

文章编号:1007-9629(2023)12-1328-07

冲击波法无损检测火山石混凝土抗压强度

王震^{1,2}, 毛雯婷², 李昕成², 党玉栋^{2,*}, 黄晓敏³

(1. 云南大学 建筑与规划学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省建筑科学研究院有限公司 云南省建筑结构与新材料企业重点实验室, 云南 昆明 650223; 3. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:首次建立了冲击波-抗压强度、冲击波-回弹-抗压强度的测强曲线, 对其推定的火山石混凝土抗压强度进行了验证, 并与现行回弹法、超声回弹综合法测强曲线进行对比分析研究. 结果表明: 现行回弹法、超声回弹综合法推定火山石混凝土抗压强度的误差较大; 冲击波法、冲击波-回弹综合法测强曲线更适用于火山石混凝土, 且冲击波-回弹综合法测强曲线误差更低, 平均相对误差和相对标准差分别为 9.3%、11.3%, 该曲线对小型构件钻芯验证结果的相对残差在 $\pm 11\%$ 以内, 残差在 ± 6 MPa 以内.

关键词:火山石混凝土; 冲击波法; 回弹值; 超声波速; 测强曲线

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.12.012

Nondestructive Testing of Compressive Strength of Volcanic Rock Concrete by Impact Elastic Wave Method

WANG Zhen^{1,2}, MAO Wenting², LI Xincheng², DANG Yudong^{2,*}, HUANG Xiaomin³

(1. School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Building Structure and New Materials, Yunnan Institute of Building Research Co., Ltd., Kunming 650223, China; 3. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The strength measurement curves of impact elastic wave compressive strength and impact elastic wave rebound compressive strength have been established for the first time, and estimated compressive strength of volcanic rock concrete was verified. A comparative analysis and research were conducted with the current rebound method and ultrasonic rebound comprehensive method strength measurement curves. The results show that the current rebound method and ultrasonic rebound comprehensive method have significant errors in estimating the compressive strength of volcanic rock concrete. The strength measurement curves of impact elastic wave method and impact elastic wave rebound comprehensive method are more suitable for volcanic rock concrete. The error of the impact elastic wave rebound comprehensive method strength measurement curve is lower, with the average relative error and relative standard deviation being 9.3% and 11.3%, respectively. The relative residual error of this curve for the verification results of small component core drilling is within $\pm 11\%$, and the residual error is within ± 6 MPa.

Key words: volcanic rock concrete; impact elastic wave method; rebound value; ultrasonic wave velocity; strength curve

实际工程中最常用的混凝土抗压强度无损检测方法 方法是回弹法和超声回弹综合法^[1-2], 主要适用于表

收稿日期: 2023-03-16; 修订日期: 2023-05-17

基金项目: 云南省交通运输厅科技创新及示范项目(云交科教[2021]12号); 云南省科技计划项目(202303AC100005)

第一作者: 王震(1998—), 男, 安徽合肥人, 云南大学硕士生. E-mail: 18456531775@163.com

通讯作者: 党玉栋(1983—), 男, 甘肃武威人, 云南省建筑科学研究院有限公司正高级工程师, 博士. E-mail: yddang@163.com

层和内部匀质性较好的混凝土的抗压强度推定^[3-4]. 对于采用火山石等多孔骨料制备的混凝土,现有无损检测方法及其对应的标准均无法使用,少量文献采用超声回弹综合法对轻骨料等非常规骨料制备的混凝土强度进行无损检测研究^[5].与超声回弹综合法相比,冲击波法具有操作方便以及探测深度大的优势^[6-7].目前冲击波法主要用于检测预应力管道压浆密度或隧道衬砌混凝土内部缺陷^[7-9],冲击波速与常规混凝土弹性模量的关系可用于强度推定^[10],但尚无用于多孔骨料混凝土无损测强的研究.

本文建立了火山石混凝土抗压强度和冲击波速的测强曲线,与回弹法、超声回弹综合法测强曲线精度作对比,进一步提出了冲击波-回弹综合法测强曲线,并进行了验证.相关结果为冲击波法推定火山石

等多孔骨料混凝土强度提供了第一手技术资料,对多孔骨料在混凝土工程中的应用、无损测强方法精度提高以及相关标准规程的建立具有重要参考价值.

