

文章编号:1007-9629(2022)02-0214-07

基于早龄期超声测试的堆石混凝土工程质量检测

商 峰¹, 周 虎^{2,*}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:从早龄期开始采用超声波对大尺寸自密实混凝土和堆石混凝土进行了对比测试,并基于黏弹性介质波动理论从纵波波速测量结果中分离出材料的黏性特征参数,用于分析堆石混凝土的浇筑状态,评价堆石混凝土的施工质量.结果表明:由于堆石混凝土内部结构复杂,仅依靠代表性体积单元的超声波速均值和变异系数难以对堆石混凝土的浇筑质量做出可靠的评价,因而需要进行高密度的分层检测;应用材料的黏性特征参数进行分析判断时,有可能采用较少的测线完成检测,这在工程实践中是更具有应用价值的方法.应用早龄期超声测试的方法有助于克服由于代表性单元尺寸过大给堆石混凝土工程质量评价带来的困难.

关键词:堆石混凝土;自密实混凝土;黏弹性介质波动理论;超声检测

中图分类号:TB553

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.015

Construction Quality Assessment of Rock Filled Concrete Based on Early Age Ultrasonic Wave Test

SHANG Feng¹, ZHOU Hu^{2,*}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Ultrasonic wave tests were applied on the large size specimen made of self-compacting concrete and rock filled concrete since the early age. Based on the viscoelastic medium wave theory, the viscosity parameter was separated from P-wave velocity test data and used for the assessment of work ability of the fresh rock filled concrete and hardened state of the rock filled concrete. It can be concluded that due to the complexity of the inner structure of rock filled concrete, the average P-wave velocity and the coefficient of variation of the representative element volume can hardly be used for the construction quality assessment; the high density layered detection has to be applied. Comparatively, much less detection will be enough based on the viscosity parameters separated from the P-wave data. The test of early age ultrasonic wave would be helpful to overcome the difficulties brought by the excessive size of the representative element volume in rock filled concrete.

Key words: rock filled concrete; self-compacting concrete; viscoelastic medium wave theory; ultrasonic wave test

堆石混凝土(RFC)是一种新的大体积混凝土浇筑方式^[1],利用自密实混凝土(SCC)的高流动性,通过填充大粒径堆石体内部孔隙形成大体积混凝土结构,具有水泥用量少、绝热温升小、施工速度快等

收稿日期:2020-10-30; 修订日期:2020-12-28

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC0406903);中国水电水利规划设计研究院科研专项(DJ-ZDXM-2017-03);中国水利水电科学研究院科研专项(SS0145B122017,SS0145B462019)

第一作者:商 峰(1982—),安徽芜湖人,中国水利水电科学研究院高级工程师,博士. E-mail: shangfeng@iwhr.com

通讯作者:周 虎(1980—),北京人,清华大学高级工程师,博士. E-mail: zhouhu98@tsinghua.edu.cn

优点.该项技术在重力坝^[2]的设计和施工中已经获得了比较广泛的应用,近年来逐渐扩展应用到拱坝^[3]的设计和施工中.作为一种新的水工建筑材料,如何测试和评价RFC的密实程度和力学性能是理论研究和工程实践中都非常关心的问题.

现有的混凝土工程质量检测和评价方法包括2类:一是在浇筑过程中成型伴随试块或者浇筑完成后钻芯取样,在实验室内进行基本力学性能试验;二是在工程现场采用回弹、超声等无损检测方法对混凝土硬化后的强度进行评定.这2类方法的现行标准主要来源于对一、二级配混凝土工程实践的总结.由于RFC的代表性体积单元(RVE)尺寸不仅远超一、二级配混凝土,而且也超过水工全级配混凝土,因此,如果按照足尺寸成型试块或者钻芯取样,进而开展力学试验的话,就会存在很多困难.回弹、超声等无损检测方法的现场实施一般不受空间尺寸的限制,因而得到了更多的重视.石建军等^[4]、李友彬等^[5]在实验室条件下用回弹法进行RFC硬化后强度检测试验,并与从试件上切割出的小尺寸试块强度进行对比;刘聪等^[6]在实验室条件下以再生骨料作为堆石体成型RFC,用回弹法进行了不同龄期RFC的检测试验,并与SCC伴随试块强度进行了对比.回弹测试实质上建立了表面硬度和混凝土强度之间的关系,更多地反映了表层自密实混凝土或者堆石的材料特性.现有超声测试理论的基础是弹性波动理论,反映待测物体内部密实程度,因此,更适用于堆石混凝土这样内部结构复杂的情况.

