



钢纤维混凝土声弹性系数与体积掺量的关系

徐 浩, 杨 予, 王 毅, 包 挺, 胡光晓

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 为研究钢纤维混凝土纵波声弹性系数与钢纤维体积掺量之间的相关性,进行了单轴受压状态下的纵波声弹性系数测量实验。混凝土试件钢纤维体积掺量分别取 0、0.6%、1.2%、1.8%,并利用特制夹具测量加载方向上与垂直于加载方向上的声弹性系数。对测量数据的拟合结果表明:钢纤维混凝土的声弹性系数受钢纤维体积掺量影响,其中 0.6% 体积掺量的钢纤维混凝土声弹性系数最小;加载方向上的声弹性系数随钢纤维体积掺量的变化趋势与垂直于加载方向上的一致。实验结果验证了利用声弹性系数来判断钢纤维的体积掺量的可行性,通过测量垂直于加载方向上的声弹性系数可以估计钢纤维混凝土中钢纤维的掺量,为钢纤维混凝土的超声诊断提供参考。

关键词: 钢纤维混凝土; 体积掺量; 声弹性系数; 无损检测; 超声波波速

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2022)03-0231-07

Relationship between acoustic elasticity coefficient and volume fraction of steel fiber reinforced concrete

XU Hao, YANG Yu, WANG Yi, BAO Ting, HU Guangxiao

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang
Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to study the correlation between the acoustic elasticity coefficient of longitudinal wave in steel fiber reinforced concrete and the volume fraction of the steel fiber, the longitudinal wave acoustic elasticity coefficient under uniaxial compression was measured. The volume fraction of steel fiber in the concrete specimens was taken as 0, 0.6%, 1.2% and 1.8%, and acoustic elasticity coefficient in the loading direction and perpendicular to the loading direction was measured with a special fixture. The fitting results of the measured data show that the acoustic elasticity coefficient is affected by the volume fraction of steel fiber, and the acoustic elasticity coefficient of SFRC with 0.6% volume fraction has the smallest value. The change trend of the acoustic elasticity coefficient in the loading direction with the volume fraction of steel fiber is consistent with that perpendicular to the loading direction. The experimental results have verified the feasibility of using the acoustic elasticity coefficient to judge the volume fraction of steel fiber. By measuring the acoustic elasticity coefficient perpendicular to the loading direction, the content of steel fiber in steel fiber reinforced concrete can be estimated, which can provide a reference for ultrasonic diagnosis of steel fiber reinforced concrete.

Key words: steel fiber reinforced concrete; volume fraction; acoustic elasticity coefficient; nondestructive test; ultrasonic velocity

收稿日期: 2021-06-04 网络出版日期: 2021-09-18

基金项目: 住房和城乡建设部项目(2016-K5-045)

作者简介: 徐 浩(1995—), 男, 浙江仙居人, 硕士研究生, 主要从事混凝土结构工程方面的研究。

通信作者: 杨 予, E-mail: yangyu@zstu.edu.cn

0 引 言

随着建筑行业的快速发展,人们对土木工程材料的性能提出了更高的要求。混凝土是一种应用范围广的建筑材料,但存在脆性大、抗拉强度低以及抗剪强度低和延性较低等缺点,不能满足高烈度地震区和某些特殊建筑结构的要求^[1]。此外,由于混凝土的抗拉强度低,受拉区容易产生裂缝,使得混凝土的碳化速度加快,导致结构的承载力和使用寿命下降^[2]。因此,近年来混凝土向高强、高韧性方向发展,而通过添加钢纤维来小幅提高混凝土的抗拉、抗裂、抗弯、抗冲击性能以及韧性和耐久性^[1-6]已成为工程应用中的常见方法。

