

提高回弹测砼抗压强度精度的校准曲线法*

陈 治 平

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

摘要 在全国测强曲线(地区测强曲线)的基础上,用建立校准曲线的方法来推定混凝土的抗压强度.该法针对性强、偏差小,在特殊区段有足够的可信度,其不仅可用于正在施工的工程检测,也可用于已有结构砼强度的检测.该法简便可靠且切实可行,确可达到提高检测精度的目的.

关键词 回弹, 砼抗压强度, 精度, 校准曲线, 碳化深度

分类号 TU 413

目前我国常用的砼抗压强度非破损检验方法有回弹法、超声-回弹综合法、钻芯法和拉拔法等,其中以回弹法的应用最为广泛.现已制定了《回弹法评定砼抗压强度技术规程》(JGJ23-85),新的名称为《回弹法检测砼抗压强度技术规程》(JGJ/T23-92)也已出版^[1].部颁规程要求各地区如有条件应建立地区测强曲线或专用测强曲线.即按最佳配合比设计5个强度等级,每一龄期制作6个150 mm的立方体试件,且回归分析时引入碳化深度变量.这样,即使是专用曲线也必须成型几十个立方试件,这对大型工程是可行的,但对中小型工程和已有结构就不适用了.若直接套用全国统一测强曲线(以下简称“ $f_{全固}$ ”),则检测结果偏差较大.本文认为可通过建立校准曲线(以下简称:“ $f_{校准}$ ”)来达到提高检测精度的目的.

1 建立校准曲线的方法

目前已有的地区和全国统一测强曲线都是通过大量试验和工程检验后确定的,大体能反映回弹测试参数与被测砼抗压强度之间的规律,可把它们作为建立校准曲线的基础.

1.1 曲线的建立

对于正在施工的工程可以成型3~6个立方试块作为标准点.试块应与被测结构砼的配合比材料、成型工艺和养护条件相同,且龄期相近.按规程测定各试块回弹值 R_a 及碳化深度 l_i 后,测定各试块的实际抗压强度 $f_{cu,i}$,取对应于各项指标的平均值 $\bar{R}_a = \Sigma R_{a,i}/n$, $\bar{l} = \Sigma l_i/n$, $\bar{f}_{cu} = \Sigma f_{cu,i}/n$ (n 为试块数量)作为校准点的回弹参数 R_a^0 、碳化参数 l_0 和强度参数 f_{cu}^0 .对于已建成的结构,其校准点的强度参数通过钻芯取样获得.即先进行非破损检测,取居中测区的回弹参数 R_a^0 和碳化参数 l_0 ,再在这些测区钻取符合要求的芯样3~6个,测定其抗压强度,并取平均值作为校准点的强度参数 f_{cu}^0 .然后,对已有的地区测强曲线进行校准,以建立校准曲线.回弹测强曲线大多数采用幂函数表达式,设被校准的曲线为 $f_{cu}^0 = a \cdot R_a^{\beta} \cdot 10^{cl}$ (a, β, c 为统计参数),令 $f_{cu}^0 = a \cdot R_a^{\beta_0} \times 10^{cl}$,则所建立的校准曲线为 $f_{校准} = a \cdot R_a^{\beta_0} \times 10^{cl}$,式中 $\beta_0 = (\lg f_{cu}^0 - cl_0 - \lg a)/$

* 本文1996-03-15收到

$\lg R_s^0$.

1.2 曲线的偏差

建立 $f_{\text{校准}}$ 后,各测点的推定强度与结构砼实际强度的偏差为 $e = (f_{\text{cu}}^c / f_{\text{cu}}^0 - 1) \times 100\%$.

设被校准的曲线为 $f_1 = \alpha_1 (kR_s^0)^{\beta_1} \times 10^{c_1 l_0}$, 结构砼的实际曲线为 $f_0 = \alpha_0 (kR_s^0)^{\beta_0} \times 10^{c_0 l_0}$, 式中 k 为各回弹值与 R_s^0 的比例系数, 即 $k = R_s / R_s^0$; b 为各碳化深度值与 l_0 的比例系数, 即 $b = l / l_0$. 在校准点处, $f_{\text{cu},1} = f_{\text{cu},0}$. 令 $\alpha_1 R_s^{0\beta_1} \cdot 10^{c_1 l_0} = \alpha_0 R_s^{0\beta_0} \times 10^{c_0 l_0}$, 得 $\alpha_1 / \alpha_0 \cdot R_s^{0\Delta\beta} \times 10^{(c_1 - c_0)l_0} = 1$. 于是 $e = f_1 / f_0 - 1 = \alpha_1 / \alpha_0 (kR_s^0)^{\Delta\beta} \times 10^{b(c_1 - c_0)l_0} - 1$, 即 $e = k^{\Delta\beta} \times 10^{(b-1)(c_1 - c_0)l_0} - 1$, 式中 $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_0$, 此式即为校准曲线的推定强度偏差公式.