混凝土是一种黏弹性介质,其受力变形具有与率相关的特性.超声波在混凝土内部的传播,不仅与材料的弹性特征相关,而且与其黏性特征相关^[7].在早龄期阶段,混凝土的黏性特征显著,但现有研究大多局限于浇筑龄期24 h或48 h以内^[8].通过超声测试分析材料的黏性特征参数随龄期变化的发展规律,有助于深入理解混凝土的浇筑状态,及其对结构性能的影响.对于RFC,相对于浇筑用的SCC,堆石个体的黏性特征是可以忽略的;而浇筑用的SCC的黏性特征直接决定了RFC的成型密实度.因此,本文尝试从早龄期开始对堆石混凝土进行超声波测试,分离材料的黏性特征参数,从而推断堆石混凝土的浇筑状态,为建立堆石混凝土施工质量检测方法奠定基础.

1 超声波在早龄期混凝土内的传播

以RVE为最小单元,混凝土可以视为各向同性均匀材料.按照流变学中的开尔文模型,RVE内空间

均化的材料本构关系如下:

$$\sigma_{ij} = \left(\lambda \varepsilon_m \delta_{ij} + \eta \frac{\partial \varepsilon_m \delta_{ij}}{\partial t} \right) + 2 \left(G \varepsilon_{ij} + \xi \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} \right) \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 、 ε_{ij} 分别为应力张量和应变张量; ε_m 为体应变; λ 为拉梅系数; G 为剪切模量; η 、 ξ 分别为对应于 λ 和 G 的黏性参数; t 为超声波传播过程中的瞬时时间.

将式(1)代入三维运动方程,忽略体力的影响,并对方程两边取散度可以得到纵波方程:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + \eta \omega) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + 2(G + \xi \omega) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2)$$

式中: ρ 为材料密度; ω 为超声波的圆频率; u_i 、 u_j 为位移; x_i 、 x_j 为空间三维坐标.

对于在早龄期混凝土内传播的超声波,材料的黏性对于波速的影响不可忽略,因此,其纵波波速应按式计算:

$$\begin{cases} v_p = \sqrt{v_e^2 + v_c^2} \\ \rho v_e^2 = \lambda + 2G \\ \rho v_c^2 = (\eta + 2\xi) \omega \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_p 为纵波波速; v_e 、 v_c 分别为纵波波速的弹性分量和黏性分量.

定义材料的弛豫时间 $\tau = \frac{\eta + 2\xi}{E}$, 则:

$$v_p = \sqrt{\frac{(q + \tau \omega) E}{\rho}} \quad (4)$$

$$q = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (5)$$

式中: μ 为泊松比,本文对于所有材料取 $\mu=0.2$; E 为弹性模量.

对于RFC,设浇筑成型前堆石体积分率为 α ,堆石为理想弹性体,则:

$$\begin{cases} \rho_{\text{RFC}} = \alpha \rho_{\text{RK}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{SCC}} \\ E_{\text{RFC}} = \alpha E_{\text{RK}} + (1 - \alpha) E_{\text{SCC}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ρ_{RFC} 、 ρ_{RK} 、 ρ_{SCC} 分别为RVE空间内RFC、堆石(RF)和SCC的密度; E_{RFC} 、 E_{RK} 、 E_{SCC} 分别为RVE空间内RFC、RF和SCC的弹性模量.

联立式(4)~(6),借助小尺寸SCC伴随试块测得SCC的弹性模量,则可以分离出材料的黏性特征参数,即弛豫时间.