1 材料及试验方法

1.1 原材料

水泥:盈江县允罕水泥有限责任公司P·O 42.5水泥.火山灰:取自腾冲华辉火山石建材开发有限公司,28 d活性指数76%,流动度比98%,比表面积308 m²/kg.火山石粗骨料:取自云南腾冲某石料厂,其形貌特征和基本性能见图1和表1.石灰石机制砂:取自腾冲某石料厂,其基本性能见表2.减水剂:云南石博士新材料有限公司DS-J2缓凝型聚羧酸高性能减水剂,含固量¹⁾10.5%,减水率32.4%.水:自来水.

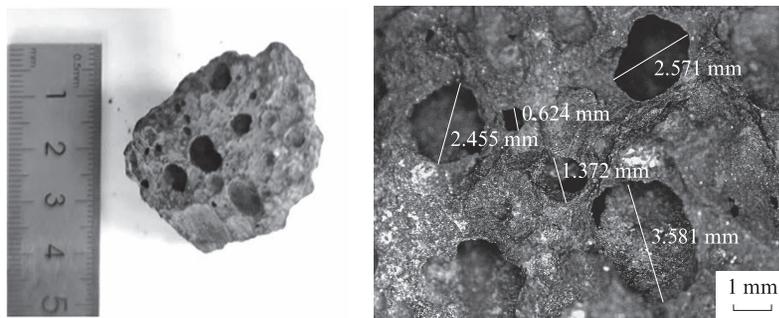


图1 火山石的形貌特征

Fig. 1 Morphological characteristics of volcanic rock

表1 火山石的基本性能

Table 1 Properties of volcanic rock

Loose bulk density/ (kg·m ⁻³)	Compact bulk density/(kg·m ⁻³)	Apparent density/ (kg·m ⁻³)	Particle size/mm	24 h water absorption (by mass)/%	Crushed value indicator(by mass)/%
1 270	1 340	2 570	5-25	2.5	15

表2 砂的基本性能

Table 2 Properties of sand

Loose bulk density/ (kg·m ⁻³)	Compact bulk density/ (kg·m ⁻³)	Apparent density/ (kg·m ⁻³)	Crushed value indicator(by mass)/%	Stone powder content(by mass)/%
1 470	1 690	2 610	23	3.9

1.2 混凝土试件制备与测试

火山石混凝土配合比如表3所示.各组配合比混凝土坍落度均控制在(200±20)mm.依据T/CECS 02—2020《超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术规程》制作强度等级为C20、C30、C40、C50、C60的标准立方体试块,每种强度等级对应14、28、60、90、180、365 d龄期各成型10组,每组3块,品字形堆放在不受日晒雨淋的地方,脱模后洒水养护7 d并自然养

护至各测试龄期,按照T/CECS 02—2020规程对混凝土试块的超声波速、回弹值和冲击波速进行检测,最后用DYE-2000A液压微机控制压力机进行立方体抗压强度试验.

冲击波速测试采用四川升拓检测技术股份有限公司的STL-CMT冲击波测试仪,测试误差低于2%^[11],为尽可能避免或减少测量误差对测试值的影响,试验采取了如下5项测量误差控制措施:(1)冲击

1)文中涉及的含固量和减水率均为质量分数.

表3 火山石混凝土配合比
Table 3 Mix proportion of volcanic rock concrete

Strength grade	Cement	Volcanic ash	Water	Machine-made sand	Volcanic rock	Admixture
C20	231.0	77.0	185.0	831.0	976.0	4.3
C30	286.0	50.0	185.0	818.0	961.0	4.7
C40	350.0	61.0	185.0	784.0	920.0	6.2
C50	394.0	69.0	185.0	710.0	942.0	7.4
C60	529.0	0	185.0	666.0	920.0	7.4

波测试为同一人、用同一台设备、用同样的方法进行;(2)测试前测试仪预热15~20 min,统一使用直径22 mm的钢锤作为激振锤^[11];(3)受信点位于试块测试面中心,测试面对角线设置4个激振点,激振点至受信点的距离均为30 mm,如图2所示;(4)测试时激振锤从激振点正上方约5 cm处落下;(5)为减小随机误差,每个激振点激振3次,每个试块可得到12个冲击波速数据,将每个测量值与平均值取差值,当差值大于1倍标准差时则剔除该数据,对剩下的冲击波速求平均值作为该火山石混凝土试块的冲击波速.在此基础上,采用最小二乘法拟合抗压强度与回弹值、冲击波速的测强曲线.

