

文章编号: 1001-4888(2017)01-0017-10

外载荷作用下水泥砂浆复合 材料中的弹性波波速分析^{*}

周伟达, 张鸣, 徐松林, 单俊芳, 施春英, 王鹏飞

(中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 合肥 230027)

摘要: 为研究水泥基复合材料中弹性波频散特性, 应用主频分别为 50kHz、300kHz 和 1MHz 三种声波探头, 对钢纤维体积含量分别为 0.5%、1.0% 和 3.0% 的三种钢纤维增强水泥砂浆试件进行了单轴压缩下的弹性波测试实验。结果表明: 在加载初始阶段, P 波波速随着载荷增大而明显增大, 但这种增大趋势逐渐减弱, 并达到一个较稳定的值。随着钢纤维体积含量增加, 波速有增大趋势。S 波具有类似趋势, 但其增幅比 P 波小得多。三种材料均表现出一定的频散效应。为消除材料在初始加载过程的非线性特性影响, 采用了相对波速的方法, 并讨论了相对波速的频散效应。结合多组份未胶结模型和 Hashin-Shtrikman 上限模型, 应用一种无量纲理论模型, 对比分析了弹性波波速频散规律。

关键词: 弹性波; 钢纤维增强水泥砂浆; P 波; S 波; 载荷作用; 相对波速

中图分类号: O347.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-138

0 引言

为了提高水泥砂浆的抗拉、抗折、抗裂强度^[1], 将钢纤维作为“骨料”加入水泥砂浆中可制得钢纤维增强水泥砂浆。此材料广泛应用于大型房屋建筑、防护工程^[2]等工程设施之中。由于钢纤维的加入, 实际的施工作业时会在试件中产生孔洞甚至蜂窝等缺陷, 而在受载和侵蚀等作用下, 材料的局部不可避免地会产生裂纹。因此, 如何对其质量进行检测和控制是建筑工程领域中重要的研究方向。超声无损检测技术主要根据测试得到的超声波在试件内部反射、透射和散射的信号, 来检测试件内部缺陷和测量几何特性^[3,4]。Shah 等^[5]、Voigt 等^[6]讨论了混凝土和水泥砂浆材料中的无损检测技术。在钢纤维增强水泥砂浆方面, 陈华艳^[7]研究了钢纤维含量、砂率与粉煤灰对声波波速与试件强度的影响。Acebes 等^[8]通过实验研究了孔洞和钢纤维含量对声波波速的影响, 并提出了一个三相的微观模型。这些研究基本都是在无载荷作用下进行的, 与材料和结构的实际状态存在一定差异。实际上, 各类工程中的水泥基复合材料都处在载荷作用下。在受载情况下, 材料和结构内部存在的裂纹和孔洞等缺陷的几何形态会发生变化, 而材料和结构的宏观弹性波波速是波与这些细微观结构相互作用的综合体现。邓向允等^[9,10]通过预制裂纹初步研究了载荷对波速的影响。徐松林等^[11]提出了一种相对波速的方法, 探讨了外载荷作用下不同孔隙率的混凝土(EPS 混凝土)试件中弹性波波速的变化规律。在细微观研究方面, Aggelis 等^[12]研究了含两种尺寸缺陷的水泥砂浆中弹性波的频散和衰减。徐松林等^[13]和谭子翰等^[14]从理论上分析了裂纹几何形态和尺寸对弹性波传播的影响。这些研究探讨了复杂介质频散的强弱与内部几何结

^{*} 收稿日期: 2016-08-01; 修回日期: 2016-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(11272304, 11472264, 11672286)

通讯作者: 徐松林(1971-), 男, 博士, 副教授。Email: slxu99@ustc.edu.cn

构的关系。由于需要进行模型化,研究对象相对比较简单,同时外载荷的作用并未得到很好体现。

本文选用钢纤维增强水泥砂浆复合材料作为研究对象,除了其工程应用背景外,还在于此材料是由水泥基体、集料和钢纤维构成,在载荷作用下材料内各成分表现出与 EPS 混凝土中各成分不同的变形特性;EPS 实质上是混凝土试件中的孔洞,加载过程中,EPS 混凝土中各成分均受压收缩;在钢纤维增强水泥基复合材料中,钢纤维受压变形很小,可近似看做体积不变,而其他成分在载荷作用下要发生一定的体积压缩,总体上看,似乎钢纤维的相对体积在增大。因为这种成分的差异,钢纤维增强水泥砂浆复合材料表现出一些比较特殊的频散现象。但由于其内部几何结构具有较复杂的分布规律^[15,16],对其进行研究具有相当的难度。

基于此,本文选用主频为 50kHz、300kHz 和 1MHz 的三种频率来进行测试,探索其频散规律。因为进行弹性波波速和频散特性的研究,因此,外载荷在其弹性强度范围内。理论模型研究方面将主要考虑复合材料内部多组元间胶结程度差异,采用 Dvorkin 等^[17]基于疏松砂岩的等效模量和波速的计算提出的未胶结模型,以及文献[18]为描述胶结良好的岩体等效模量和等效波速提出的一种改进的 Hashin-Shtrikman 上限模型,结合无量纲的半理论公式^[11,13]对载荷作用下声波传播特性进行研究。

1 实验

1.1 试样

实验所用钢纤维增强水泥砂浆由水、水泥、标准砂、钢纤维以一定配合比制得,所用材料组分见表 1^[16]。其中水泥为巢湖牌 525 号矿渣水泥,不锈钢纤维为 $\phi 0.5 \times 22.0\text{mm}$ 的波纹异型纤维。不锈钢纤维按体积比 0%~3% 添加。试样按 GB175—85 规范进行浇筑、成型和养护,在安徽省建科院水泥研究所完成。实验试件制作成直径约 50mm、高度约 150mm 的圆柱,选用的试件具体参数详见表 2。