2 超声检测试验

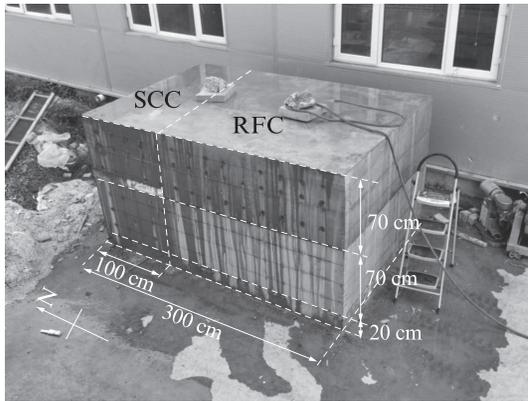
2.1 试验方法

水泥、粉煤灰、水和减水剂均来自于商混站.水

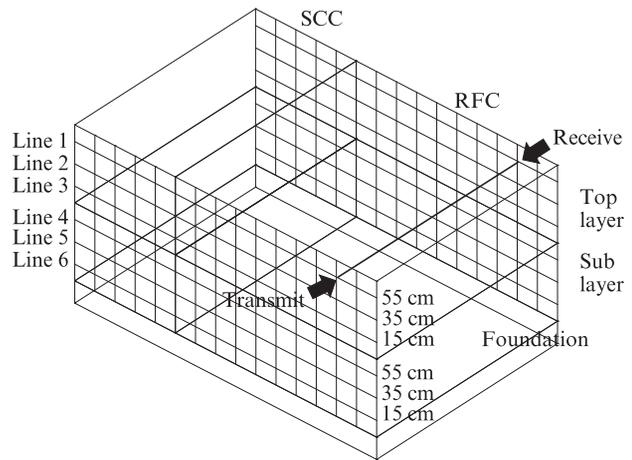
泥为42.5硅酸盐水泥;粉煤灰为I级粉煤灰;减水剂为聚羧酸型减水剂;粗骨料由常规碎石骨料(5~25 mm)和细石骨料(5~16 mm)搭配组合而成;细骨料为天然砂,细度模数2.74.

在清华大学水利系怀来实验基地室外场地制作外观尺寸为200 cm×300 cm×160 cm的试件.浇筑所用SCC配合比如表1所示.

试件分3部分,如图1所示,北侧宽度100 cm为SCC,南侧200 cm为RFC.试件分3次浇筑成型,首先是高20 cm的基础垫层,然后浇筑高70 cm的底层,14 d后再浇筑高70 cm的顶层.各层浇筑



(a) Test specimen



(b) Survey line on specimen

图1 自密实混凝土和堆石混凝土的超声测试

Fig. 1 Ultrasonic test on self-compacting concrete and rock filled concrete

如图1(b)所示,在试件底层和顶层侧面分别沿南北方向按各自相对高程15、35、55 cm布置3条测线,测点间距20 cm;则每条测线上有4个SCC测点、8个RFC测点.在各测点按正透射法沿东西方向,从2 d龄期开始进行超声测试.测试采用湖南芯仪电子科技有限公司生产的SET-IT-01型超声波平面换能器,激发频率50 kHz.具体测试方法参见

CECS 21: 2000《超声法检测混凝土缺陷技术规范》.

根据堆石粒径,RFC的REV空间尺寸应不小于150 cm×150 cm×90 cm,本文试验RFC顶层和底层的尺寸为200 cm×200 cm×70 cm,考虑到超声测试沿水平方向透射,因此以顶层和底层空间分别作为RFC的RVE是可以满足要求的.