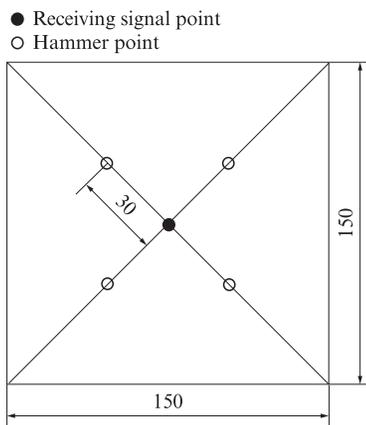


图2 冲击波速测试测点分布
Fig. 2 Distribution of measuring points(size:mm)

为验证测强曲线的精度,另成型尺寸为550 mm×150 mm×450 mm、强度等级为C20~C60的长方体小型构件,成型1 d脱模后洒水养护至7 d,同样放在不受日晒雨淋的地方,自然养护到60 d,按同样的方法测试冲击波速、超声波速及回弹值;再根据JGJ/T 384—2016《钻芯法检测混凝土强度技术规程》的要求钻芯并加工成直径100 mm、高100 mm的芯样,进行必要的磨平或补平后测试芯样的抗压强度.

1.3 冲击波法检测混凝土抗压强度的原理

冲击波法原理是在物体表面施加短暂的力学冲击(一般用小钢球敲击)产生的低频应力波传播到结

构内部,在内部缺陷处和边界处来回反射而引起瞬态共振响应,拾振器采集瞬态共振响应和振幅频谱图,最终通过信号处理得到冲击波速^[1].由于冲击波的波速与介质的密度、泊松比、动弹性模量及静弹性模量等存在良好的相关性,因此可以通过冲击波速获得混凝土的材料力学参数,从而达到无损检测的目的^[11-14].

2 结果与讨论

2.1 已有测强曲线在火山石混凝土抗压强度推定中的误差比较

采用T/CECS 02—2020规程中所列的平均相对误差(δ)及相对标准差(e_r)作为评价测强曲线精度的依据,计算方法分别如式(1)、(2)所示.

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_{cu,i}^c}{f_{cu,i}^0} - 1 \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$e_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{cu,i}^c}{f_{cu,i}^0} - 1 \right)^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: n 为试块数量; $f_{cu,i}^c$ 为第*i*个试块的强度推定值; $f_{cu,i}^0$ 为第*i*个试块的实际抗压强度.

基于本文采集到的火山石混凝土的实测抗压强度、回弹值、碳化深度和超声波速数据,依据JGJ/T 23—2011《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》、T/CECS 02—2020规程和云南地方标准DBJ 53/T-52—2021《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》、DBJ 53/T-53—2021《超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术规程》推荐的测强曲线计算出推定强度,再根据式(1)、(2),计算出不同规程对应的平均相对误差和相对标准差,结果如表4所示.表4中: f_{cu}^c 为推定强度,MPa; R 为回弹值; d_m 为碳化深度,mm; v 为超声波速,km/s.

由表4可知:使用回弹法检测火山石混凝土抗压强度时,满足上述规程规定的地区测强曲线平均相对误差 δ 不大于14%、相对标准差 e_r 不大于17%的要求;地方标准精度更高,其平均相对误差、相对标

表 4 不同规程推荐的测强曲线评价火山石混凝土精度对比
Table 4 Comparison of accuracy of volcanic concrete strength evaluated by different standards

Method	Standard code	Recommended regression curve	$\delta/\%$	$e_r/\%$
Rebound	JGJ/T 23—2011	$f_{cu}^c = 0.34488R^{1.9400}10^{-0.0173d_m}$	11.4	15.0
	DBJ 53/T-52—2021	$f_{cu}^c = (0.0022R^2 + 1.4698R - 12.8212)10^{-0.0038d_m}$	11.0	14.2
Ultrasonic rebound	T/CECS 02—2020	$f_{cu}^c = 0.0286v^{1.999}R^{1.155}$	24.6	26.7
	DBJ 53/T-53—2021	$f_{cu}^c = 0.1472v^{1.0271}R^{1.1274}$	17.4	19.6

准差分别为 11.0%、14.2%，但接近规定误差上限，检测精度不高；当使用超声回弹综合法检测火山石混凝土时，无论是行业标准还是云南地方标准，其平均相对误差和相对标准差均超过规范的要求。这是因为在使用超声回弹综合法来检测火山石混凝土时，超声波在火山石之间的传播速度因孔洞的存在而降低，使得总体推定强度小于实际抗压强度^[15-16]。因此，采用现行回弹法、超声回弹综合法测强曲线不适用于评价火山石混凝土抗压强度。