钢纤维的类型、分布、尺寸和掺量都会对混凝土的性能造成一定的影响。例如:Wu等^[7]对钢纤维类型进行了研究,发现端钩型钢纤维对混凝土抗拉强度的增强效果比直线型钢纤维更明显;姬小祥等^[8]也对钢纤维类型进行了研究,发现铣削型钢纤维混凝土的劈裂抗拉强度和拉压比要比端钩型和压痕型的大;曹玉新^[9]发现,哑铃型和波浪型钢纤维混凝土的拌和性能较好;周乾等^[5]发现,掺长钢纤维的混凝土韧性高于掺短钢纤维的混凝土;慕儒等^[10]对钢纤维的分布情况进行了研究,发现当钢纤维体积掺量相同时,相同配合比条件下单向分布钢纤维混凝土的劈裂抗拉强度和弯曲抗拉强度明显高于普通的钢纤维混凝土。同时,国内外学者对钢纤维混凝土掺量与力学性能之间的关系进行了大量研究。例如:白敏等^[11]对水胶比为 0.45 的不同掺量的钢纤维混凝土进行了研究,发现抗折强度随钢纤维体积掺量增加而增大,劈裂强度在钢纤维体积掺量为 1.5%时达到最大;陈从春等^[12]分析了钢纤维体积掺量对超高性能混凝土(UHPC)力学性能的影响,发现钢纤维的加入使得混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度都有一定程度的提高,且劈裂抗拉强度在钢纤维体积掺量为 1.0%~1.5%时增长最快,抗折强度在钢纤维体积掺量为 1.0%~2.5%时提高最为明显;Iqbal等^[13]发现,当钢纤维体积掺量从 0.50%增加到 1.25%,抗压强度下降了 7%,劈裂抗拉强度和抗弯强度分别增加了 18%和 70%,但弹性模量基本不变。综上所述,钢纤维体积掺量并不是越多越好,哪个掺量或掺量区间对混凝土力学性能的提升较大、实用性较高,还需进一步研究。

目前观察钢纤维混凝土内部缺陷以及钢纤维与

混凝土基体结合状况的常见方法可分为两类。第一类是有损检测方法^[14],例如张阳等^[15]对钢纤维混凝土进行切片,借助图像处理技术来观察内部构造。这类方法虽然直观准确,但在实际工程中显然较难实施。第二类是无损检测方法^[16],典型的无损检测方法有超声波法等,由于对结构构件不造成破坏,在实际工程中更具有应用价值。在钢纤维混凝土超声检测的相关研究中,Benaicha等^[17]发现,超声波波速与钢纤维混凝土抗压强度、抗弯强度和弹性模量之间存在相关性,可利用超声波波速对钢纤维混凝土的均匀性和密实性进行定性分析;陈华艳等^[18-19]、黄奕辉等^[20]发现:当钢纤维体积掺量从 0.2%增加到 1.4%时,超声波在混凝土中的传播速度和混凝土抗压强度均增大;而当钢纤维体积掺量从 1.4%增大到 2.0%时,由于混凝土和易性变差,硬化后的混凝土密实度降低,超声波波速和抗压强度也随之降低。这些研究表明,超声波波速能够反映钢纤维混凝土的力学性能,也能够反映钢纤维掺量的大小。但值得注意的是,上述研究均为在未加载应力的状态下直接测量波速,因而不能反映材料在加卸载循环中混凝土发生的微裂缝变化。

已有研究表明,声弹性系数可以反映应力与超声波波速之间的关系^[21-22]。Lillamand等^[21]利用特制夹具测量了轴向受压混凝土试件在加载方向的声弹性系数,在实验室条件下验证了采用超声波在混凝土结构中进行应力评估的可行性;Bompan等^[22]进一步研究了混凝土材料在加卸载循环条件下的声弹性系数与结构内部微裂缝的关系,从而验证了利用声弹性理论对混凝土材料的性状进行诊断的可行性。值得注意的是,Bompan等^[22]的实验结果表明,在初次加载测得的声弹性系数和后面多次加载测得的声弹性系数有较大的差别,原因是混凝土材料在经过初次加载后,其内部初始微裂缝会发生变化。由此可见,在未经加载的试件上测得的超声波的波速并不能很好地反映由加载引起的内部微裂缝变化。将上述研究给出的声弹性系数作对比还可知,在加载方向上采用超声纵波测得的声弹性系数比其他方向上的纵波或横波声弹性系数更大,即声弹性系数在加载方向上对波速的相对变化更为敏感,因而通过测量加载方向上的声弹性系数对材料性状有更好的反映。综上所述,建立纵波声弹性系数与混凝土材料中钢纤维的掺量之间的联系具有很好的理论意义和实用价值。