表2 堆石粒径和波速抽样检测结果

Table 2 Sampling test results of rock particle size and wave velocity

Particle size according to ellipsoid shape									P-wave velocity	
Long axis			2nd longest axis			Short axis			Mean/(m·s ⁻¹)	COV
Mean/mm	Max/mm	COV	Mean/mm	Max/mm	COV	Mean/mm	Max/mm	COV		
335	500	0.18	249	500	0.21	188	300	0.25	4 540	0.08

2.2 试验结果

图2(a)、(b)给出了SCC和RFC的超声波速均值与龄期的关系,图2(c)、(d)给出了SCC和RFC的超声波速均值变异系数与龄期的关系,其中顶层和

底层超声波速均值取3条测线上所有测点的平均值.由图2(a)、(b)可见:由于混凝土的硬化,SCC和RFC的超声波速均值随着龄期的延长而增长,并趋于稳定;由于超声波通过堆石体的波速高于SCC,因此

表1 浇筑所用SCC配合比
Table 1 Mix proportion of self-compacting concrete

Cement	Fly ash	Sand	Aggregate		Water	Superplasticizer
			5-25 mm	5-16 mm		
177.0	277.0	761.0	552.0	368.0	187.0	10.7

kg/m³

完成1 d后拆模,并定期浇水养护.表2给出了堆石粒径和波速抽样检测结果,其中COV为变异系数.石块堆放时尽可能使长轴和次长轴沿水平方向布置.经测算,RFC部分的堆石体积分数平均值为30%.

RFC的超声波速均值显著大于SCC;由于实际浇筑时采用商品混凝土,顶层和底层相隔14 d配制,因此两部分SCC的材料性质不完全一致,顶层SCC的超声波速均值要高于底层。

由图2(c)、(d)可见:由于混凝土的硬化,RFC和SCC超声波速均值的变异系数随龄期延长而减小,并趋于稳定;RFC超声波速均值的变异系数显著大于SCC.超声波速均值的变异系数反映了待测物体内部材料分布的不均匀性.RFC的内部结构复杂,包括SCC和堆石骨架.早龄期时,SCC的弹性模量较小,超声波通过SCC的波速远小于堆石,因此,RFC内超声波速分布的不均匀性远大于SCC.随着龄期

的延长,SCC的弹性模量逐渐增加,堆石的弹性模量不变,因此,RFC内超声波速分布的不均匀性逐渐降低;但硬化后的RFC内超声波速分布不均匀性仍然显著高于SCC.从图2(c)、(d)还可以看出,底层SCC的变异系数要略大于顶层,但是顶层RFC的变异系数要显著高于底层.说明底层SCC均匀程度要低于顶层,但是用同样的SCC去填充堆石孔隙时,所得RFC的超声波速均值反而均匀性更好.这是因为RFC的超声波速分布不仅与SCC浇筑填充性能有关,而且与骨料堆积的不均匀性有关.因此,超声波速均值和变异系数并不足以作为依据来判定RFC的施工质量。