2.2 火山石混凝土冲击波法测强曲线的建立

对试验数据用 Nair 法检验^[17]，共发现异常数据 13 个，剔除后可用数据 887 个。图 3 为 C20~C60 强度等级火山石混凝土在剔除异常值后对应的冲击波速箱形图。C20~C60 强度等级火山石混凝土在剔除异常值后冲击波速统计见表 5。由图 3 和表 5 可以看出，冲击波速与火山石混凝土抗压强度表现出良好的相关性，随着强度等级的提高，冲击波速增大。

针对不同龄期、不同强度等级的混凝土试块，测

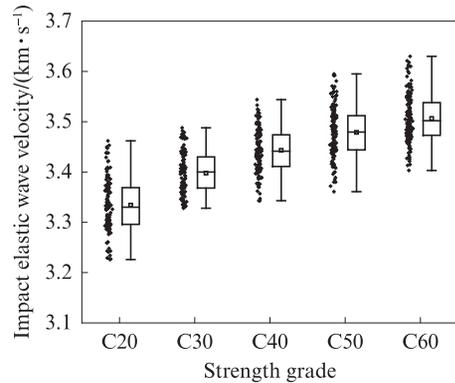


图 3 冲击波速箱形图

Fig. 3 Box diagram of impact elastic wave velocity

试其冲击波速、回弹值和抗压强度，参考 T/CECS 02—2020 规程选择线性函数、二次函数及幂函数这 3 种数学模型，对冲击波速与抗压强度采用最小二乘法进行回归分析，得到冲击波法抗压强度回归方程，并用平均相对误差和相对标准差作为指标来衡量测强曲线评价火山石混凝土的精度，计算结果见表 6，表中 v_c 为冲击波速，km/s。

表 5 冲击波速统计表
Table 5 Statistical table of impact elastic wave velocity

Parameter	C20	C30	C40	C50	C60
Total number of samples	175	177	179	178	178
Average value/(km·s ⁻¹)	3.334	3.398	3.447	3.482	3.510
1-quantile/(km·s ⁻¹)	3.296	3.368	3.411	3.444	3.473
Median/(km·s ⁻¹)	3.330	3.400	3.442	3.480	3.502
3-quantile/(km·s ⁻¹)	3.369	3.430	3.474	3.512	3.538
Standard deviation	0.052	0.041	0.041	0.048	0.048

表 6 冲击波法数据回归分析表
Table 6 Regression analysis of data from impact elastic wave method

Function	a	b	c	$\delta/\%$	$e_r/\%$
$f_{cu}^c = a + b \times v_c$	-106.856	46.900		12.6	18.4
$f_{cu}^c = a + b \times v_c + c \times v_c^2$	-3539.399	2025.031	-284.786	10.3	14.8
$f_{cu}^c = a \times v_c^b$	1.047	3.187		13.0	18.6

由表 6 可知：线性函数与幂函数虽然平均相对误差满足规范要求，但是平均相对标准差超过 17%，精度相对较差；而二次函数平均相对误差与相对标准

差分别为 10.3%、14.8%，二次函数模型方程如式(3)所示，得到的冲击波法测强曲线的回归曲线见图 4。与表 4 中现行的回弹法、超声回弹综合法测强曲线相

比,冲击波法测强曲线的平均相对误差与相对标准差更低.这是因为表6中的测强曲线是依据腾冲火山石混凝土试验数据建立的,而表4中的数据是基于全国或云南常用碎石、卵石混凝土的数据.因此表6中的测强曲线针对性更强,故检测精度也更高.

$$f_{cu}^c = -3539.399 + 2025.031 \times v_c - 284.786 \times v_c^2 \quad (3)$$

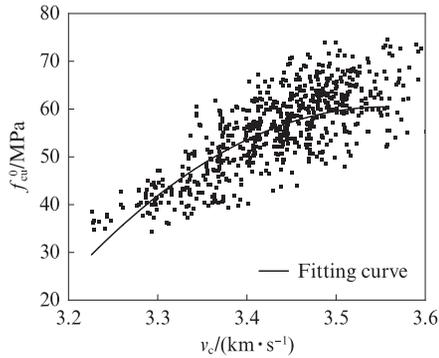


图4 冲击波法检测火山石混凝土测强曲线
Fig.4 Strength curve of volcanic rock concrete by impact elastic wave method

残差为实测值与测强曲线推定值之差.冲击波法测强曲线残差相对于实测抗压强度的偏差分布如图5所示.从图5可以看出,通过统计分析,得到偏差分布在-0.1~0.1的概率密度为62.50%,偏差分布较分散.这主要是由于火山石骨料的孔洞随机分布,使得标准立方体试件所含火山石骨料孔洞数量、分布及大小差异较大,导致数据比较分散,精度仍不高^[16].