本文通过同时测量加载方向和垂直于加载方向

上的纵波声弹性系数,对比分析不同的钢纤维体积掺量对其造成的影响,并分析两个正交方向上声弹性系数的异同。该研究可为运用声弹性系数判断钢纤维掺量提供理论依据,为进一步探索采用超声波无损检测手段对钢纤维混凝土进行应力诊断提供参考。

1 理论基础

1937 年,Murnaghan^[23]提出了各向同性的非弹性体的三阶弹性常数;1953 年,Hughes 等^[24]基于有限变形理论和非线性弹性理论推导出各向同性材料在单轴荷载作用下的波速表达式:

$$\left\{\begin{aligned} \rho V_{11}^2 &= \lambda + 2G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2\ell + \lambda + \frac{\lambda + 2G}{G} (4m + 4\lambda + 10G) \right], \\ \rho V_{22}^2 &= \rho V_{33}^2 = \lambda + 2G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2\ell - \frac{2\ell}{G} (m + \ell + 2G) \right], \\ \rho V_{21}^2 &= \rho V_{31}^2 = G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{4G} + \lambda + 2G \right], \\ \rho V_{23}^2 &= \rho V_{32}^2 = G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m - \frac{\lambda + G}{2G} n - 2\lambda \right], \\ K &= \lambda + \frac{2}{3}G \end{aligned}\right. \quad (1)$$

其中: σ_{11} 表示轴向正应力; ρ 表示材料密度; λ 表示 Lamé 第一参数; m 、 n 、 ℓ 表示 Murnaghan 弹性常数; G 表示动态剪切模量或 Lamé 第二参数; K 表示体积模量; V_{ij} 表示沿 i 方向传播时在 j 方向偏振的波速值。声弹性理论阐明了超声波波速随应力变化的原因,而式(1)为声弹性理论的运用和发展奠定了重要的基础^[20-21]。Lillamand 等^[21]在该理论基础上进行了理论

与实验研究,得到式(1)的一阶线性简化形式:

$$\Delta V_{ij}^{\sigma} = \frac{V_{ij}^{\sigma} - V_{ij}^0}{V_{ij}^0} = A_{ij} \sigma_{11} \quad (2)$$

其中: ΔV_{ij}^{σ} 表示应力变化引起的波速变化量; V_{ij}^{σ} 表示在 σ 应力状态下的波速值; V_{ij}^0 表示 0 应力状态下的波速值; A_{ij} 表示材料声弹性系数。相关研究^[22,25]表明:随着混凝土所受压应力的增加,内部微小孔隙和微裂缝不断闭合,使得混凝土密实度提高,超声波波速也相应提高。由此可见,混凝土内部微小孔隙和微裂缝越多,波速随压应力增加的幅度越大,从而导致混凝土声弹性系数也越大。因此,声弹性系数的大小实际上反映的是材料可压缩性的大小。已有研究^[21-22,25]还表明,采用式(2)计算出的声弹性系数可以用于反映混凝土等建筑材料中发生的此类微观变化,因此本文根据式(2)开展钢纤维混凝土声弹性系数与体积掺量的关系研究。

2 实验

2.1 试件制备与仪器设备

试件制作采用的原材料如下:水泥为普通硅酸盐 P·O 42.5 级水泥;细骨料为普通河砂,颗粒级配为 2 区天然砂;粗骨料为 28~40 mm 碎石;拌合水为普通自来水;减水剂为聚羧酸高效减水剂,减水率 $\geq 25\%$,固体含量为 98%(粉状);钢纤维选用工程中较为常见的波浪型钢纤维,长度 36 mm,长径比为 60,抗拉强度 ≥ 400 MPa,截面形状为矩形。选用工程中应用广泛的 C40 混凝土,并以钢纤维体积掺量为参数(分别取 0、0.6%、1.2%、1.8%)制作试件。试件尺寸选用 150 mm×150 mm×550 mm。实验设计了水胶比相同,钢纤维体积掺量不同的四种混凝土,具体配合比见表 1。

表 1 钢纤维混凝土配合比

钢纤维 掺量/%	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	粗骨料/ (kg·m ⁻³)	细骨料/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ (kg·m ⁻³)	钢纤维/ (kg·m ⁻³)
0	190	441	946	873	1.3	0
0.6	190	441	946	873	1.3	46.8
0.8	190	441	946	873	1.3	93.6
1.8	190	441	946	873	1.3	140.4

