

# 基于超声回弹综合法的攀枝花地区曲线研究

叶正权, 谢丹

(攀枝花市交通质监站, 四川 攀枝花 617000)

**摘要:**在土木工程项目的施工过程中,水泥混凝土试件的抗压强度检测结果,不能全面、真实反映结构的整体强度,必须实施混凝土强度现场检测。利用超声回弹综合法研究了攀枝花地区常用的水泥混凝土原材料及施工工艺,以及混凝土强度的地区曲线,并对拟合曲线方程进行了验证试验。试验结果表明,所拟合建立的测强曲线具有较好的准确性、可靠性和相关性。

**关键词:**攀枝花;超声回弹综合法;地区曲线

**中图分类号:**TB115

**文献标志码:**A

## 引言

在土木工程项目的施工过程中,水泥混凝土试件的抗压强度检测结果,不能全面、真实反映结构的整体强度。主要反映在,(1)在施工期间需要掌握结构混凝土实体强度的增长情况,以确定结构的拆模、张拉、吊装等工序的时间;(2)当混凝土工程发生质量事故后,需要调查分析事故的原因,其中提供结构混凝土的实际强度数据是必不可少的;(3)对已建成的结构进行维修加固时,需要确定结构混凝土的强度,作为结构加固设计的重要决策依据之一;而《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204-2002)中也有规定,“当混凝土试件强度评定不合格时,可采用非破损或局部破损的检验测方法,按国家现行有关标准的规定对结构构件中的混凝土强度进行推定,并作为处理的依据”<sup>[1]</sup>。因此,必须研究发展混凝土强度现场检测技术,其常用方法有回弹法、钻芯法、超声回弹综合法等。回弹法由于操作简便、经济迅速,曾被广泛采用,但因检测原理存在缺陷使得测试结果存在较大误差。钻芯法的单个芯样结果准确度较高,但钻芯操作不方便、成本较高,且造成结构局部破坏,芯样数量、取芯部位对评定结果影响很大,不宜对大批量混凝土构件大面积使用。

超声回弹综合法是混凝土强度无损检测方法之一。它采用两种无损检测方法,获取多个物理参量,建立混凝土抗压强度与多个物理参量的综合相关关系,从不同角度、较全面地综合评价混凝土的强度,具有更高的准确性、可靠性,因此具有无损、简便、快捷、准确、实用的优点。但根据中国工程建设标准<sup>[2]</sup>(以下简称标准),强度推定是按全国统一测强曲线,对于地区而言,误差较大。地区测强曲线比统一测强曲线更精确,更符合实际情况。本文利用超声回弹综合法研究攀枝花地区的测强曲线,并对拟合曲线进行验证试验,包括标准试件试验、现场构件强度检测及钻芯强度的对比验证试验,以检验拟合曲线方程的准确性、可靠性和相关性,以指导攀枝花地区今后高速公路建设和其它等级公路建设,客观公正的评价工程质量、解决工程实际问题提供理论基础。

## 1 地区曲线的建立方法

根据中国工程建设标准<sup>[2]</sup>,地区测强曲线建立的方法是:首先按规范选择符合质量要求、地区常用的混凝土原材料,按常用配合比制作不同龄期、常用强度等级的立方体混凝土标准试件,养护到龄期时分别用非金属超声波检测仪检测每个混凝土试件的声时(声速)、混凝

收稿日期:2012-09-21

作者简介:叶正权(1970-),男,四川米易人,副教授,硕士,主要从事交通工程检测与质量监督方面的研究,(E-mail) pzhzjbgs@163.com

土回弹仪检测回弹值、混凝土压力试验机检测试件立方体抗压强度;然后根据最小二乘法原理,进行曲线拟合,并进行相关性比较、误差分析,以选取相关性最好的拟合方式,得到精度相对最高的回归方程。

### 1.1 细集料

攀枝花金沙江沙坝的江砂,规格为中砂,松散堆积密度为  $1.668 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,空隙率为 39.4%,含泥量 0.3%,细度模数为 2.56,表观密度  $2.752 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,试验颗粒级配见表 1。