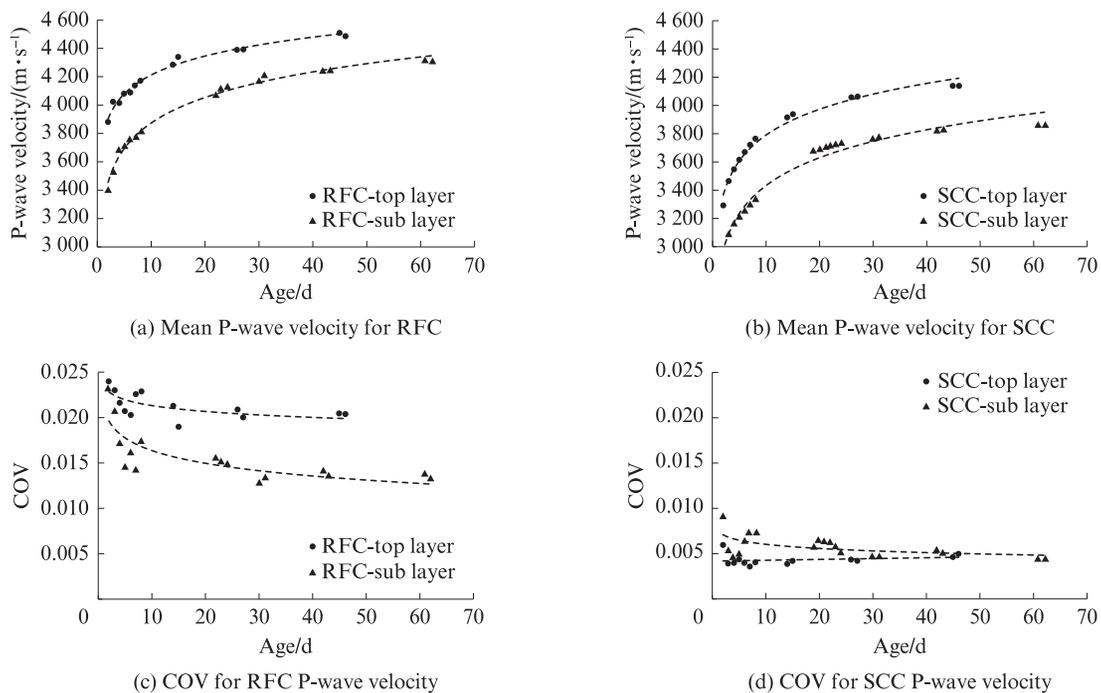


图2 SCC和REV的超声波速均值及其变异系数
Fig. 2 Average P-wave velocity and COV for SCC and REV

图3给出了SCC和RFC沿各测线的超声波速均值.由图3(a)、(b)可见:SCC的超声波速均值随着深度的增加而增加,说明SCC的硬化过程受到自重的影响;顶层SCC的超声波速均值沿深度分布较为均匀,而对于底层SCC,测线6所得超声波速均值较大,测线4、5所得超声波速均值较小且较为接近,说明底层SCC中粗骨料大多集中于靠近基础垫层的部位,较高的部位堆石孔隙中主要填充的是水泥浆体.正是由于底层SCC出现了离析,因此其整体变异系数高于顶层。

由图3(c)、(d)可见:顶层RFC沿测线1的超声波速均值曲线偏离测线2、3的曲线较多,这也是导致顶层RFC整体超声波速均值变异系数高于底层的原

因.图4给出了RFC沿各测线超声波速均值的变异系数.由图4可见:底层RFC中测线6的变异系数较大,反映出RFC底部浇筑质量较差;顶层RFC中测线1的变异系数相对较大,这可能与顶层上部堆石含量较少且空间分布不均有关。

2.3 黏性参数的分离

试验中制作了SCC伴随试块,进行了基本力学性能试验,对其结果进行拟合,得到顶层和底层SCC的弹性模量 E_{SCC} 随龄期发展的计算公式:

$$E_{SCC} = E_0 \frac{\theta}{\theta_0 + \theta} \quad (7)$$

式中: θ 为龄期; E_0 、 θ_0 为待定系数.对于底层SCC, $E_0=27.7$ GPa, $\theta_0=3.31$ d;对于顶层SCC, $E_0=30.3$ GPa,