表 1 实验材料的组分^[16]

体积含量 (%)	质量配比(g)			
	水	水泥	标准砂	钢纤维
0.5%	220	500	1250	35.7
1.0%	220	500	1250	71.8
3.0%	220	500	1250	219.8

表 2 钢纤维水泥砂浆试件

编号	直径 (mm)	高度 (mm)	密度 (g/cm ³)	体积含量 (%)
4 号	50.07	148.35	2.20	0.5
7 号	49.67	149.34	2.21	0.5
1 号	50.13	149.30	2.23	1.0
2 号	50.14	148.50	2.24	1.0
5 号	50.28	148.75	2.36	3.0

1.2 实验设备及方法

声波实验主要进行三种频率的测试,选用主频分别为 50kHz、300kHz 和 1MHz 的平面探头。每种频率都有发射探头和接收探头,发射探头含有一个纵波压电陶瓷传感器,发射纵波;接收探头含有一个纵波压电陶瓷传感器和两个横波压电陶瓷传感器,分别接收纵波(P 波)和两个横波(S1 波和 S2 波),三个波相互垂直。采用中心频率为 25kHz、时间分辨率为 $0.2\mu\text{s}$ 的岩海 RST01C 声波检测仪连接发射探头发射信号。采用 Tektronix TDS5034B 数字示波器记录波形。

实验在中国科学技术大学工程实验中心 MTS810 试验系统上进行。图 1(a)为实验时照片,图 1(b)为实验示意图。按图 1(b)所示,发射和接收探头分别埋置在上下两个承压筒内,发射探头放置在试样和上压头中间,同时接声波仪与示波器 CH1 控制触发信号;接收探头放置在试样和下压头中间,P 波、S1 波和 S2 波接头分别连接示波器 CH2、CH3 和 CH4 三个通道。在试件表面十分平整时,探头和试件之间用凡士林进行耦合;一般情况下,在试件和探头间垫入 0.5~1mm 厚的铝箔。加载前,先测量在无载荷作用下的纵波和横波波速。MTS 加载时,每加载 0.67MPa 后暂停加载,发射一次声波,记录下 P 波和 S 波波形,并记录位移和载荷数据;重复此过程,一直加载到 10MPa。然后以一定载荷间隔进行卸载,记录卸载过程中的相应数据。卸载完成后,换一种频率重复上述过程。

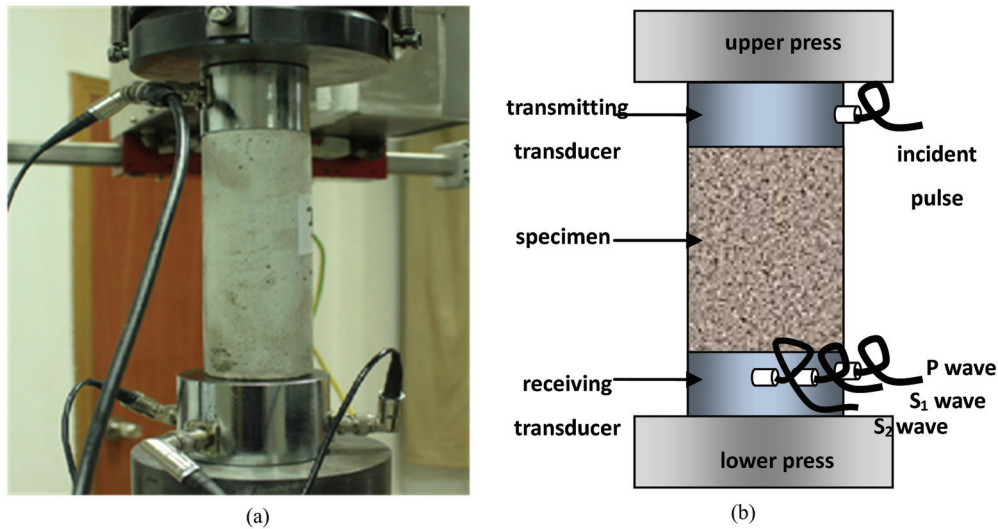


图 1 载荷作用下声波测试图(a 为照片, b 为示意图)

Fig. 1 Acoustic measurement of sample under loading (a is picture, b is schematic diagram)

1.3 实验波形和波速的确定方法

波速确定的关键在于准确地确定波在试件中的传播时间,相应的方法比较多,目前常用的是通过记录的波形,由波的起跳点来确定传播时间。但是,当声波在复杂介质中传播时,会与其内部的复杂微观结构发生作用,产生一定频率分布的复杂波系,所以有时很难判断波的起跳点。Li 等^[19]提出了一种非常有效的脉冲比较法(pulse echo overlap method, PEO),找出单一频率的入射信号和对应的单一频率的透射信号或反射信号脉冲,然后进行比对,找到最佳的覆盖模式,其对应的时间差即为波的传播时间。文献[11]在 EPS 混凝土的声波实验中进行了尝试,脉冲比较法可以得到较准确的传播时间,但处理起来比较麻烦。本文将以小波分析为主、脉冲比较法为辅对波形进行分析。对于比较难确定起跳点的波形,采用脉冲比较法,而对于起跳点比较容易确定的数据则采用小波分析。

