

不同尺寸混凝土试件受压状态下超声波传播特性研究

王怀亮*, 宋玉普

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 研究了不同尺寸混凝土试件在单轴压应力作用下, 超声波波速的变化规律. 试验所用试件有 3 种: 采用大坝原级配最大骨料粒径为 80 mm 的棱柱体试件以及相应的湿筛混凝土试件, 尺寸分别为 25 cm×25 cm×50 cm, 15 cm×15 cm×30 cm, 10 cm×10 cm×20 cm. 通过试验首先得到了加载过程中波速变化与应力水平的关系, 然后基于超声波波速定义了损伤变量以评价加载过程中混凝土的损伤程度, 并且根据试验提出了一种使用超声波法估测复杂应力下混凝土裂缝开展的方法. 试验分析表明, 混凝土内超声波衰减规律与骨料尺寸和数量以及试件尺寸等因素有关, 所得结论对于评估大体积混凝土结构在复杂应力条件下损伤演变具有一定的应用价值.

关键词: 大坝混凝土; 超声波波速; 受压; 损伤变量; 裂缝扩展

中图分类号: TV 431 **文献标识码:** A

0 引言

混凝土是我国水工结构工程中使用最为广泛的材料之一, 它的质量直接关系到大坝等重要结构的安全. 多年来, 大坝混凝土强度质量检验均采用边长为 15 cm×15 cm×15 cm 的立方体试件, 成型时采用湿筛法, 将大坝混凝土中的大骨料和特大骨料筛除, 使试件混凝土配合比与坝体混凝土配合比发生了根本变化. 湿筛后试件中水泥含量增加 30%~50%, 最大骨料粒径减至 40 mm 以下, 从而大大改变了坝体混凝土的力学性能. 用湿筛试件试验测得的混凝土力学性能指标, 往往与水工结构物中混凝土的性能有一定差别. 因此, 直接在结构物上检测混凝土质量的无损检测技术, 已成为混凝土质量管理的重要手段, 这一检测技术已引起各国工程界的重视和承认. 应用到混凝土中的无损检测技术包括超声波脉冲法、回弹法、声发射技术、红外线记录、射线法以及其他的磁和电的方法等^[1]. 超声波脉冲法作为一种较成熟的混凝土无损检测手段, 从 20 世纪 40 年代末引入到混凝土研究中以来, 已得到了广泛的应用, 其原理是利用超声波脉冲在材料中的传

播速度依赖于材料的密度和弹性常数这一特点^[2], 通过检测超声波在混凝土中的传播速率以推导出混凝土质量和强度的相关信息.

混凝土在静压作用下, 随荷载的增加, 其内部微裂缝将不断发展, 直至最终完全破坏, 可以想到的是, 如果利用超声技术测量试件在加载过程中超声波的传播波速, 就可以得到荷载变化与波速之间的关系, 进而得出加载过程中损伤演变规律. 本文通过对单轴受压状态下的混凝土棱柱体试件进行超声波测试, 比较研究骨料尺寸、骨料体积分数和试件尺寸等因素对混凝土损伤演变规律的影响.

1 研究内容

1.1 损伤变量和超声波波速降低程度定义

近年来国内外一些学者将连续介质损伤力学理论应用于分析混凝土裂缝的形成和扩展, 并取得了显著成效, 然而混凝土在受载过程中的损伤定量测量一直是很困难的问题, 本文则利用超声波波速衰减来定义损伤变量. 经典损伤力学理论对损伤变量的定义如下:

收稿日期: 2005-05-10; 修回日期: 2006-11-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50679007).