### 1.2 粗集料

攀枝花西区生产的石灰岩碎石,试样规格为 5 ~ 31.5 mm,松散堆积密度  $1.73 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,空隙率 39.4%,针片状颗粒含量 3.2%,压碎值 8.5%,表观密度

$2.857 \text{ kg/m}^3$ ,试验颗粒级配见表 2。

### 1.3 水泥

C10、C20 采用攀枝花龙洞牌 P. C32.5R 水泥,C30 ~ C50 采用攀枝花石林牌 P. O42.5 水泥。

### 1.4 外加剂

成都合力生产的粉剂 FDN-03 型泵送剂。

### 1.5 粉煤灰

粉煤灰为攀枝花 504 电厂生产的 II 级粉煤灰。

### 1.6 硅粉

成都卓越四方环境科技有限公司生产的 SF-92 型。

### 1.7 配合比

根据攀枝花地区原材料及施工工艺情况,试验用 C10 ~ C50 混凝土的配合比见表 3。

表 1 细集料颗粒级配

参 数	颗 粒 级 配						
筛孔尺寸(mm)	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
累计筛余(%)	0	9.6	16.1	23.8	50.8	89.6	99.3
规范要求范围(%)	0	10~0	25~0	50~10	70~41	92~70	100~90

表 2 粗集料颗粒级配

参 数	颗 粒 级 配						
筛孔尺寸(mm)	31.5	26.5	19	16	9.5	4.75	2.36
累计筛余(%)	0	0.6	15.1	47.3	88.4	99.6	99.8
规范要求范围(%)	0~5	\	15~45	\	70~90	90~100	95~100

表 3 混凝土常用配合比

强度等级	每立方米混凝土用量( $\text{kg/m}^3$ )							砂率%	坍落度(mm)	水灰比
	水泥 C	细集料 S	粗集料 G	水 W	粉煤灰	外加剂	硅粉			
C10	214	672	1366	180	/	/	/	33.0	20	0.84
C20	298	673	1249	180	/	/	/	35.0	25	0.60
C30	340	746	1119	185	56	8.712	/	40.0	181	0.54
C40	411	695	1134	160	39	11.7	/	38.0	195	0.39
C50	407	699	1141	158	25	11.7	18	38.0	190	0.39

## 2 试验方法

### 2.1 试件制作和养护

试件采用  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  立方体标准试件,龄期分别为 7 d、14 d、28 d、60 d、90 d、180 d、365 d 等 7 个龄期,强度等级为常用的 C10、C20、C30、C40、C50 等 5 个强度等级,每一龄期、每一强度等级均由三个混凝土试件组成,共计 105 个试件;每一混凝土强度等级的试件在同一天内按规范要求成型后,采用标准养护方法养护,待养护到规定龄期后取出进行试验<sup>[2]</sup>。

### 2.2 主要的试验仪器

超声波检测仪(武汉岩海工程技术有限公司生产的 RS-ST01D 型非金属超声波检测仪);回弹仪(天津市建

筑仪器试验机公司制造的指针直读式 HT-225 型中型混凝土回弹仪);压力试验机(压力试验机为浙江金华试验机厂生产的一级精度 YE-2000B 型液压数显 200 t 混凝土压力试验机)。

上述仪器均符合国家最新的相关规程要求,均具有产品合格证及检定证,且均在有效的检定期内。

### 2.3 数据采集

待试件养护到规定龄期后,将每个试件浇筑侧面上的尘土、污物等擦拭干净,以同一强度等级混凝土的 3 个试件作为一组,依次进行编号整理,分别对每个试件使用超声波检测仪检测声速、混凝土回弹仪检测回弹值、压力试验机检测抗压强度的试验顺序进行数据采集。

### 3 数据整理

#### 3.1 原始数据

每次试验后,即进行下列检测数据整理工作:

对每个试件的三组原始试验数据分别进行整理:根据每个试件测读的三个声速值,计算其平均值  $v$  作为该试件声速代表值;把 16 个回弹值按照大小排序,去掉 3 个最大值和 3 个最小值,取余下 10 个有效回弹值并计算平均值  $R$ , 作为该试件回弹代表值;记录试件的破坏荷载  $F_i$ , 根据公式计算试件的立方体抗压强度  $f_{cu}^e$ 。