混凝土的浇筑过程如下:将粗骨料、细骨料、水泥和减水剂依次加入搅拌机内搅拌 2 min,再分 3 次加入钢纤维,每次搅拌 1 min,待钢纤维与其他组分充分混合后,最后再加入水搅拌 2 min。整个浇筑过程中充分搅拌混凝土原料,以保证各组分分布均匀,避免泌水和离析现象。在试件浇筑完

毕 24 h 后拆模,在标准条件下养护满 28 d 后再进行测试。

实验仪器设备布置如图 1 所示。加载实验采用抗压加载仪器 YAR-2000 微机控制电液伺服压力试验机;波速测量设备选用 NM-4B 非金属超声波分析仪,换能器中心工作频率为 40 kHz。

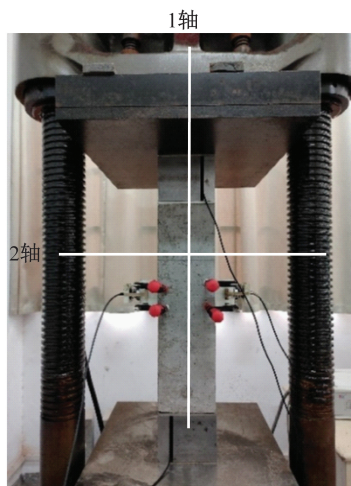
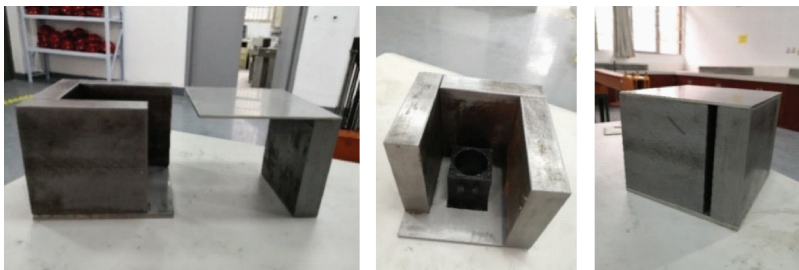


图 1 实验仪器设备布置照片



(a) 主体与盖板 (b) 换能器固定底座 (c) 组合完成的端头夹具

图 2 加载方向夹具照片



图 3 水平方向夹具照片

2.3 实验过程与数据测量

由于首次加载造成的微裂缝变化会对波速测量

2.2 夹具制作

实验设计的思路是在单轴加载条件下同时测量钢纤维混凝土试件在 1 轴(加载方向)及 2 轴(水平)方向上的超声纵波波速。为此本文制作了两套夹具,具体结构见图 2 和图 3。图 2 中的夹具为立方体受压构件,边长 150 mm,由 4 个铁块和 3 块钢板通过结构胶组成,固定于试件上下端(1 轴),且构件中间安装了用于固定换能器的底座。图 3 中的夹具由塑料底座和水平夹具构成,固定于中央水平平面(2 轴)。2 套夹具都通过弹簧对换能器进行相同压力的固定,以使各个换能器的测量条件一致,也可避免加压过程中换能器的偏移和松动造成测量误差。

造成较大影响^[21-22],故采用预加载的方式来消除。预加载时,对每个试件进行 10 个加卸载循环(每个循环以 1 kN/s 的速率预加载到 15%试件的设计抗压强度并维持加载 5 min 后再卸载),然后分别测量两个方向的零应力声时。正式加载时,以 0.5 kN/s 的速率依次加载到各级目标正应力(0.5,1.0,1.5,⋯,4.0 MPa),在每级压力加载稳定后测量对应声时,具体加载步骤见图 4。声时测量数据处理方法借鉴《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02: 2005),将每一压力等级所测得的 16 个数据,去除 3 个最小值和 3 个最大值,剩余数据取其平均值作为该压力等级的实验数据。