作者简介: 王怀亮* (1979-), 男, 博士生; 宋玉普 (1944-), 男, 教授, 博士生导师.

$$D = 1 - \tilde{E}/E \quad (1)$$

式中: E 为材料的初始无损弹性模量; \tilde{E} 为受损材料的弹性模量或有效弹性模量。

当一定频率的纵向超声波穿过某一固体材料时, 纵向超声波波速 v 和材料的质量密度 d 弹性模量 E 以及 Poisson 比 ν 有如下的关系^[3]:

$$v^2 = \frac{E}{d} \cdot \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2)$$

如果忽略加载过程中 Poisson 比 ν 和质量密度 d 变化的影响, 对于受损材料便有

$$\tilde{v}^2 = \frac{\tilde{E}}{d} \cdot \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (3)$$

然后利用式 (1), 可以得到以波速变化定义的损伤变量:

$$D = 1 - \tilde{v}^2/v^2 \quad (4)$$

式中: v 和 \tilde{v} 分别为无损材料和损伤材料的传播波速。这种定义依然基于如下基本假设: 混凝土材料初始状态的损伤为 0, 破坏失效时损伤为 1。由于混凝土的超声波波速变化能综合反映出混凝土内部缺陷发展程度, 运用混凝土的超声波波速定义的损伤变量完全可以表述混凝土微裂纹的宏观力学效果。

1.2 超声波对内部裂缝扩展情况的测试

本文利用超声波测试了加载过程中试件内部的裂缝扩展情况, 比较了不同骨料级配混凝土试件内裂缝开展的不同规律。当试件内部裂缝萌生和扩展时, 裂缝会被水或者空气所填充, 混凝土中声波传播速度会有明显的下降 (如图 1), 因为穿过混凝土的波速要比穿过空气或水的速度快得多。裂缝变得越来越宽或者数目增多则能够在波速变化中反映出来, 这样就可以推出超声波波速和裂缝宽度的关系。如果试件试验前均在水中养护, 就可以认为加载过程中产生的裂缝完全是由水所填充的, 根据下式

$$v_w = \sqrt{B/d} \quad (5)$$

式中 B 为水的体积模量, 约等于 0.21×10^9 MPa; d 为水的密度, 等于 1000 kg/m^3 , 可以得出水中超声波传播速度为 1450 m/s , 然后有如下关系^[4]:

$$w = \frac{1/v - 1/v_0}{1/v_w - 1/v_0} s \quad (6)$$

式中: w 为裂缝宽度; v 为某一应力状态下, 混凝土中波速; v_0 为零应力状态下, 混凝土中波速; v_w 为水中波速, 取为 1450 m/s ; s 为超声波测量距离。根据上式, 再忽略 Poisson 比效应, 就可以粗略地估计出在不同应力状态下, 混凝土内裂缝扩展情况。

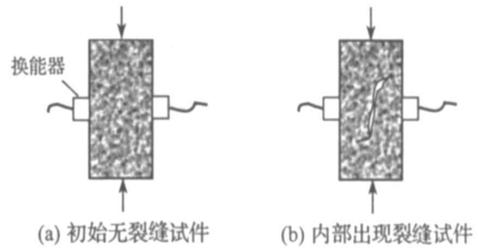


图 1 试验布置简图

Fig. 1 Sketch of tested samples

2 试验简介

2.1 原材料和试件形式

本文试验采用最大试件为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的三级配混凝土棱柱体试件 (最大骨料粒径 80 mm), 然后是筛除掉大于 40 mm 骨料的湿筛二级配混凝土 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 棱柱体标准试件, 以及筛除掉大于 20 mm 粗骨料的湿筛一级配混凝土试件, 为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的棱柱体, 注意到每个试件尺寸高宽比均为 2。本次试验使用混凝土配合比与某大坝水电站混凝土配合比相同, 其配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比 (单位: kg/m^3)

Tab. 1 Mix proportions of the concrete (unit kg/m^3)

| 水 | 水泥 | 粉煤灰 | 中砂 | 木钙减水剂 | 碎石粒径 /mm | | |
|-----|-------|------|-----|-------|----------|--------|--------|
| | | | | | 5~ 20 | 20~ 40 | 40~ 80 |
| 129 | 179.2 | 35.8 | 699 | 0.43 | 407.1 | 407.1 | 542.8 |