从人员操作、仪器设备、试验方法、原材料及环境因素等方面分析每个检测数据的有效性、准确性,根据每组声速值、回弹值和抗压强度数据的变化趋势,及时发现各个变异试验数据,分析原因,舍弃变异的试验数据,保证试验数据的准确、可靠、有效。

对每组有效的试验数据分别进行归类、统计、存储、汇总。每个试件的原始试验数据见表 4。

将所有试件的抗压强度实测值按由小到大的顺序排列,回弹值和声速值按其对应的强度值的顺序排列,重新排列的原始数据如图 1 所示。

根据试验检测数据汇总,试件抗压强度实测值的范围在 12.4 MPa ~ 77.5 MPa 之间,混凝土回弹值的范围

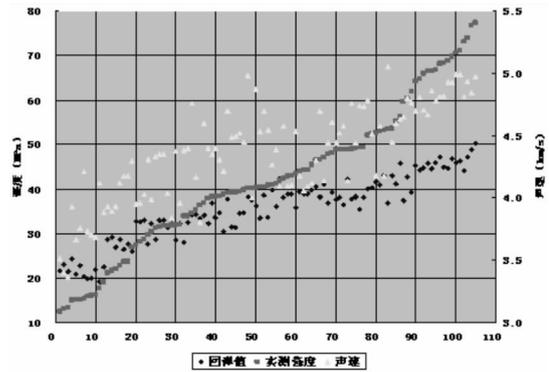


图 1 原始试验数据图

在 19.0 ~ 50.2 之间,声速值的范围在 3.366 km/s ~ 5.051 km/s 之间。根据原始试验数据图 1,可以发现三组试验数据总体存在比较好的相关性,总体趋势是一致的。

#### 3.2 曲线拟合及回归方程的比较与选择

根据原始数据的大致趋势,采用二元线性回归  $f_{cu}^e = a + bv + cR$ 、二元指数乘幂混合回归  $f_{cu}^e = ae^{bv}R^c$ 、二元幂函数回归  $f_{cu}^e = av^bR^c$  三种拟合方式,按照最小二乘法原理,利用计算机 EXCEL 的数据分析统计函数,进行曲线拟合、计算回归系数及误差分析、相关性比较<sup>[3]</sup>;其结果见表 5。

表 4 原始数据

编号	抗压强度实测值 (MPa)	回弹值 $R$	超声值 $v$ (km/s)	编号	抗压强度实测值 (MPa)	回弹值 $R$	超声值 $v$ (km/s)
1	13.3	21.5	3.366	54	40.5	38.6	4.702
2	12.4	21.7	3.512	55	48.9	42.1	4.135
3	13.1	23.0	3.395	56	49.4	35.4	4.743
4	15.9	19.8	3.735	57	46.7	38.3	4.702
5	16.0	19.9	3.701	58	66.6	45.8	4.669
6	15.1	20.8	3.669	59	66.7	44.5	4.866
7	28.6	32.9	4.029	60	64.7	44.3	4.808
8	31.8	31.4	4.042	61	31.9	28.4	4.376
9	28.2	32.6	3.961	62	31.2	28.6	4.331
...	...	...	...	...	...	...	...

表 5 各回归方程的比较

拟合方式	回归方程	相对误差 $e_r$	平均相对误差 $\delta$	相关系数 $R$
二元线性回归	$f_{cu}^e = -66.9289 + 11.587v + 1.645R$	20.70%	13.52%	0.961
二元指数乘幂混合回归	$f_{cu}^e = 0.0505e^{0.328v}R^{1.468}$	11.22%	9.29%	0.972
二元幂函数回归	$f_{cu}^e = 0.0269v^{1.431}R^{1.456}$	11.08%	9.16%	0.973

将各试件的回弹值、声速值分别代入以上三个回归方程和全国统一混凝土抗压强度换算公式  $f_{cu,i}^e = 0.0162v_{ai}^{1.656}R_{ai}^{1.410}$  [2] 中,得到各回归方程和全国统一抗压强度换算公式下的强度计算值,将各强度计算值和试件抗压强度均按由小到大的顺序排列分别点绘在图 2 中。