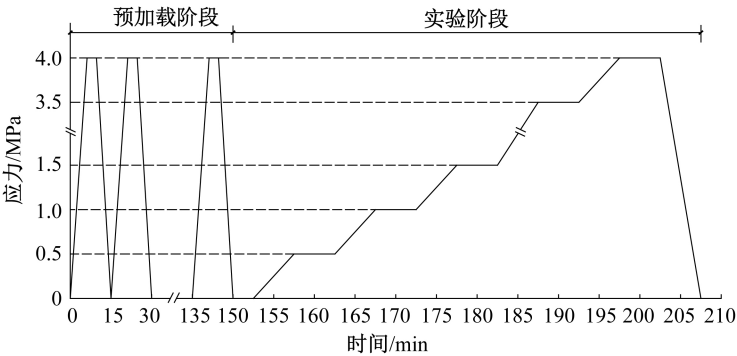


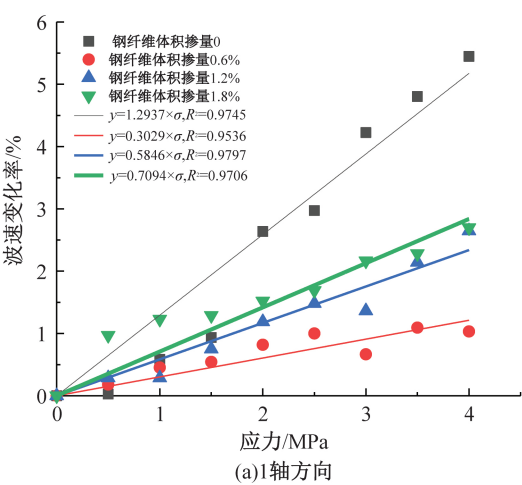
图 4 钢纤维混凝土单轴加载实验加载步骤

3 实验结果分析

3.1 声弹性系数

将式(2)进行移项可得：

$$A_{ij} = \frac{V_{ij}^{\sigma} - V_{ij}^0}{V_{ij}^0 \sigma_{11}} \tag{3}$$



再根据式(3)对加载正应力—波速变化率实验数据做线性拟合,以求出沿 1 轴和 2 轴的纵波声弹性系数 A_{11} 和 A_{22} ,将拟合得到的直线斜率作为对应试件的声弹性系数值^[21-22],1 轴和 2 轴方向钢纤维混凝土波速变化率与应力关系曲线见图 5。

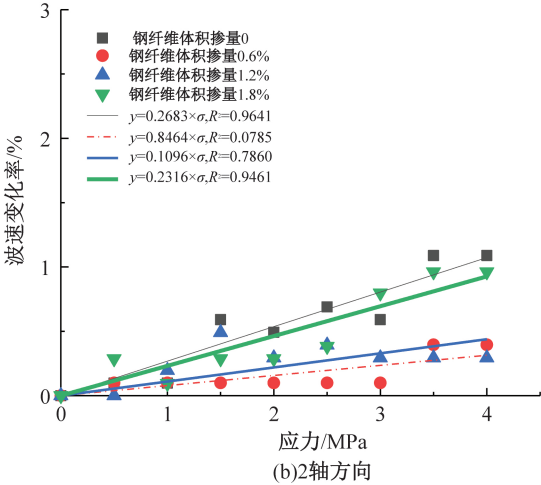


图 5 1 轴和 2 轴方向钢纤维混凝土波速变化率与应力关系曲线

由图 5 可知:两个方向上的钢纤维混凝土波速变化率均与加载正应力具有良好的相关性。素混凝土(0 掺量)两个方向上的声弹性系数 A_{11} 和 A_{22} 分别为 1.2937%/MPa 和 0.2683%/MPa,而钢纤维的加入使得声弹性系数发生相应变化:当钢纤维体积掺量从 0 增加到 0.6% 时, A_{11} 从 1.2937%/MPa 减少到 0.3029%/MPa, A_{22} 从 0.2683%/MPa 减少到 0.0785%/MPa;而钢纤维体积掺量从 0.6% 增加到 1.8% 时, A_{11} 从 0.3029%/MPa 增加到 0.7094%/MPa,