图 2(a)和(c)分别为实验中示波器记录的 P 波和 S 波波形图,对应频率 300kHz。由图可见:由于钢纤维增强水泥砂浆材料内部含有钢纤维、水泥基体材料、孔洞等多种复杂分布的结构,声波与这些复杂结构作用,产生较复杂的“频散”波形,因此,接收到的波形除了包含有与入射主频相同的波之外,还含有其他频率的波;同时,由于试样内部这些复杂的细观结构存在,材料中传播的波几乎没有单纯的 P 波或 S 波,三个探头探测得到的都是 P 波与 S 波耦合的波形,只不过 P 波探头测得的波形以 P 波为主,而 S 波探头测得的波形以 S 波为主。由此,可参考震相识别的一般原则:纵波波速快,振幅小;横波速度慢,振幅大。结合小波分析方法,在复杂波系中提取某一主频范围的 P 波或 S 波进行分析。分析结果见图 2(b)和(d),由此可见:虽然所测波形中频率具有一定的分布特性,使得原始波形比较复杂,但经过小波分析后,可得到具体关注的频率范围内比较容易识别的波形。

2 实验结果初步分析

由上述方法处理得到的三种不同钢纤维体积含量的水泥基复合材料的 P 波波速与 S 波波速随载荷变化的曲线如图 3 所示。由于三种不同钢纤维体积含量的实验曲线归在一个图中比较杂乱,不易比较,图中只列出了两种不同体积含量的实验曲线。图中 4#、7# 试件为钢纤维体积含量 0.5% 的试样,5# 为钢纤维体积含量 3.0% 的试样。由图 3(a)可见:在初始加载阶段,P 波波速随载荷增大而明显增大。这表明:水泥砂浆中存在的孔洞等缺陷,随着压力增大,逐渐压缩闭合,同时水泥砂浆基体也有较大压缩量,随着压力增大被压缩变形。必须注意的是,钢纤维由于刚度大,在压缩过程中几乎不变形,钢纤维相对体积含量随着压力增大略有增加。孔洞的压缩闭合和钢纤维相对体积含量的增加共同促使了波速的增大。外载荷达到 5MPa 以后,P 波的增加趋势变得不是很明显,此时水泥砂浆已处在相对密实状态。图 3(b)中的 S 波也有类似规律。