根据表 5 的结果,可以发现选用二元幂函数回归的

精度更高,相关性更好,且其强度相对误差  $e_r$  (11.08%) 不大于规范要求的 14%,平均相对误差  $\delta$  (9.16%) 不大于 14.0% [4],相关系数  $R$  为 0.973,不小于 0.9。用二元幂函数回归曲线方程计算回弹值在 19 ~ 51、声速在 3.34 km/s ~ 5.1 km/s 范围内的强度换算值,绘制成如图 3 的三维曲面图。

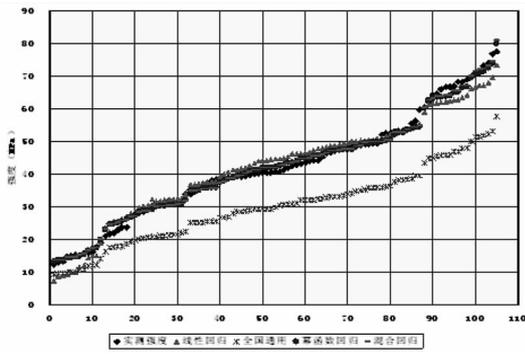


图2 各回归方程、全国通用换算公式及实测强度比较

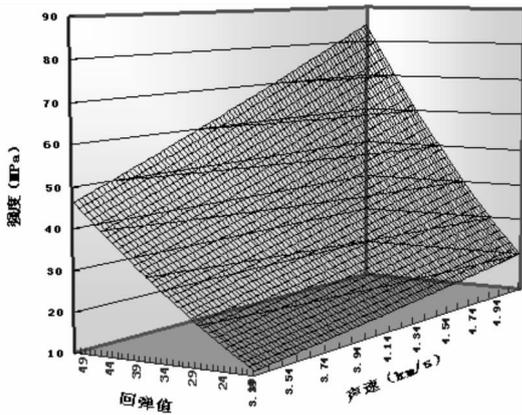


图3 拟合方程强度计算结果曲面图

## 4 验证试验

### 4.1 试件验证

分别用攀枝花石灰岩碎石和攀钢矿渣碎石成型的、没有参与回归分析的混凝土试件进行验证试验,对试件进行超声波声速值-回弹值-抗压强度检测,与全国统一测强曲线、拟合曲线的换算值进行比较、分析,其结果见表6。

表6 各回归方程的比较

碎石品种 误差	石灰岩碎石混凝土		矿渣碎石混凝土	
	全国曲线	拟合曲线	全国曲线	拟合曲线
相对误差 $e_r$ %	36.80	12.22	74.93	20.32
平均相对 误差 $\delta$ %	32.22	9.51	67.08	14.94

通过以上两种粗集料混凝土试件的验证试验,根据表6各种条件计算的各项误差,可以得出以下结论:

(1)用拟合曲线公式对石灰岩碎石混凝土的超声回弹换算,其强度相对误差  $e_r$ 、平均相对误差  $\delta$  均满足规范规定的要求。

(2)用拟合曲线公式对矿渣碎石混凝土的超声回弹

换算,其强度相对误差  $e_r$ 、平均相对误差  $\delta$  均不能满足规范规定的要求。

(3)用全国统一曲线公式对石灰岩碎石和矿渣碎石混凝土的超声回弹换算,其强度相对误差  $e_r$ 、平均相对误差  $\delta$  均不能满足规范规定的要求。

(4)用拟合曲线公式对石灰岩碎石和矿渣碎石混凝土的超声回弹换算,其强度相对误差  $e_r$ 、平均相对误差  $\delta$  均小于用全国统一曲线公式换算的相对误差  $e_r$ 、平均相对误差  $\delta$ 。

### 4.2 实体检测验证

对石灰岩碎石混凝土进行现场验证检测。将拟合曲线强度计算值与修正后的强度值进行比较,其相对误差  $e_r$  为 4.37%、平均相对误差  $\delta$  为 3.84%,说明拟合曲线与修正后的强度值非常接近。