所用水泥均为大连水泥厂生产的 R32.5 硅酸盐水泥, 砂子为河砂 (粒径为 $1.25 \sim 5 \text{ mm}$), 粗

骨料为三级配石灰石碎石, 其中小石 ($5 \sim 20 \text{ mm}$), 中石 ($20 \sim 40 \text{ mm}$), 大石 ($40 \sim 80 \text{ mm}$) 的。

比例是 3:3:4。所有试件均在水中养护,养护龄期采用水工上常用的 90 d。

2.2 试验过程

试验均在大连理工大学结构实验室由济南试金集团生产的 WDW-10 微机控制电子万能试验机上完成,试验机最大出力为 3 000 kN。所有大小的试件均分为两组,每组 3 到 4 个试件。一组采用位移传感器测量各荷载时的变形值,并由此绘制出荷载变形曲线,如图 2 所示,图中 C1 代表湿筛一级配混凝土试件,C2 代表湿筛二级配混凝土试件,C3 代表大坝三级配混凝土试件;另外一组采用对测法测量加载过程中的超声波波速,加载装置见图 3。超声设备为日本 TICO 超声检测仪,探头工作频率选用 54 kHz。与探头接触的混凝土表面经过打磨及表面除尘处理,为了减少声能损耗,用黄油作为耦合剂。

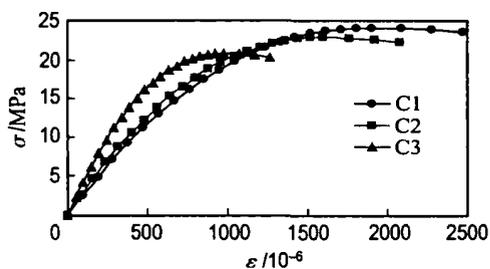


图 2 三种试件应力-应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of three kinds of specimens

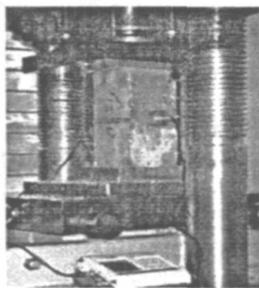


图 3 受压加载装置

Fig. 3 Sketch of loading for compression

试验主要测量了垂直于加载方向的波速变化:首先将发射探头和接收探头固定在混凝土试件上,对试件反复预压几次卸载后,记下初始无损

状态下混凝土的超声波传播时间 t_0 和波速 v_0 ; 然后进行缓慢分级加载,荷载间隔约为 50 30 10 kN,直至达到极限抗压强度,每加一级荷载,均记下超声波传播时间和波速以及对应的荷载值,最终试验结果见表 2。

表 2 试验结果

Tab. 2 Results of the tested samples

| 试件编号 | ϵ/ϵ_p | v/v_0 | D | w/mm |
|------|-----------------------|---------|---------|--------|
| C1-1 | 0.83 | 0.94 | 0.116 4 | 4.2 |
| C1-2 | 0.83 | 0.98 | 0.039 6 | 3.9 |
| C1-3 | 0.85 | 0.89 | 0.207 9 | 4.8 |
| C1-4 | 0.87 | 0.85 | 0.277 5 | 5.0 |
| C2-1 | 0.85 | 0.85 | 0.277 5 | 6.8 |
| C2-2 | 0.85 | 0.91 | 0.171 9 | 6.2 |
| C2-3 | 0.87 | 0.89 | 0.207 9 | 6.5 |
| C2-4 | 0.87 | 0.84 | 0.294 4 | 7.1 |
| C3-1 | 0.83 | 0.81 | 0.343 9 | 7.7 |
| C3-2 | 0.83 | 0.79 | 0.375 9 | 8.2 |
| C3-3 | 0.87 | 0.64 | 0.590 4 | 8.8 |
| C3-4 | 0.87 | 0.61 | 0.627 9 | 9.2 |

注: D 为损伤系数, w 为裂缝宽度

3 试验结果分析

3.1 混凝土试块受力过程中超声波波速的变化规律

通过对不同尺寸试件进行超声波测试发现,所有的试件有相似的应力-波速特性图,如图 4 所示,其一般规律如下:

(1) 阶段 1,在小荷载时,20% ~ 30% 的极限强度,在粗骨料和水泥砂浆界面区域(过渡区域)的微裂缝保持稳定,部分垂直于加载方向的微裂缝在初始压力下闭合,试件被压实,波速基本无变化或稍微有增加,在超过此应力一定范围,从 30% ~ 55% 的极限强度,过渡区的原始微裂缝开始扩展,但砂浆体中未形成宏观裂缝,此时波速有下降的趋势但不明显;

(2) 阶段 2,这一区段应力变化范围是 55% ~ 80% 的极限强度,过渡区的裂缝开始扩展到砂浆体中,混凝土内微裂缝发展较多,应力应变曲线呈现非常明显的非线性,波速开始有比较明显的

降低;

(3) 阶段 3, 应力超出了 80% 的极限强度, 过渡区与砂浆体中裂缝连接贯通, 裂缝宽度显著增大, 超声波传播速度急剧下降, 由于裂缝扩展极不稳定, 极限强度处的波速很难测量到。

通过不同试件的对比可以发现, 随着最大骨料尺寸和骨料体积分量的增大, 脉冲速度开始减小的应力值变得越来越低, 即三级配大骨料混凝土脉冲速度开始减小时的应力值小于湿筛混凝土的应力值。对大骨料混凝土试件, 速度的减小和体积膨胀都比湿筛混凝土试件要早。从表 2 也可以看到, 在大致同样的应力比下 (大约为 85%), 大骨料混凝土波速降低得更多。

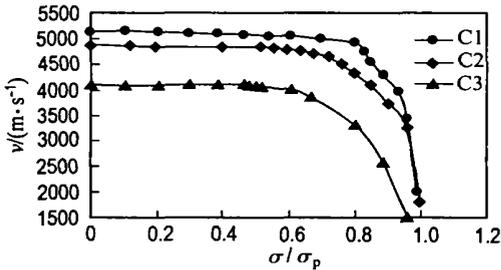


图 4 三种试件波速与相对应力的关系曲线

Fig. 4 Relationship between velocity and relative stress of three kinds of specimens

3.2 混凝土试块受压过程中损伤演变规律

按照前面所给出的损伤公式对不同试件的超声测试结果进行分析, 结果如图 5 所示, 图中横坐标为相对应力水平, 即当前应力与峰值应力的比值, 纵坐标为损伤参数 D , 可以看到, 在第一阶段损伤参数一直在零值附近, 几乎没有变化, 只有当应力比达到一定水平后, 损伤开始有了显著的增长; 在同样的应力水平下, 三级配大骨料混凝土的损伤系数一般要大于湿筛小骨料混凝土的损伤系数。从连续损伤力学角度来分析其原因, 试件尺寸和骨料尺寸越大 (骨料含量越高), 试件内部存在的微缺陷越多, 薄弱环节也大为增加, 混凝土材料表现出更高的非均匀性, 于是, 在同样的应力条件下, 大骨料混凝土损伤水平会更高一些, 这也正是大坝原级配混凝土与普通小骨料混凝土力学性能有明显差异的原因。