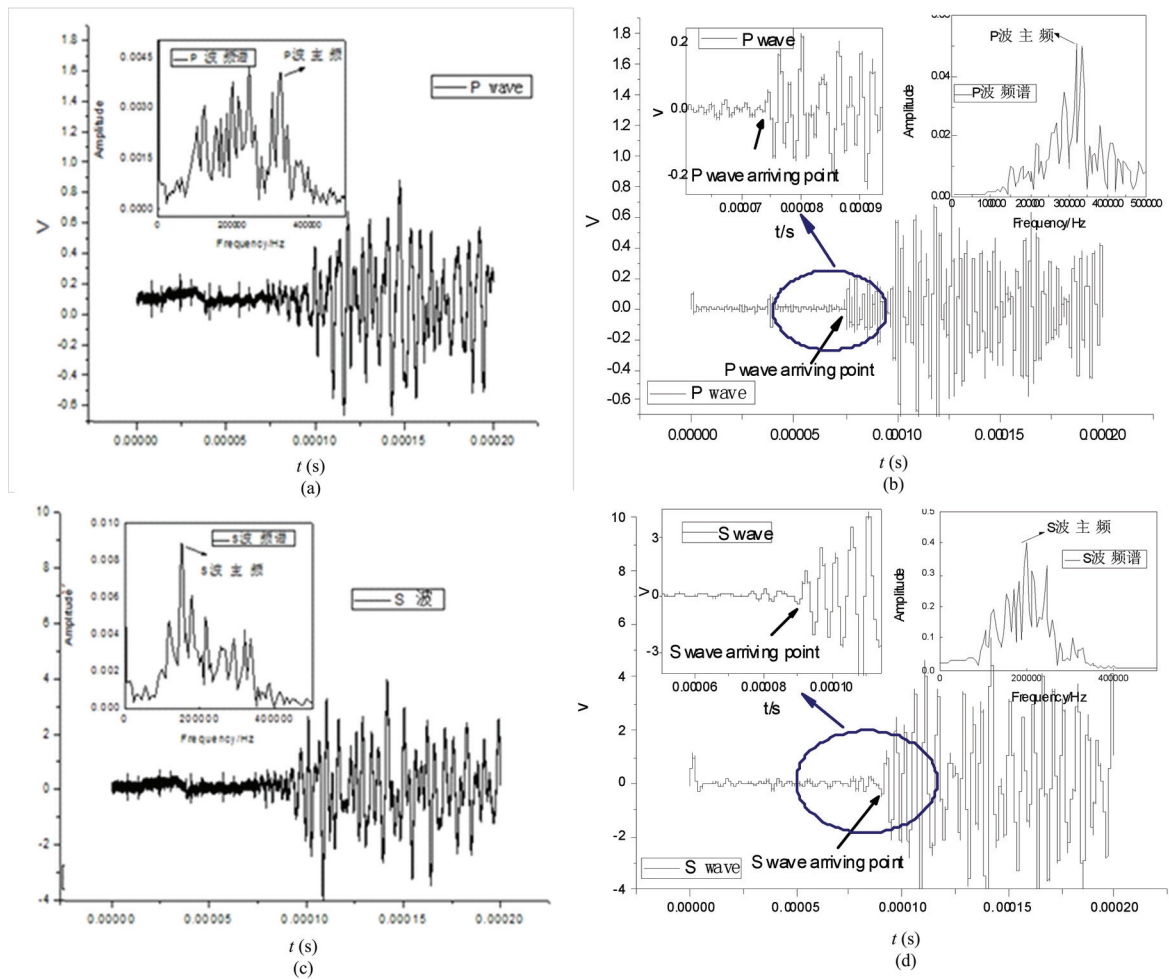


图 2 实验波形及波形处理

Fig. 2 Experimental wave profiles and waveform processing

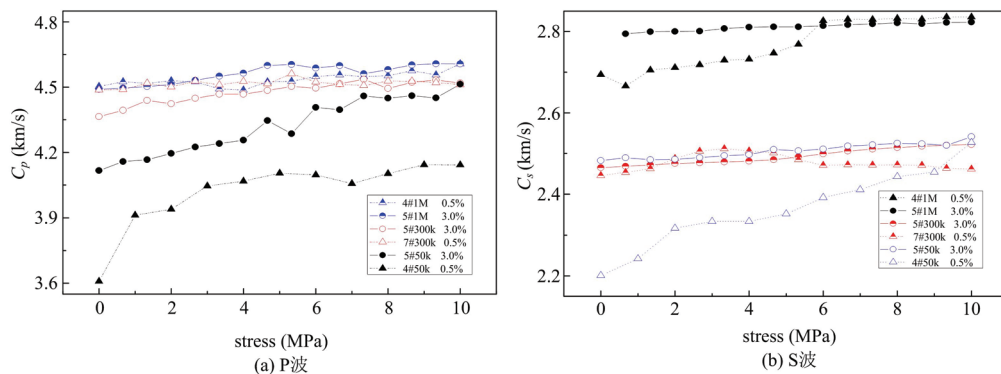


图 3 试件波速与载荷的关系

Fig. 3 Relationship of wave velocity to pressure of the sample

进一步,对图 3 中同种频率不同钢纤维体积含量试件中的 P 波和 S 波进行对比说明。例如,5#试件与 4#试件 1MHz 下的 P 波、5#试件与 4#试件 50kHz 的 S 波对比,可以看到 3.0% 体积含量的试件波速大于 0.5% 体积含量的波速,表明钢纤维体积含量增大可以提高复合材料的波速。比较同种钢纤维含量不同频率下的 P 波和 S 波波速,以 5#试件为例,可以明显看到频率越高,波速越大。这与理论上的“频散效应”是一致的。值得注意的是,钢纤维体积含量较大时,水泥砂浆中孔洞的含量有一定程度增加。这使得实际测试中 3.0% 钢纤维体积含量的试件中波速有些大于 1% 体积含量的波速,有些小于 1% 体积含量的波速。

值得注意的是,图 3 中未列出卸载过程两类波速随卸载载荷的变化曲线。这两类曲线的变化规律与文献[11]中所列 EPS 混凝土类似,即卸载过程两类波速变化曲线与加载曲线非常接近,但略高于加载曲线。其原因在于加载过程试件中部分缺陷被压密实,而在卸载过程这些缺陷无法恢复到初始状态,因此,卸载过程试件的波速要略高于加载过程的波速。

总之,图 3 基本反映了“频散效应”的规律,但有些数据与此规律不相符,其原因比较复杂。文献[11]考虑到加载历史的影响,引入了一种相对波速的方法。下面进行分析。

3 相对波速的频散特性

图 4 为试件的应力应变曲线,表 3 列出了各试件相应的加载历史。由此可见:5# 试件进行频率为 300kHz 实验、2# 试件进行频率为 300kHz 实验、4# 试件进行频率为 50kHz 实验时,这些试件都是经历第一次加载,应力应变曲线斜率相对平缓,但是在这三个试件经历第二次压缩后,其应力应变曲线表现出一定压实特性;7# 试件进行 300kHz 实验与 1# 试件进行 50kHz 实验的测试虽然只经历了一次压缩,但表现出试样间较大的差异性。因此,为了消除试样差异和加载历史的影响,采用相对波速的方法,即将波速与压缩状态联系在一起更好地对波速进行分析。此方法引入一个与试件当前压缩状态有关的量,即平均声速(C_u),然后将实际测到的弹性波波速与试件当前平均声速进行对比,其比值即为相对波速。 C_u 可结合图 4 的试件压缩过程曲线进行计算,即: $C_u = \sqrt{E_s/\rho_0}$, 其中 E_s 为压缩过程曲线上相应载荷对应的斜率,即为切线模量; ρ_0 为试件的初始密度。

表 3 加载次序
Tab. 3 Loading sequence

试件	第一次加载	第二次加载	第三次加载
1#	50kHz		
2#	300kHz	1MHz	
4#	50kHz	1MHz	
7#	300kHz		
5#	300kHz	1MHz	50kHz

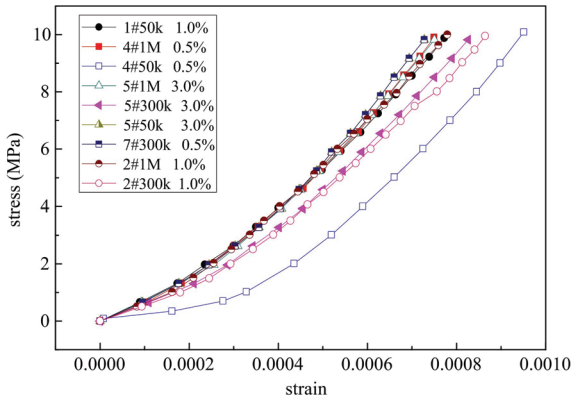


图 4 应力应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curve

采用相对波速的方法,对实验数据进行重新整理,其结果见图 5。由此可见:同一种钢纤维体积分含量的试件,其相对波速基本上随着频率增大而增加的,反映出明显的“频散效应”;同一种钢纤维体积分含量的试件,同一频率下的相对波速随着载荷增大而减小,最终趋于一个稳定的值,比较三种体积分含量的试件,其曲线趋于的最终值都大约在 1.6 左右,这个值一定程度上反映了压紧状态下材料内部细微观结构对动载荷的响应特性。文献[11]所研究的三种 EPS 体积分含量的 EPS 混凝土,其稳定值在 3.0 左右。在这个意义上,以材料的当前压缩性能作为参考的相对波速,剔除材料微结构压缩变形本身对波速的影响,而保留了材料微结构对弹性波的频散效应,因此,此相对波速可以有效地进行材料微结构的描述。