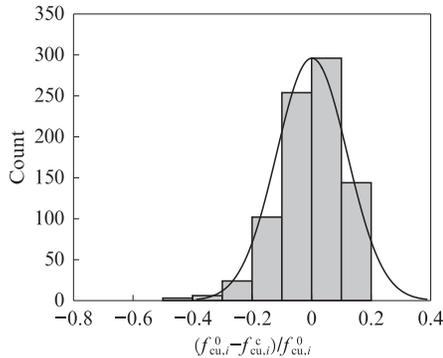


图5 冲击波法偏差分析
Fig.5 Deviation analysis of impact elastic wave method

2.3 冲击波-回弹综合法测强曲线建立及其在火山石混凝土强度推定的误差分析

为进一步提高冲击波法评价火山石混凝土抗压强度的精度,将冲击波法与回弹法两种无损检测方法相结合,建立了一种新的无损检测方法:冲击波-回弹综合法.通过最小二乘法,选用线性函数模型和幂函数模型拟合得到冲击波-回弹综合法测强曲线,如表7所示.

表7 冲击波-回弹综合法数据回归分析
Table 7 Regression analysis of impact elastic wave rebound comprehensive method data

Function	a	b	c	δ/%	e _r /%
$f_{cu}^c = a + b \times v_c + c \times R$	-89.822	22.307	1.519	9.3	11.6
$f_{cu}^c = a \times v_c^b \times R^c$	0.060	1.508	1.303	9.3	11.3

由表7可知,两种函数模型拟合度均较高,平均相对误差与相对标准差均较低.综合比较平均相对误差和相对标准差,发现幂函数模型精度更高,因此选择幂函数型冲击波-回弹综合法测强曲线,其方程如式(4)所示.

$$f_{cu}^c = 0.060 \times v_c^{1.508} \times R^{1.303} \quad (4)$$

结合表4、6、7可知,冲击波-回弹综合法的测强曲线精度较回弹法、超声回弹综合法要更高.相比于冲击波法,冲击波-回弹综合法测强曲线的平均相对误差与相对标准差分别由10.3%、14.8%降低至9.3%、11.3%,精度进一步提高.这是因为:冲击波-回弹综合法既结合了回弹法受骨料影响较小的特点,削弱了骨料孔洞不均匀对冲击波传播速度的影响;又结合冲击波法可反映混凝土内部缺陷信息的优势,弥补了回弹法检测深度仅限于混凝土表层的缺点^[18].

图6为冲击波-回弹综合法测强曲线残差相对于实测抗压强度的偏差分布.从图6可知,通过统计分析,得到偏差分布在-0.1~0.1的概率密度为71.25%,与图5相比,偏差分布更为集中,表明检测精度更高.这是因为冲击波-回弹综合法结合了回弹法和冲击波法的优点,弥补了两者各自的不足,能够更加精确地评价火山石混凝土的抗压强度.

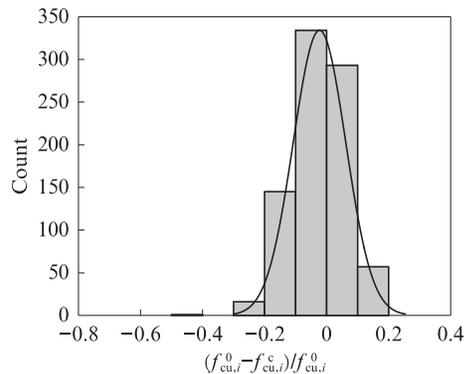


图6 冲击波-回弹综合法偏差分析
Fig.6 Deviation analysis of impact elastic wave rebound comprehensive method