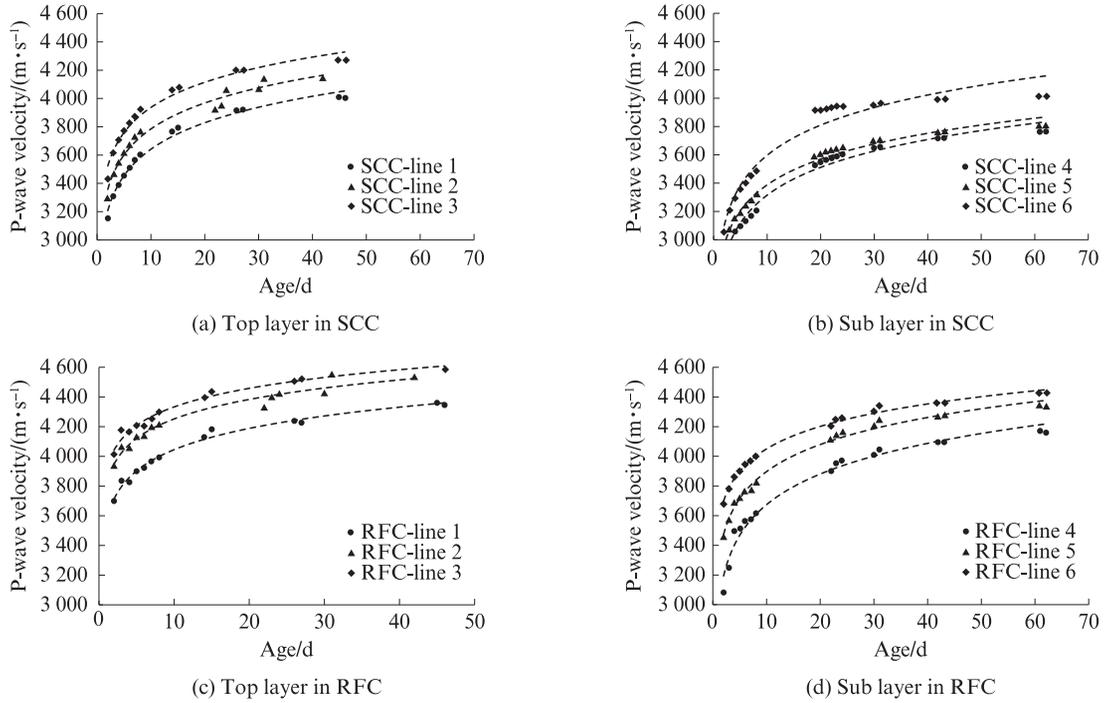


图3 SCC和RFC沿各测线的超声波速均值

Fig. 3 Ultrasonic P-wave velocity on each survey line for SCC and REV

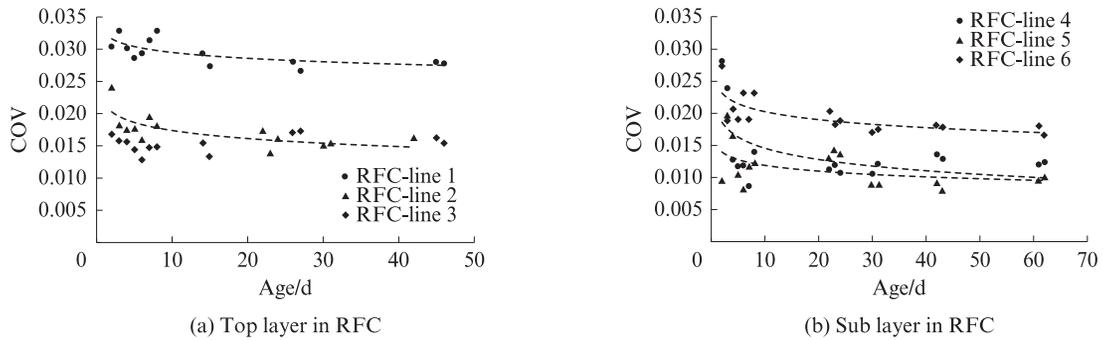


图4 RFC沿各测线波速均值的变异系数

Fig. 4 COV for P-wave velocity on each survey line for REV

$\theta_0=2.64$ d.

将式(7)代入式(4)~(6),求得各层REV内SCC和RFC的平均弛豫时间,如图5所示.由图5可见:SCC和RFC的平均弛豫时间均随龄期延长而减小,并趋于稳定,反映出混凝土硬化过程中材料的黏性特征逐渐减弱;早龄期SCC的平均弛豫时间显著大于RFC,随着龄期的延长,SCC的平均弛豫时间逐渐与RFC接近.这是由于RFC内堆石占据了相当的比例,削弱了整体的黏性特征,随着RFC内填充的SCC逐渐硬化,RFC固化成接近纯SCC的固体.

对比图5(a)、(b)可见:底层SCC的平均弛豫时间趋于稳定所用时间略少于顶层,说明底层SCC的黏性较差,反映出底层SCC的填充性能较差,易出现骨料与浆体分离的情况,正如图2(d)、(e)所指出的,底层SCC粗骨料都沉积到了试件的底部;底层RFC

的黏性远差于顶层,并且底层RFC与底层SCC硬化后的平均弛豫时间曲线存在偏离;顶层RFC与顶层SCC硬化后的平均弛豫时间曲线重合度则较好.