为进一步明确问题,图 6 对同种频率下不同钢纤维体积分含量的相对波速进行了对比。以 1MHz 频率下的实验为例:三种钢纤维体积分含量试件的波速比较接近,钢纤维体积分含量为 3% 和 1% 的试件的相对波速总体上略高于钢纤维体积分含量 0.5% 的试件。由于钢纤维体积分含量较高时,按常规振捣程序,试件中所含孔洞等缺陷相对较多,因此,钢纤维体积分含量为 3% 的试件密度的增加比其理论计算的增加量要小,导致其实际的波速的增加量也不大。此实验结果表明:按常规振捣工艺,当钢纤维含量 1% 时,材料的相对波速最高。当然,采取改进的振捣工艺,可以提高钢纤维体积分含量较高时试件的相对波速。

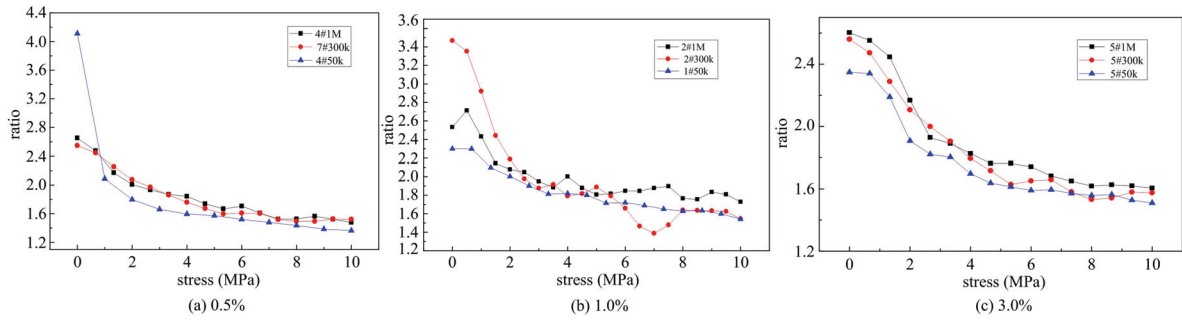


图 5 同种钢纤维体积含量不同频率下相对波速与压力的关系

Fig. 5 Relationship of relative velocity to pressure of sample having the same volume fraction of steel inclusion under different frequencies

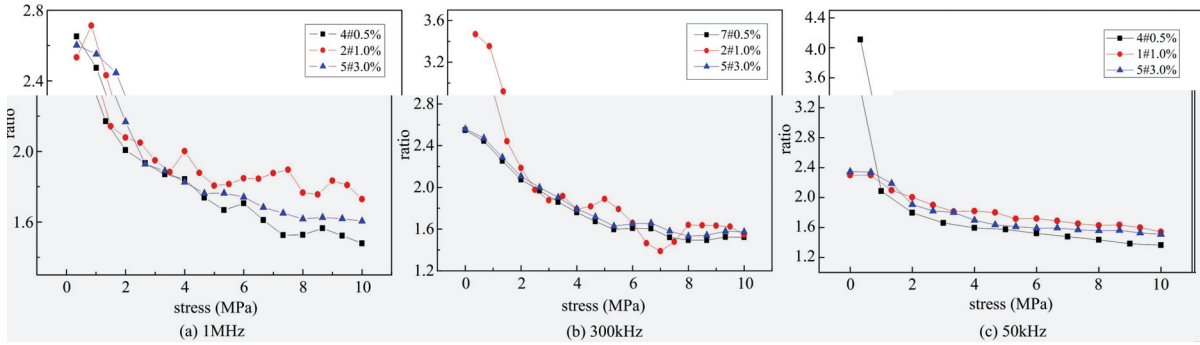


图 6 同种频率不同体积含量相对波速与压力的关系

Fig. 6 Relationship of relative velocity to pressure of sample having different fractions of steel inclusions under same frequency

4 外载荷作用下水泥复合材料中的相对波速分析

钢纤维增强水泥砂浆由水泥胶结钢纤维和骨料形成,由于相互间实际的胶结程度存在差异,因此理论分析中需要予以考虑。此处借用岩石中对多种矿物成分的一些较成熟的处理方法,Avesth 等^[20]提出了胶结模型和未胶结模型结合的形式,引入 Dvorkin 等^[17]的接触胶结模型和疏松砂岩模型,通过调节两者所占比重,分析了不同胶结程度的岩体中的波速。但是实验中钢纤维水泥砂浆试件孔隙率较低,Avesth 理论中的接触胶结模型并不适用。因此,未胶结模型采用 Dvorkin 等^[17]提出的 Hertz-Mindlin 模型与 Hashin-Shtrikman 下边界相结合的形式,而胶结模型采用适用低孔隙度增加的胶结模型——Hashin-Shtrikman 上限模型^[18];然后采用文献[11]的一种关于波速的半理论公式,进行频散中相对波速的计算。

(1) 未胶结模型

先使用 Hertz-Mindlin 模型计算多组分的等效体积模量 K_{HM} 和剪切模量 G_{HM} :

$$K_{HM} = \sqrt[3]{\left[\frac{C^2 (1 - \phi_0)^2 G^2}{18 \pi^2 (1 - \nu)^2} P \right]} \quad (1)$$

$$G_{HM} = \frac{5 - 4\nu}{5(2 - \nu)} \sqrt[3]{\left[\frac{3 C^2 (1 - \phi_0)^2 G^2}{2 \pi^2 (1 - \nu)^2} P \right]} \quad (2)$$

式中, C, ϕ_0 分别为临界的配位数和临界的孔隙率; P 为静水压; G 为单一组分的剪切模量; ν 为材料的泊松比。配位数 C 为压力的函数,其经验公式可参见文献[21]第 5 章。