2.4 冲击波-回弹综合法测强曲线的验证

制备了小型构件并采用钻芯方法来验证式(4)的精度.取残差与实测强度的比值作为相对残差,结

果见表8。由表8可知,冲击波-回弹综合法推定的火山石混凝土抗压强度相对残差基本保持在 $\pm 11\%$,残差在 ± 6 MPa以内,表明冲击波-回弹综合法能够更为精确地推定火山石混凝土抗压强度。

表8 冲击波-回弹综合法曲线验证结果

Table 8 Curve verification results of residual impact elastic wave rebound comprehensive method

Number	Impact elastic wave velocity/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	Rebound value	Actual compressive strength/MPa	Presumptive strength/MPa	Residual error/MPa	Relative residual error/%
1	3.287	33.6	32.4	35.0	-2.6	-8.0
2	3.293	35.9	34.4	38.2	-3.8	-11.0
3	3.229	34.0	34.8	34.6	0.2	0.7
4	3.334	38.6	39.7	42.8	-3.1	-7.9
5	3.293	40.0	40.0	44.0	-4.0	-10.0
6	3.330	40.6	43.2	45.6	-2.4	-5.7
7	3.351	38.1	46.0	42.4	3.6	7.8
8	3.328	45.6	47.9	53.1	-5.2	-10.8
9	3.437	43.5	54.6	52.3	2.3	4.1
10	3.399	42.6	55.0	50.1	4.9	8.9
11	3.474	46.0	58.0	57.2	0.8	1.4
12	3.528	51.9	64.4	68.5	-4.1	-6.4
13	3.537	48.0	67.8	62.1	5.7	8.4
14	3.543	50.0	69.1	65.7	3.4	4.9
15	3.502	54.5	71.3	72.2	-0.9	-1.3

3 结论

(1)采用现行标准中推荐的超声回弹综合法检测火山石混凝土抗压强度时,平均相对误差和相对标准差均超出规范限值,不能用于火山石混凝土的无损检测;现行的地方标准推荐的回弹法测强曲线可用于火山石混凝土,但平均相对误差和相对标准差达到11.0%和14.2%,检测精度不高。

(2)冲击波速与火山石混凝土抗压强度具有良好的相关性,建立的冲击波测强曲线平均相对误差和相对标准差分别为10.3%和14.8%,可用于检测火山石混凝土抗压强度。

(3)建立了冲击波-回弹综合法测强曲线公式,所推定抗压强度的平均相对误差和相对标准差分别为9.3%和11.3%,经实体小型构件钻芯验证,该测强曲线相对残差在 $\pm 11\%$ 以内,残差在 ± 6 MPa以内,因此冲击波-回弹综合法能够更准确地推定火山石混凝土的抗压强度。

参考文献:

- [1] 赵祺,桑源,高金麟,等.冲击回波法评价混凝土质量研究综述[J].混凝土与水泥制品,2019(12):18-23.
ZHAO Qi, SANG Yuan, GAO Jinlin, et al. Summary of the research on impact-echo method to evaluate the quality of concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2019(12):18-23. (in Chinese)
- [2] 魏亚,万成,左勇志,等.红外热像法与超声回弹法检测受火混凝土损伤[J].建筑材料学报,2018,21(1):131-137.
WEI Ya, WAN Cheng, ZUO Yongzhi, et al. Infrared thermal image method and ultrasonic rebound method in assessing fire-damaged concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1):131-137. (in Chinese)
- [3] 党玉栋,马晓杰,董晨辉,等.混凝土材料物理性能的空间非均匀性表现[J].建筑材料学报,2019,22(2):260-265.
DANG Yudong, MA Xiaojie, DONG Chenhui, et al. Characterization of spatial non-uniformity of physical properties for concrete materials[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2):260-265. (in Chinese)
- [4] 刘倩,刘京红,刘婷,等.超声回弹综合法检测再生砖骨料混凝土强度[J].混凝土,2019(11):174-177.
LIU Qian, LIU Jinghong, LIU Ting, et al. Ultrasonic rebound method for detecting the strength curve of recycled brick aggregate concrete[J]. Concrete, 2019(11):174-177. (in Chinese)
- [5] 杨文慧,李晓丽.超声回弹综合法在混合骨料混凝土中应用试验研究[J].硅酸盐通报,2013,32(6):1119-1125.
YANG Wenhui, LI Xiaoli. Experimental study on the application of ultrasonic-rebound combined method in specified density concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(6):1119-1125. (in Chinese)
- [6] 王志田.冲击弹性波检测结构混凝土强度研究[J].城市住宅,2020,27(3):201-202.
WANG Zhitian. Study on testing structural concrete strength by impact elastic wave[J]. Urban Residence, 2020, 27(3):201-202.

