增加,当应力 超过破裂应力的 40%时,样品内部产生微裂隙,在样品临破裂前 p 波和 s 波速度明显下降,其 中 V, 变化大约为 2.4(km/s)左右, V。变化大约为 2.1(km/s)左右。如图 1、2 所示。

(2) I — II 样品波速比(V<sub>a</sub>/V<sub>a</sub>)的变化特征。

1 样品,在加载初期,波速比随应力的增加而缓慢增加,当应力超过破裂应力的一半左右 时,波速比逐渐减小,但1样品在加载初期其波速比值高,表明该样品的完整程度较差。而1--■样品波速比变化基本相似。如图 3 所示。

— 170 —





图3 Ⅰ--Ⅲ样品波速比随应力变化曲线 图4 Ⅰ-Ⅲ样品 Ρ 波振幅随应力变化曲线

(3) I — Ⅲ样品 p 波振幅和 s 波振幅的变化特征。

I 样品,在加载初期,p 波振幅和 s 波振幅随应力的增加而减小,当应力增加至破裂应力的 50%时,p 波和 s 波振幅变化差异较大,其中 A,变化大约为 25(mm)左右,A.变化大约为 15 (mm)左右。随后振幅急剧下降,直至样品破裂,如图 4 和图 5 所示。

I 样品,在加载初期,p 波振幅和 s 波振幅的变化较迟缓,当应力超过破裂应力的 50%时, 振幅呈大幅度下降,其中 A,变化大约为 18(mm)左右,A,变化大约为 23(mm)左右,振幅变化 各向异性非常明显。如图 4、5 所示。



图 5 Ⅰ-■样品S波振幅随应力变化曲线 图 6 Ⅰ-■样品振幅比随应力变化曲线 ■样品,在加载初期,p波振幅和s波振幅随应力增加而缓慢增加,当应力超过破裂应力的 40%时,p波和s波振幅显示同步急剧下降,直至样品破裂。如图 4、5 所示。

(4) Ⅰ — Ⅱ 样品 p 波和 s 波振幅比随应力的变化特征

I样品,在加载初期,地震波振幅比(A,/A。)随应力增加,出现高值,表明样品内部原有孔隙度较低,当应力超过破裂应力一半左右时,振幅比开始减小,在样品临破裂前振幅比回升,而 I一Ⅱ样品的振幅比随应力的增加缓慢增加,直至样品破裂,表明I一Ⅱ样品的振幅比的变化 趋势基本相同。如图 6。

三、单轴压缩下砂岩样品地震波变化特征的实验研究

(1)p 波速度:在加载初期,V,随应力增加逐渐增加,当应力超过破裂强度的 50%时,波速 逐渐减小。这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,随之减小。如图 7。

(2)s 波速度:在加载初期,V。随应力增加有一定的变化,但相对于p 波速度来说,V,的变化要小得多。如图 7。

(3)波速比(V<sub>a</sub>/V<sub>a</sub>):在加载初期,波速比随应力增加缓慢增加,可分为三个阶段,下降一回

- 171 --

含孔隙度混凝土样品受压破裂过程中地震波变化特征的综合实验研究



(4)p 波振幅:在加载初期,p 波振幅随应力增加而显著增加,变化大约为 24(mm)左右。在 样品临破裂前,振幅大幅度减小,如图 9。



1.0

R = Ap/AS

图9 砂岩样品 P 波和 S 波振幅 随应力变化曲线

图 10 砂岩样品 P 波和 S 波振幅比 随应力变化曲线

(5)s 波振幅:在加载初期,s 波振幅随应力增加缓慢增加,变化大约为 17(mm)左右。如图 9。

(6)振幅比(A<sub>b</sub>/A<sub>b</sub>):在加载初期,振幅比的变化表现为略显下降,然后稳定,或略有上升。 但当应力达到岩石破裂强度的 50~60%以后,振幅比随应力的继续增加而不断上升,直至样 品破裂。如图 10。