再将 K_{HM}, G_{HM} 代入 Hashin-Shtrikman 下边界求得不同孔隙度下的有效体积模量 K_{eff} 和剪切模量 G_{eff} :

$$K_{eff} = \left[\frac{\phi/\phi_0}{K_{HM} + \frac{4}{3} G_{HM}} + \frac{1 - (\phi/\phi_0)}{K + \frac{4}{3} G_{HM}} \right]^{-1} - \frac{4}{3} G_{HM} \quad (3)$$

$$G_{eff} = \left[\frac{\phi/\phi_0}{G_{HM} + \frac{G_{HM}}{6} \frac{9K_{HM} + 8G_{HM}}{K_{HM} + 2G_{HM}}} + \frac{1 - (\phi/\phi_0)}{G + \frac{G_{HM}}{6} \frac{9K_{HM} + 8G_{HM}}{K_{HM} + 2G_{HM}}} \right]^{-1} - \frac{G_{HM}}{6} \frac{9K_{HM} + 8G_{HM}}{K_{HM} + 2G_{HM}} \quad (4)$$

式中, ϕ 为真实孔隙率; K 、 G 分别为颗粒的体积模量和剪切模量。

(2) 胶结模型

由于钢纤维增强水泥砂浆孔隙度很低, 在 10% 左右, 接触胶结模型不适用, 本文选用适用低孔隙率的胶结模型——Hashin-Shtrikman 上限模型, 计算得到有效体积模量 K^{HS+} 和有效剪切模量 G^{HS+} 。计算公式如下:

$$K^{HS+} = \Lambda(G_{max}) \quad (5)$$

$$G^{HS+} = \Gamma(\zeta(K_{max}, G_{max})) \quad (6)$$

式中,

$$\Lambda(z) = \left\langle \frac{1}{K(r) + \frac{4}{3}z} \right\rangle^{-1} - \frac{4}{3}z \quad (7)$$

$$\Gamma(z) = \left\langle \frac{1}{G(r) + z} \right\rangle^{-1} \quad (8)$$

$$\zeta(K, G) = \frac{G}{6} \left[\frac{9K + 8G}{K + 2G} \right] \quad (9)$$

式中, 括号 $\langle \rangle$ 表示对材料的平均, 即对各组分按其体积含量求加权平均。 K 、 G 分别为材料的体积模量和剪切模量。两种模型占的比重通过实验测得的体积模量来确定, 由公式(10)计算胶结模型占的比重 W 。

$$W = \frac{K_M - K_{unc}}{K_{cem} - K_{unc}} \quad (10)$$

式中, K_M 为实验测到的体积模量; K_{unc} 为未胶结模型的体积模量; K_{cem} 为胶结模型的体积模量。

由式(11)与式(12)可得到钢纤维增强水泥砂浆中等效的体积模量 K^* 和剪切模量 G^* :

$$K^* = W * K_{cem} + (1 - W) * K_{unc} \quad (11)$$

$$G^* = W * G_{cem} + (1 - W) * G_{unc} \quad (12)$$

式中, G_{unc} 为未胶结模型的剪切模量; G_{cem} 为胶结模型的剪切模量。

由此可计算等效介质的波速:

$$C_u = \sqrt{\frac{K^* + \frac{4}{3}G^*}{\rho}} \quad (13)$$

式中, ρ 为复合材料的密度。

根据式(13)得到钢纤维水泥砂浆的等效波速。由此, 可基于半理论公式(14)计算不同频率下钢纤维水泥砂浆中的波速:

$$\frac{c(\omega) - c_0}{c_u - c_0} = [1 + (\omega/\omega_c)^{c_0/(c_0 - c_u)}]^{-(\pi - \arctg \Phi)} \quad (14)$$

式中, $c(\omega)$ 为材料的波速; ω 为圆频率。特征频率 $\omega_c = c_0/(2\pi D_0)$, D_0 为材料中散射体的特征尺寸, 此处为孔隙的平均尺寸; C_0 为没有缺陷时材料的波速; C_u 为含缺陷材料的等效介质波速, 此处可由式(13)计算得到。 Φ 为含缺陷材料中的缺陷率, 此处取为孔隙率。模拟计算时, 所用具体参数如表 4 所示。由于实际水泥基复合材料的孔洞具有一定的分布特征, 表 4 中列出了两种分布较大的孔洞特征尺寸, 实际计算中对两种特征尺寸均进行了计算。

表 4 计算所用参数
Tab. 4 Calculating parameter

	0.5%	1.0%	3.0%
孔隙率 ϕ	0.0493	0.0502	0.0626
密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.20	2.24	2.36
水泥砂浆体积模量 K_1 (GPa)	28.98		
水泥砂浆剪切模量 G_1 (GPa)	15.75		
钢纤维体积模量 K_2 (GPa)	175.00		
钢纤维剪切模量 G_2 (GPa)	80.77		
特征尺寸 D_{01} (mm)	0.40		
特征尺寸 D_{02} (mm)	2.00		

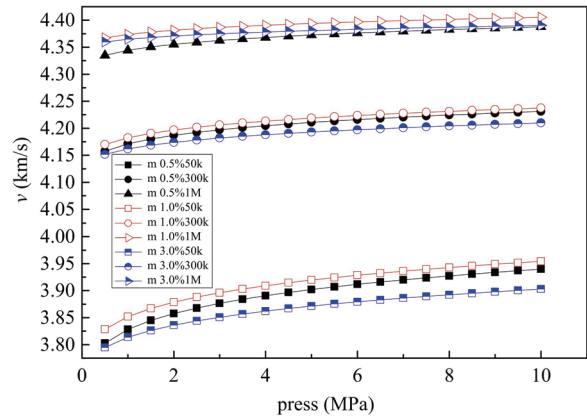


图 7 不同钢纤维体积含量不同频率下波速与压力的关系
Fig. 7 Relationship of relative velocity to pressure of sample with different fractions of steel inclusions under different frequencies