如2.2所述,由于RFC的不均匀性,仅依靠超声波速均值和变异系数进行分析判断时,需要在REV内布置高密度的分层测线,而在实际施工质量检测过程中,这种方法的时间成本和费用都比较高;如果依靠黏性特征参数(弛豫时间)来进行分析判断,则有可能以较少的测线完成检测.以本文试验为例,仅依据各层REV内中间测线来求解弛豫时间,结果如图6所示.对比图5、6可见:依据中间测线求解得到的弛豫时间历时变化情况与多条测线求解得到的弛豫时间平均值历时变化情况相似,应用中间测线即可实现对RFC施工质量的检测.因此,在工程实践中,从超声波速测值中提取黏性特征参数是更具有

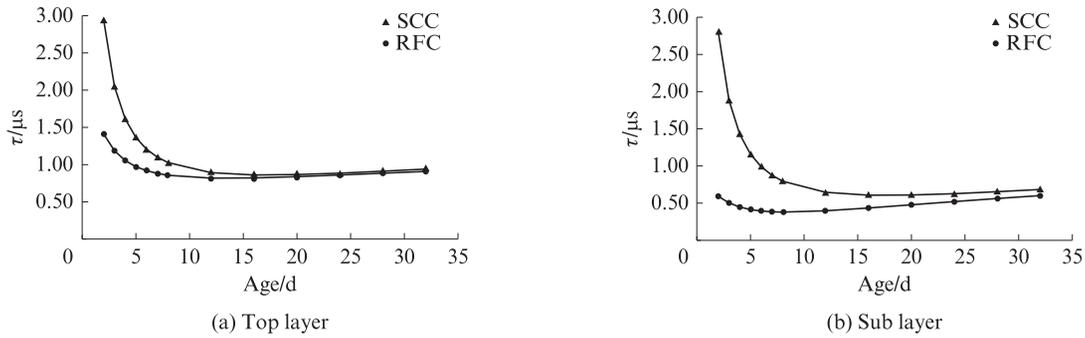


图5 各层REV内SCC和RFC的平均弛豫时间
Fig. 5 Average relaxation time in REV for SCC and RFC

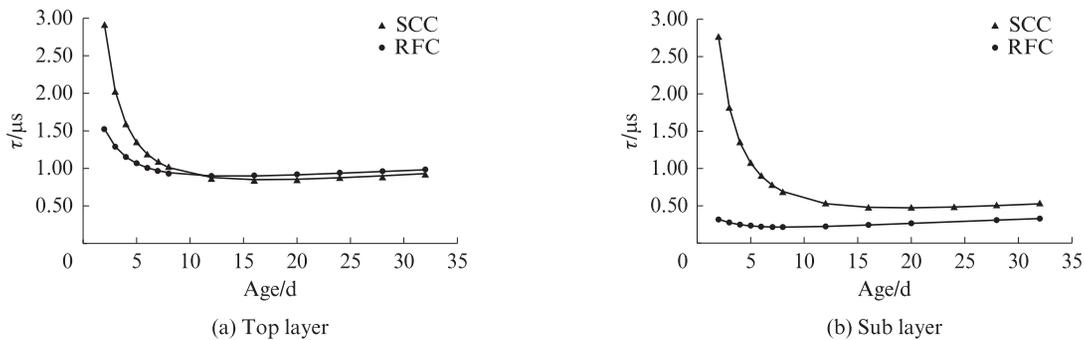


图6 依据各层REV内中间测线所得弛豫时间
Fig. 6 Relaxation time calculated based on the center line in each layer of REV

应用价值的方法.考虑到实际工程中,像本文中浇筑相同透射距离的SCC伴随试块来用于超声检测的可能性不大,应研究小尺寸SCC伴随试块用于超声检测时的可行性.

3 结论

(1)超声波速均值和变异系数的空间分布特征可以反映材料的不均匀性,但是由于RFC内部结构复杂,仅依靠REV内的超声波速均值和变异系数难以对RFC的浇筑质量做出可靠的评价.