(7)单轴压缩下混凝土样品与岩石样品的地震波变化幅度的差异。

实验结果表明:砂岩样品 V,变化幅度比 I 样品 V,变化幅度高 30%。砂岩样品 V.变化幅 度比 I 样品 V.变化幅度高 20%。砂岩样品 V,/V.变化幅度比 I 样品 V,/V.变化幅度低 6%。 I 样品 A,变化幅度比砂岩样品 A,变化幅度高 20%。 I 样品 A。变化幅度比砂岩样品 A.变化幅 度高 60%。I 样品 A,/A。变化幅度比 I 砂岩样品 A,/A。变化幅度高 30%。这表明,当其样品尺 寸达到 1 米左右时其强度要减小到原来的 10%<sup>[2]</sup>。地震波变化不仅与介质的均匀度,裂隙的 形状、大小、方向,孔隙度有关,而且与样品的尺度效应也有关。样品的尺寸变大,伴随着强度降 低,波速值变小。上述的因素对混凝土样品中地震波速的影响更显著<sup>[3]</sup>。混凝土样品和岩石样 品的对比实验表明:实验室的结果和混凝土样品有着某种相似性<sup>[4]</sup>,因此,混凝土样品的实验 结果同样对地震波异常有启示,这为我们从野外和室内研究来探讨地震波速异常提供了依据。

- 172 -

## 四、受力状态对地震波变化特征的影响

实验结果表明:由于对样品受力状态不同,样品在破裂过程中,地震波变化特征存在着差 异<sup>[4]</sup>例如: I 样品的波速比和振幅比在压力达到其破裂强度的 30%以后开始下降,显著下降 发生在压力达到其破裂强度的 60%。 I 样品的波速比和振幅比和在压力达到其破裂强度的 70%以后开始下降,在样品临破裂前,波速比下降,而振幅比明显回升。I 样品的波速比在压力 达到其破裂强度的 50%以后开始下降,显著下降发生在压力达到其破裂强度的 70%以后。该 样品的振幅比在压力达到其破裂强度的 30%以后开始回升,直至样品临破裂前一直处于高 值。说明 I 样品破裂前波速比和振幅比异常变化出现比 I 样品提前 10%,而且前者异常变化 比后者更明显。 I 样品波速比异常变化出现比 I 样品提前 10%左右。而 I 样品波速比异常变 化出现时间比 II 样品提前 20%左右。

### 五、结 论

综上所述,可以得出如下结论:

(1) I 样品 V, 比 V. 变化值高 16%, V, /V, 的变化幅度大约为 1.78 左右。A, 比 A, 变化值高 17%, A, /A, 的变化幅度大约为 1.8 左右。

(2) I 样品 V, 比 V, 变化值高 16%, V, /V, 的变化幅度大约为 1.7 左右。A, 比 A, 变化差值 较小, A, /A, 的变化幅度大约为 1.4 左右。

(3) Ⅲ 样品 V, 比 V, 变化值高 2%, V, /V, 变化幅度大约为 1.7 左右。A, 比 A, 变化值高 4%, A, /A, 的变化幅度大约为 1.3 左右。

(4)砂岩样品 V, 比 V。变化值高 8%, V, /V, 变化幅度大约为 1.5 左右, A, 比 A, 变化值高 10%, A, /A, 的变化幅度大约为 1.2 左右。

(5)同性样品,波速随密度的增加而增大。由于密度和孔隙度有关,故波速也受孔隙度的影响。

(6)波速比变化特征依赖于样品的性质,结构和受力状态。

(7)含孔隙度样品对地震波振幅的影响显著。在样品临破裂前振幅发生明显的变化。

(8) 地震波振幅比的变化与样品强度有关,即样品强度高,振幅比变化幅度低,样品强度低,振幅比变化幅度高。

#### 参考文献

[1]陆阳泉等,三向压缩下大型混凝土标本的电性特征,西北地震学报 V01,2,N。,4,1980. [2]郭铁栓等,实验样品波速测量的尺度效应和环境效应。中国地震 V01,1,N。,41986.

[3]W·F·Brace,尺度对岩石力学性质的影响,世界地震译丛,N。3,1982.

[4]李刘玉等,大尺度混凝土样品中波速比和振幅比变化特征的实验研究,西北地震学报, V01,12,N。,4,1990.

- 173 -