图 7 所示为计算得到的不同钢纤维含量试件的波速与压力的关系。由图可见:声波波速随着压力增大逐渐增大,在初始加载阶段增加较快,到一定载荷时,增加趋势减缓,这与实验结果相符。但相对实验结果而言,计算结果中波速的增加幅值偏小。同种钢纤维体积含量下,50kHz 频率实验结果中试件的波速最小,随着频率增加,波速增大,这反映了很好的“频散效应”。

图 8 所示为取钢纤维体积含量 0.5% 和 3% 两种试件在不同频率下相对波速的实验结果和模拟结果的对比。可见,模拟的结果定性上和实验结果是一致的。这表明模型一定程度上能反映出材料在压力作用下的压实效应和“频散效应”。但从定量上分析,模拟结果相对实验结果整体偏小,波速的改变趋势也偏小。其原因是:此模拟只是从宏观的角度考虑孔洞和钢纤维对波速的影响,未从细观角度考虑孔洞及钢纤维结构和分布在载荷作用下的相互作用差异;为计算方便,模拟计算中 D_0 取的是平均尺寸,因此只考虑了单一特征尺寸,而真实材料中孔洞的尺寸分布从微米量级到毫米量级都有,占的比重也不同,因此为得到更好的模拟机制和拟合结果,需要更加深入地进行细观结构、孔洞尺寸分布等对外荷载响应方面的探讨和研究。

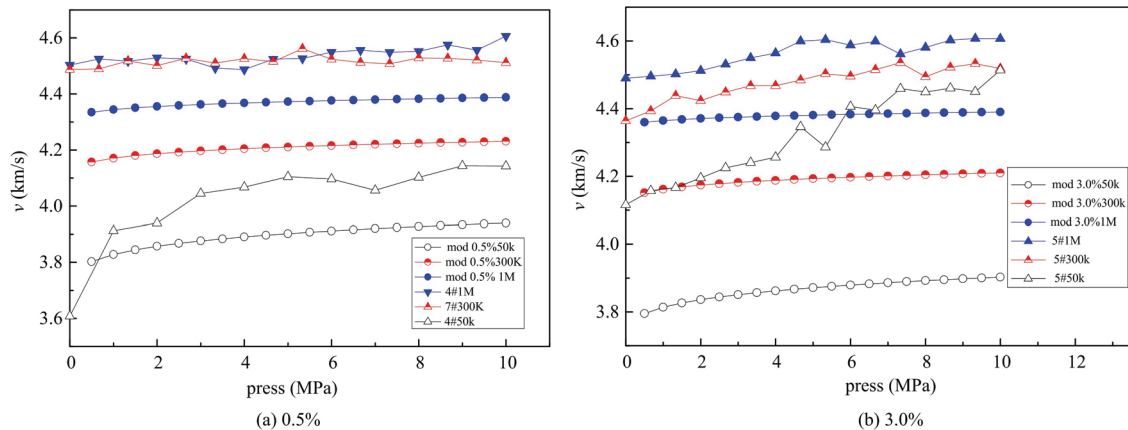


图 8 模拟结果与实验结果对比

Fig. 8 Comparison of simulation results and experiment results

5 结论

为研究钢纤维增强水泥砂浆复合材料这种既有孔洞又有钢纤维填充的复合材料中弹性波的传播特性,在载荷作用下对不同钢纤维体积分含量的试件进行不同频率的测试,并对比不同钢纤维体积分含量不同频率下的 P 波 S 波以及相对波速。采用胶结模型和未胶结模型结合的形式,引入一种无量纲理论公式

来探讨波速与载荷和频率的关系。结果表明:

(1) P波在载荷作用的初始阶段,随着载荷增大有着明显增大趋势;进入压密阶段,幅值增加减小。S波也有相似规律,但相对增幅没有P波明显。

(2) 运用相对波速的方法,即将试件当前的压缩状态作为参考,来研究非线性压缩过程中试件弹性波的传播,能更好地揭示波速与载荷和频率的关系。钢纤维和孔洞等缺陷共同影响着弹性波在试件中的传播速度。钢纤维体积含量1%是一个目前振捣技术下的最佳含量,其相对波速最佳。相对波速的方法能更好地反映试件对当前载荷的动态响应和内部细微结构变化。

(3) 采用胶结模型和未胶结模型结合的形式来考虑压力作用下缺陷材料中等效的波速,结合半理论的无量纲公式探讨了波速和压力与频率的关系。模拟结果表明,此种分析方法定性方面是可行的。更可靠的定量分析还需要深入考虑细观结构、孔洞尺寸分布等对外荷载响应。

参考文献:

- [1] Eren Ö, Marar K, Çelik T. Effects of silica fume and steel fibers on some mechanical properties of high-strength fiber-reinforced concrete[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1999, 27(6):380—387.
- [2] Barros J A O. Steel fibre reinforced concrete: Material properties and structural applications[J]. *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications*, 2011, 95:216—387.
- [3] Furgason E S, Newhouse V L, Bilgutay N M, et al. Application of random signal correlation techniques to ultrasonic flaw detection[J]. *Ultrasonics*, 1975, 13(1):11—17.
- [4] 傅竹武, 王鑫. 混凝土构件缺陷超声无损检测的研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(S1):783—788 (FU Zhuwu, WANG Xin. A study of ultrasonic nondestructive testing detecting the defects of concrete components[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(S1):783—788(in Chinese))
- [5] Shah A A, Ribakov Y, Hirose S. Nondestructive evaluation of damaged concrete using nonlinear ultrasonics[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(3):775—782.
- [6] Voigt T, Ye G, Sun Z, et al. Early age microstructure of Portland cement mortar investigated by ultrasonic shear waves and numerical simulation[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(5):858—866.
- [7] 陈华艳. 超声波检测在钢纤维混凝土中的应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2005 (CHEN Huayan. Application of ultrasonic detection in experiments of steel fiber concrete[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005(in Chinese))
- [8] Acebes M, Molero M, Segura I, et al. Study of the influence of microstructural parameters on the ultrasonic velocity in steel-fiber-reinforced cementitious materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(7):3066—3072.
- [9] 邓向允, 徐松林, 李广场, 等. 缺陷对玄武岩中声波波速影响的试验研究[J]. *实验力学*, 2009, 24(1):13—20 (DENG Xiangyun, XU Songlin, LI Guangchang, et al. Experimental study of defect effect on sonic velocity in basalt[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(1):13—20(in Chinese))
- [10] 邓向允, 徐松林, 李广场, 等. 玄武岩中裂隙分布形式对声波传播的影响[J]. *实验力学*, 2009, 24(5):421—426 (DENG Xiangyun, XU Songlin, LI Guangchang, et al. Study of crack distribution effect on sound wave propagation in basalt[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(5):421—426(in Chinese))
- [11] 徐松林, 方春艳, 周伟达, 等. 载荷作用下EPS混凝土中弹性波传播特性研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(7):69—75 (XU Songlin, FANG Chunyan, ZHOU Weida, et al. Investigation of elastic wave propagation in EPS concrete under compression loading[J]. *Chinese Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(7):69—75 (in Chinese))
- [12] Aggelis D G, Polyzos D, Philippidis T P. Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental results[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(4):857—883.
- [13] 徐松林, 郑文, 刘永贵, 等. 岩体中弹性波传播尺度效应的初步分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(9):1348—1356 (XU Songlin, ZHENG Wen, LIU Yonggui, et al. A preliminary analysis of scale effect of elastic wave propagation in rock mass[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(9):1348—1356 (in Chinese))

- [14] 谭子翰, 徐松林, 刘永贵, 等. 含多种尺寸缺陷岩体中的弹性波散射[J]. 应用数学和力学, 2013, 34(1):38—48 (TAN Zihan, XU Songlin, LIU Yonggui, et al. Scattering of elastic waves by multi-size defects in rock mass[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2013, 34(1):38—48(in Chinese))
- [15] Tang Z P, Xu S L, Dai X Y, et al. S-wave tracing technique to investigate the damage and failure behavior of brittle materials subjected to shock loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(9):1172—1191.
- [16] 徐松林, 唐志平, 张兴华. 钢纤维增强水泥砂浆压剪联合冲击下动态剪切性能[J]. 工程力学, 2006, 23(5):139—146 (XU Songlin, TANG Zhiping, ZHANG Xinghua. Dynamic shear properties of steel fiber reinforced cement under combined pressure and shear impact loading[J]. Chinese of Journal of Engineering mechanics, 2006, 23(5): 139—146(in Chinese))
- [17] Dvorkin J, Prasad M, Sakai A, et al. Elasticity of marine sediments; rock physics modeling[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(12):1781—1784.
- [18] 杜善义, 王彪. 复合材料细观力学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 44—51 (DU Shanyi, WANG Biao. Mesomechanics of composites[M]. Beijing: Science Press, 1998: 44—51(in Chinese))
- [19] Li B, Kung J, Liebermann R. Modern techniques in measuring elasticity of earth materials at high pressure and high temperature using ultrasonic interferometry in conjunction with synchrotron X-radiation in multi-anvil apparatus[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2004, 143-144:559—574.
- [20] Avseth P, Mukerji T, Mavko G. 定量地震解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 39—40 (Avseth P, Mukerji T, Mavko G. Quantitative seismic interpretation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 39—40 (in Chinese))
- [21] 葛瑞·马沃可, 塔潘·木克基, 杰克·德沃金. 岩石物理手册: 孔隙介质中地震分析工具[M]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008 (Gray Mavko, Tapan Mukerji, Jack Dvorkin. The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008 (in Chinese))

Analysis of Elastic Wave Velocity in Steel Fiber Reinforced Cement Mortar Composite Subjected to External Compression Loading

ZHOU Wei-da, ZHANG Ming, XU Song-lin, SHAN Jun-fang, SHI Chun-ying, WANG Peng-fei
(University of Science and Technology of China, CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, Hefei 230027, China)

Abstract: In order to study the frequency dispersion characteristics of elastic wave in cement matrix composite, adopting three kinds of acoustic probe with main frequency of 50kHz, 300kHz and 1MHz respectively, elastic wave measurement was carried out for steel fiber reinforced cement mortar specimens with three different steel fiber volume contents of 0.5%, 1.0% and 3% and subjected to uniaxial compression. Results show that on the initial stage of loading, with the increase of loading, P wave velocity increases obviously. But this trend is gradually weakening and finally P wave velocity achieves a relatively stable value. With the increase of steel fiber volume content, wave velocity presents increasing trend. S wave has similar trend, but its increase amplitude is much smaller than that of P wave. All three kinds of material present certain frequency dispersion. In order to eliminate material nonlinear effect in the initial loading process, the relative velocity was adopted, and the frequency dispersion effect of relative velocity was discussed. Combining with multi component unconsolidated model and Hashin-Shtrikman upper bound model and adopting a theoretical dimensionless model, elastic wave velocity frequency dispersion was comparatively analyzed.

Keywords: elastic wave; steel fiber reinforced cement mortar; P wave; S wave; loading; relative wave velocity