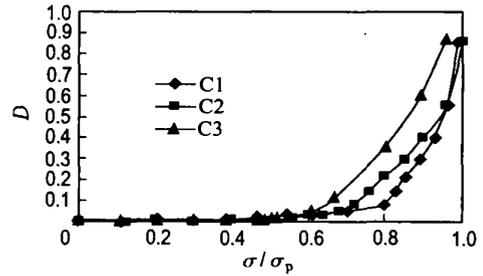


图 5 由波速变化得到的损伤曲线

Fig. 5 Damage curves got by variation of the velocity

3.3 波速衰减对裂缝扩展的指示

在混凝土断裂力学研究中, 对内部存在的微开裂进行定量测定的主要方法是 X 射线、光纤法以及超声波检测^[5]。由于超声波检测具有简单易行及使用安全的特点, 该试验通过测定超声波波速的变化来定量得出加载过程中微裂缝扩展情况。使用前面得出的公式来计算试件内裂缝宽度, 这样就得到了在不同应力比下的裂缝宽度, 如表 2 所示, 可以发现在大约 85% 的极限应力下, 一级配混凝土裂缝宽度在 3.9~5.0 mm, 二级配混凝土裂缝宽度在 6.2~7.1 mm, 三级配混凝土则在 7.7~9.2 mm。这说明骨料尺寸和骨料含量越大, 在相同的应力比状态下, 裂缝宽度就越大。换言之, 这表示大骨料混凝土比较早地进入了大量裂缝扩展阶段。本文所采用的裂缝宽度计算方法没有计入侧向变形的影响, 所以数值略微有所偏大, 但都在误差范围以内。

4 结 论

(1) 本文进行了不同尺寸试件受压状态下超声波测试试验, 通过试验发现所有的试件在加载过程中, 其超声波波速随着荷载增加呈下降趋势。随着试件内部裂缝的产生、发展直至破坏, 声速表现出明显的 3 个阶段性变化, 变化的门槛值与试件尺寸、骨料尺寸以及骨料含量有关。

(2) 讨论了以声学参数为损伤变量建立的损伤因子 D 与荷载变化的关系, 这种关系直接反映了混凝土中裂缝和缺陷的开展状况。利用本文得到的损伤演化规律, 可监测结构在承载过程中的

损伤程度,还可评定结构由于疲劳、收缩、徐变及其他环境因素影响下的损伤状况。

(3) 如果传播长度恒定,换能器同试件间声耦合良好,则波速的衰减依赖于换能器的频率及发射和接收探头之间所遇裂缝的尺寸和数量,通过本次试验,可以发现超声衰减能够敏感地指示在复杂应力条件下试件内裂缝的进展情况,所以该方法可以运用于测试更为复杂的受力条件如多轴拉压或疲劳荷载等情况下混凝土裂缝的扩展规律。

(4) 从超声波测试结果来看,混凝土湿筛试件的损伤演变规律与实际工程中的全级配混凝土不尽相同,如何从试验室内的湿筛小试件来推求大坝所使用的全级配混凝土宏观力学性能,还有很多的实验和理论工作需要进行。

参考文献:

- [1] 国家建筑工程质量监督检验中心. 混凝土无损检测技术 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1996
- [2] 郝恩海, 刘杰, 王忠海, 等. 混凝土超声声速与强度和弹性模量的关系研究 [J]. 天津大学学报, 2002, 35(3): 380-383
- [3] KOMLOS K, POPOVIC S, NURNBERGEROV A T, *et al.* Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards [J]. *Cem & Concr Compos*, 1996, 18(5): 357-374
- [4] QASRAWI H Y A, MARIE I A A. The use of USPV to anticipate failure in concrete under compression [J]. *Cem and Concr Res*, 2003, 33(12): 2017-2021
- [5] 刘宝琛. 实验断裂损伤力学测试技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994

Ultrasonic pulses behavior in various-size concrete specimens under compression

WANG Huai liang*, SONG Yu pu

(State Key Lab. of Coastal and Offshore Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract The attenuation of ultrasonic pulse velocity in various-size concrete specimens under uniaxial compression loading is investigated. Tests were conducted on prisms of 25 cm× 25 cm× 50 cm fabricated with dam concrete(maximum aggregate of 80 mm), and standard 15 cm× 15 cm× 30 cm prisms, 10 cm× 10 cm× 20 cm prisms which were made with the wet-sieved components of dam concrete. First of all, special plots, showing the relation between the velocity through concrete and the stress during loading, have been introduced. Then a damage variable is defined based on the ultrasonic velocity attenuation and used to describe the growth law of damage during loading. At last, a general method to evaluate the evolution of crack in concrete is presented. Results show that the rule of ultrasonic propagation in concrete is apparently affected by the scale effect and the effect of wet screen sieve of aggregate. These conclusions proposed can be applied to determining the extent of damage of mass concrete due to the complex load and other environmental effects.

Key words dam concrete; ultrasonic pulse velocity; compression; damage variable; crack propagation