### 4.3 芯样强度验证

对石灰岩碎石混凝土进行现场超声回弹综合法检测,之后在其同一部位钻取芯样,检测抗压强度,将现场检测的声速值、回弹值分别代入全国统一测强曲线、拟合曲线进行计算,并比较其相对误差、平均相对误差,检验拟合曲线的相关性<sup>[5]</sup>。

表7 全国统一曲线与拟合曲线的误差比较

误差	全国曲线	拟合曲线
相对误差 %	42.53	6.29
平均相对误差 %	40.80	4.47

根据表7结果,拟合曲线的相对误差  $e_r$  (6.29%) 和平均相对误差  $\delta$  (4.47%) 均比全国统一测强曲线的相对误差  $e_r$  (42.53%) 和平均相对误差  $\delta$  (40.80%) 小,且拟合曲线的误差均满足规程的要求,说明拟合曲线公式的强度误差大大小于全国统一测强曲线的强度误差,其强度换算结果更接近于芯样的实测抗压强度。

## 5 结束语

结合工程实践和攀枝花地区工程建设的具体情况,采用当地常用的混凝土原材料,制作不同强度等级、不同龄期的石灰岩碎石普通混凝土试件,分别对每个试件的声速、回弹值及抗压强度进行有效测试,运用最小二乘法原理进行曲线拟合,得到拟合曲线方程其强度相对误差  $e_r$  为 11.08%,不大于规范要求的14%,平均相对误差  $\delta$  为 9.16%,不大于要求的14%,相关系数  $R$  为 0.973,不小于0.9,符合规程要求。同时,对建立的测强曲线进行标准试件、现场强度检测和芯样强度验证试验,检验了拟合曲线方程的准确性、可靠性和相关性。

本文研究的超声回弹综合法攀枝花地区测强曲线

对象仅限于混凝土龄期在 7 d ~ 365 d 范围内的石灰岩碎石普通混凝土,所以适用范围有限。今后,对于此次研究的攀枝花地区曲线还需要在以下几方面扩展其使用范围:原材料主要是粗集料的选择,碎石与卵石,石灰岩碎石、辉长岩碎石与攀钢高钛矿渣碎石;施工工艺方面,在 C10 ~ C50 普通混凝土的基础上增加高强混凝土和泵送混凝土;混凝土养护方法的选择,自然差生、蒸汽养生及标准养护;试件尺寸不同影响的研究,标准试件和非标准试件;以及延长混凝土测强曲线龄期等方面对测强曲线作进一步的拓展研究,从而使超声回弹综合法<sup>[6-7]</sup>得到更广泛的应用。

#### 参 考 文 献:

- [1] GB50204-2002,混凝土结构工程施工质量验收规范[S].
- [2] CECS02:2005,超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程[S].
- [3] 徐利军,胡水江,徐君,等. 超声回弹综合法检测混凝土强度曲线的制定与研究[J]. 科技创新导报,2012(5):9-10.
- [4] JGJT23-2011,回弹法检测混凝土抗压强度技术规程[S].
- [5] CECS03:2007,钻芯法检测混凝土强度技术规程[S].
- [6] 姜文飞. 超声回弹综合法测强曲线的建立[J]. 科技咨询,2011(24):99.
- [7] 姜开明. 超声回弹综合法对砼构件强度检测技术的应用[J]. 山东交通科技,2010(2):42-44.

## Study of Ultrasonic Rebound Curve of Panzhihua Area Based on Synthetic Method

YE Zheng-quan, XIE Dan

(Panzhihua City Traffic Quality Supervision Station, Panzhihua 617000, China)

**Abstract:** In the construction process of civil engineering project, concrete compressive strength of test results can not fully reflect the overall strength of structure, so field concrete strength testing must be carried out. By synthetic method of ultrasonic rebound common cement concrete raw material, construction technology and the areas curve of concrete strength of Panzhihua region are studied. The curve fitting equation is verified. The test results show that it has good accuracy, reliability and relevance by fitting the establishment of strength test curve.

**Key words:** Panzhihua; ultrasonic rebound combined method; area curve