(2)SCC和RFC的超声波速均值随龄期延长而增长,并逐渐趋于稳定;变异系数随龄期延长而减小,并逐渐趋于稳定.RFC的超声波速均值和变异系数均显著高于SCC.

(3)本文基于黏弹性介质波动理论,以SCC伴随试块试验作为基础来推定RFC的材料力学性能是可行的:通过提取材料的黏性特征参数(弛豫时间),以其历时变化过程作为判定依据,可以较好地判定RFC的施工质量.

(4)SCC和RFC的弛豫时间随龄期延长而减小,并趋于稳定.早龄期SCC的弛豫时间显著大于RFC.随着龄期的延长,SCC的弛豫时间逐渐与RFC接近.施工质量越好,10 d以后SCC的弛豫时间随龄

期变化曲线与RFC曲线重合度越好.

(5)由于RFC的不均匀性,对于RFC的超声检测,应用超声波速均值和变异系数进行分析判断时,需要在RVE内进行高密度的分层检测;应用材料的黏性特征参数进行分析判断时,有可能采用较少的测线完成检测,这在工程实践中是更具有应用价值的方法.应用早龄期超声测试的方法有助于克服由于代表性体积单元尺寸过大给堆石混凝土工程质量检测带来的困难.

致谢:感谢清华大学金峰教授对本文工作给予的支持,感谢金峰教授和贵州大学朱柏松教授的有益讨论.

参考文献:

- [1] 金峰,安雪晖,石建军,等.堆石混凝土及堆石混凝土大坝[J].水利学报,2005(11):1347-1352.
JIN Feng, AN Xuehui, SHI Jianjun, et al. Study on rock-filled concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005(11): 1347-1352. (in Chinese)
- [2] 何涛洪,张全意,张文胜,等.堆石混凝土重力坝分缝设计的思考与实践[J].水利规划与设计,2019(2):105-107,111.
HE Taohong, ZHANG Quanyi, ZHANG Wensheng, et al.

- Consideration and practice of segmental design of rockfill concrete gravity dam[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019(2): 105-107, 111. (in Chinese)
- [3] 金峰,张国新,张全意. 绿塘堆石混凝土拱坝施工期温度分析[J]. *水利学报*, 2020, 51(6):749-756.
JIN Feng, ZHANG Guoxin, ZHANG Quanyi. Temperature analysis for Lyutang RFC arch dam in construction period[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(6):749-756. (in Chinese)
- [4] 石建军,周绍青,金峰,等. 用回弹法测试自密实堆石混凝土强度[J]. *无损检测*, 2006(6):285-287, 295.
SHI Jianjun, ZHOU Shaoqing, JIN Feng, et al. Testing the self-compacting rock-fill concrete strength by the rebound method [J]. *Nondestructive Testing*, 2006(6):285-287, 295. (in Chinese)
- [5] 李友彬,朱柏松,唐晓玲,等. 超声回弹综合法在水库堆石混凝土性能检测中的应用[J]. *水利规划与设计*, 2020(6): 129-132.
LI Youbin, ZHU Bosong, TANG Xiaoling, et al. Experimental study on rock-fill concrete performance testing by ultrasonic rebound method in Lvtang reservoir [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2020(6):129-132. (in Chinese)
- [6] 刘聪,王云隆,徐鹏超,等. 建筑废弃物堆石混凝土抗压强度的回弹测试试验研究[J]. *北方工业大学学报*, 2013, 25(1):76-79.
LIU Cong, WANG Yunlong, XU Pengchao, et al. Experimental study on compressive strength of rock-filled concrete with waste concrete by rebound method [J]. *Journal of North China University of Technology*, 2013, 25(1):76-79. (in Chinese)
- [7] VOIGT T, GROSSE C, SUN Z, et al. Comparison of ultrasonic wave transmission and reflection measurements with P- and S-waves on early age mortar and concrete [J]. *Materials and Structures*, 2005, 38(282):729-738.
- [8] TRTNIK G, GAMS M. Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1):66-75.