- (in Chinese)
- [7] 姜勇,吴佳晔,马永强,等.基于冲击弹性波的隧道衬砌混凝土强度检测技术研究和应用[J].铁道建筑,2020,60(6):1-5,11. JIANG Yong, WU Jiaye, MA Yongqiang, et al. Research and application of detection technology of tunnel lining concrete strength based on impact elastic wave[J]. Railway Engineering, 2020, 60(6):1-5,11. (in Chinese)
- [8] 田北平,吴佳晔,赵强,等.引水隧洞衬砌质量检测的冲击弹性波无损检测技术[J].四川建筑科学研究,2010,36(4):102-104. TIAN Beiping, WU Jiaye, ZHAO Qiang, et al. The impact elastic wave in the diversion tunnel lining quality examination non-destructive testing technology[J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(4):102-104. (in Chinese)
- [9] 魏连雨,王金伟,刘永平,等.桥梁注浆孔道中冲击弹性波波速特征检验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(1):14-18. (in Chinese) WEI Lianyu, WANG Jinwei, LIU Yongping, et al. Tests on the features of elastic wave velocity in bridge grouting tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2017, 36(1):14-18. (in Chinese)
- [10] 董玉文,陆木秀,郑磊,等.冻融循环作用下混凝土的冲击波传播特性[J].建筑材料学报,2019,22(6):928-932. DONG Yuwen, LU Muxiu, ZHENG Lei, et al. Characteristics of impact elastic wave propagation in concrete after freeze-thaw cycle[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6):928-932. (in Chinese)
- [11] 靳壮壮.旱区桥梁混凝土测强曲线的试验及应用研究[D].兰州:兰州交通大学,2022. JIN Zhuangzhuang. Experiment and application research on concrete strength curve of bridge in arid area[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [12] 李炎隆,王军忠,陈俊豪,等.冲击回波法对混凝土内部损伤检测的试验研究[J].应用力学学报,2020,37(1):149-154,478. LI Yanlong, WANG Junzhong, CHEN Junhao, et al. Experimental study on the detection of internal damage of concrete by impact-echo method [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(1):149-154,478. (in Chinese)
- [13] 丁勇楠,李曙光,田军涛,等.冲击回波法定量评估低强和高强混凝土荷载损伤[J].水力发电,2019,45(3):120-124. DING Yongnan, LI Shuguang, TIAN Juntao, et al. Quantitative evaluation of stress-induced damage in low-strength and high-strength concrete by impact-echo method[J]. Water Power, 2019, 45(3):120-124. (in Chinese)
- [14] JAGANATHAN A P. Multichannel surface wave analysis of reinforced concrete pipe segments using longitudinal and circumferential waves induced by a point impact[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 163:40-54.
- [15] 乔宏霞,路承功,焦晓光,等.兰州地区泵送混凝土测强曲线及无损检测方法适用性研究[J].混凝土与水泥制品,2017(12):74-78. QIAO Hongxia, LU Chengong, JIAO Xiaoguang, et al. Study on applicability of strength curve of pumping concrete and nondestructive testing method in Lanzhou area[J]. China Concrete and Cement Products, 2017(12):74-78. (in Chinese)
- [16] 王萧萧,赵恒,谭鑫磊,等.天然浮石混凝土力学性能与微观结构研究[J].混凝土,2019(2):61-64. WANG Xiaoxiao, ZHAO Heng, TAN Xinlei, et al. Study on mechanical properties and microstructure of natural pumice concrete[J]. Concrete, 2019(2):61-64. (in Chinese)
- [17] 焦轼伦.邯郸地区高强混凝土超声回弹综合法测强曲线试验研究[D].邯郸:河北工程大学,2019. JIAO Shilun. Experimental study on strength curve of high-strength concrete by ultrasonic rebound method in Handan area[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019. (in Chinese)
- [18] 孙拴虎,唐先习,何勇,等.基于寒旱地区冲击回波法混凝土无损检测的试验研究[J].混凝土,2018(8):22-26. SUN Shuanhu, TANG Xianxi, HE Yong, et al. Experimental study on non-destructive testing of concrete based on impact echo method in cold and damp areas[J]. Concrete, 2018(8):22-26. (in Chinese)