A_{22} 从 0.0785%/MPa 增加到 0.2316%/MPa,但仍小于 0 掺量的钢纤维混凝土的相应数值。

根据声弹性系数拟合结果可绘制钢纤维体积掺量与声弹性系数的关系直方图,如图 6 所示。由图 6 可知: A_{11} 的数值是 A_{22} 的 3~6 倍,与 Lillamand 等^[21] 和 Bompan 等^[22] 的研究结果相近,且两个正交方向上的声弹性系数随钢纤维体积掺量的增减趋势基本一致; A_{11} 和 A_{22} 均在钢纤维体积掺量为 0.6% 时达到最小。

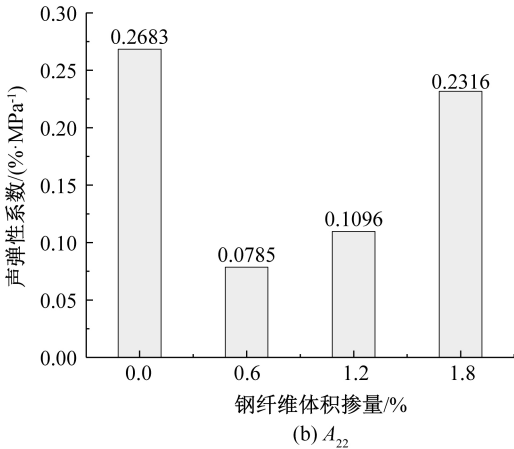
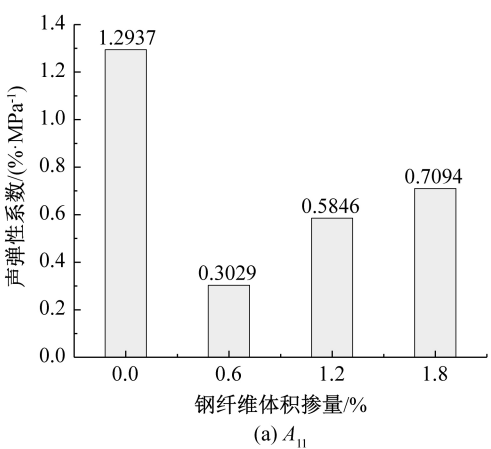


图 6 钢纤维掺量与声弹性系数(A_{11} 、 A_{22})的关系直方图

上述结果说明,在无法直接测得加载方向声弹性系数 A_{11} 的条件下,也可采用正交方向的声弹性系数 A_{22} 代替其作为混凝土中钢纤维掺量的判据。

此外,由钢纤维混凝土形成机理可知,由于钢纤

维与混凝土基体有良好的黏结作用,刚开始随着钢纤维的加入,混凝土的孔隙减少,密实度提高,但并不是掺量越高越好,孔隙在超过某个掺量值反而会增加^[16]。为此,不少学者进行了最优掺量的相关

研究,例如文献[18-19]建立了钢纤维混凝土抗压强度、超声波波速、回弹值三个参数与钢纤维掺量之间的关系曲线,得出钢纤维体积掺量的较优范围约为 $1.0\%\sim 1.4\%$ 。

本文实验结果表明,约 0.6% 体积掺量的钢纤维混凝土声弹性系数最小,该数值与文献[18-19]给出的钢纤维混凝土最优掺量的下限接近。考虑到声弹性系数能够反映加载后纤维混凝土内部微裂缝所发生的变化,本文结果有较好的实用参考价值。

4 结 论

为探究钢纤维混凝土声弹性系数与体积掺量之间的关系,本文利用超声纵波和特制夹具对不同钢纤维体积掺量的混凝土试件在单轴受压应力状态下的声弹性系数进行了研究,并同时测量加载方向与垂直于加载方向上的声弹性系数,初步分析了钢纤维掺量与声弹性系数之间的关系以及两个方向声弹性系数的变化规律,具体结论如下:

a) 钢纤维混凝土的钢纤维体积掺量与纵波声弹性系数具有良好的相关性,且对于本研究所用配合比的钢纤维混凝土,当钢纤维体积掺量取 0.6% 时声弹性系数最小。

b) 从 0.6% 进一步提高钢纤维体积掺量后,声弹性系数变大,可推知其内部可压缩微裂缝反而增加,因此体积掺量不是越大越好。

c) 由于两个方向上的声弹性系数具有相似的变化趋势,在无法测量声弹性系数 A_{11} 时,可通过测量 A_{22} 的办法来估计混凝土中钢纤维的掺量。

本文研究表明,利用声弹性系数来判断钢纤维混凝土的钢纤维体积掺量具有一定的可行性。但受客观条件限制,本文钢纤维混凝土试件数量较少,该方法应用到实际工程中时还需更多的实验来得出钢纤维的最优掺量。

参考文献:

[1] 梁兴文,胡翱翔,于婧,等.钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J].复合材料学报,2018,35(3):722-731.

[2] 张玉杰,陈炳聪,汪洋.钢纤维混凝土基本力学性能试验研究[J].混凝土,2020(4):74-77.

[3] 权长青,焦楚杰,杨云英,等.混杂纤维混凝土力学性能的正交试验研究[J].建筑材料学报,2019,22(3):363-370.

[4] 王立成,江培情,梁永钦.钢纤维混凝土双轴受压动态力学性能试验研究[J].建筑材料学报,2017,20(1):106-111.

[5] 周乾,王晓光,张亚仿,等.不同类型纤维混凝土韧性试验研究[J].建筑结构,2017,47(13):85-88.

[6] 马恺泽,刘亮,刘超,等.高强混合钢纤维混凝土的力学性能[J].建筑材料学报,2017,20(2):261-265.

[7] Wu H, Ren G M, Fang Q, et al. Effects of steel fiber content and type on dynamic tensile mechanical properties of UHPCC [J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 251-261.

[8] 姬小祥,张帆,邵景干.不同类型钢纤维混凝土力学性能室内试验分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):168-172.

[9] 曹玉新.钢纤维类型对钢纤维混凝土性能影响的试验研究[J].兰州交通大学学报,2019,38(6):1-8.

[10] 慕儒,李辉,王晓伟,等.单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(II):制备及钢纤维增强作用[J].建筑材料学报,2015,18(3):387-392.

[11] 白敏,牛荻涛,姜磊,等.钢纤维改善混凝土力学性能和微观结构的研究[J].硅酸盐通报,2013,32(10):2084-2089.

[12] 陈从春,冯毅,陈晓冬.钢纤维体积掺量对超高性能混凝土力学性能的影响[J].新型建筑材料,2016,43(5):54-56.

[13] Iqbal S, Ali A, Holschemacher K, et al. Effect of change in micro steel fiber content on properties of high strength steel fiber reinforced lightweight self-compacting concrete (HSLSCC) [J]. Procedia Engineering, 2015, 122: 88-94.

[14] Zhang C, Chang C, Jamshidi M. Concrete bridge surface damage detection using a single-stage detector [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(4): 389-409.

[15] 张阳,屈少钦,卢九章,等.UHPC纤维定向法及对受拉性能影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(5):74-80.

[16] Wang H B. Nondestructive testing of concrete strength based on consolidation wave speed measurement [J]. Chemical Engineering Transactions, 2016, 51: 1141-1146.

[17] Benaicha M, Jalbaud O, Hafidi Alaoui A, et al. Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 702-709.

[18] 陈华艳,徐银芳,熊学忠,等.超声波检测在钢纤维混凝土中的应用[J].商品混凝土,2005(2):6-9.

[19] 陈华艳,毕贤顺.钢纤维混凝土超声-回弹测强曲线的建立[J].黑龙江科技学院学报,2013,23(1):73-76.

[20] 黄奕辉,王全凤,罗才松,等.钢纤维混凝土的超声测强试验[J].华侨大学学报(自然科学版),2005,26(4):373-376.

[21] Lillamand I, Chaix J F, de Ploix M A, et al. Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading[J]. NDT &E International, 2010,43(8):655-660.

[22] BOMPAN K F, Haach V G. Ultrasonic tests in the evaluation of the stress level in concrete prisms based on the acoustoelasticity[J]. Construction and Building Materials,2018,162:740-750.

[23] Murnaghan F D. Finite deformations of an elasticsolid [J]. American Journal of Mathematics, 1937, 59 (2): 235-260.

[24] Hughes D S, Kelly J L. Second-order elastic deformation of solids[J]. Physical Review,1953,92(5):1145-1149.

[25] Jiang H W, Zhang J Q, Jiang R N. Stress evaluation for rocks and structural concrete members through ultrasonic wave analysis: review [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29 (10): 04017172.

(责任编辑:康 锋)