2 校准曲线适用性的验证

如前所述, $f_{\text{地区}}$ 和 $f_{\text{全国}}$ 均能反映回弹测试参数与被测砼强度之间的规律, 但 $f_{\text{地区}}$ 是在以本地区常用的代表性材料、成型养护工艺和龄期为基本条件的基础上制定的. 这种曲线, 对于本地区而言, 它的适应性和强度推定误差均优于 $f_{\text{全国}}$. 为验证校准曲线的适用性, 本文以《四川省回弹法测定砼抗压强度技术规程》^[2] 中的两类曲线 (简称 $f_{\text{四川, 碎石}}$ 及 $f_{\text{四川, 卵石}}$) 比拟实际结构中砼强度与回弹值之间的关系, 并以《回弹法评定砼抗压强度技术规程》(JGJ23-85) 中给出的测强曲线 $f_{\text{全国}}$ 作为被校正的曲线, 即

$$f_{\text{全国}} = 0.02497 R_s^{2.0108} \cdot 10^{-0.0358l}, \quad (1)$$

$$f_{\text{四川, 碎石}} = 0.014183 R_s^{2.22354} \cdot 10^{-0.0418l}, \quad (2)$$

$$f_{\text{四川, 卵石}} = 0.011641 R_s^{2.21575} \cdot 10^{-0.0418l}. \quad (3)$$

$f_{\text{全国}}$ 与 $f_{\text{四川}}$ 的平均碳化深度 \bar{l} 均为 0~6 mm, 且大于 6 mm 者按 6 mm 计算. 现以 $R_s^0 = 30$ 和碳化深度居中值 $l_0 = 3$ mm 作为标准点的回弹参数值和碳化参数值, 把它们分别代入式(2), (3), 可得校准点处的强度参数值 $f_{\text{cu, 碎石}}^0 = 20.5$ MPa, $f_{\text{cu, 卵石}}^0 = 16.4$ MPa. 以 $R_s = 30$, $l = 3$ mm 代入式(1), 得 $f_{\text{cu, 全国}}^0 = 18.2$ MPa, 它与校准点强度参数值的偏差为 $e = (f_{\text{cu, 全国}}^0 / f_{\text{cu}}^0 - 1) \times 100\%$, 即 $e_{\text{全国, 碎石}} = -11.0\%$, $e_{\text{全国, 卵石}} = -11.4\%$. 由式(3)可得 $\beta_{\text{碎石}}^0 = 2.045050632$, $\beta_{\text{卵石}}^0 = 1.979189696$. 于是 $f_{\text{校准, 碎石}} = 0.02497 R_s^{2.045050632} \times 10^{-0.0358l}$, $f_{\text{校准, 卵石}} = 0.02497 R_s^{1.979189696} \times 10^{-0.0358l}$.

日本建筑学会《砼配合比设计规程》中关于砼碳化深度 l (cm) 的推算公式为 $l = \sqrt{(w/c - 0.25)^2 t / 0.3(1.15 + 3w/c)}$, 式中 w/c 为水灰比, t 为砼龄期(年). 若以此公式推算对应于制定 $f_{\text{四川}}$ 时各个水灰比的砼碳化深度 l . 可发现当砼龄期在 1 年以内时, 绝大部分的砼正常碳化深度不超过 4 mm. 把 $R_s^0 = 30$ 和 $l_0 = 2$ mm 分别代入 $f_{\text{四川, 碎石}}$ 及 $f_{\text{四川, 卵石}}$, 可得 $f_{\text{cu, 碎石}}^0 = 22.5$ MPa, $f_{\text{cu, 卵石}}^0 = 18.0$ MPa. 同理可推得对应于 $R_s^0 = 30$, $l_0 = 2$ mm 的校准曲线为 $f_{\text{校准, 碎石}} = 0.02497 R_s^{2.049112587} \times 10^{-0.0358l}$, $f_{\text{校准, 卵石}} = 0.02497 R_s^{1.983251651} \times 10^{-0.0358l}$.

3 各测强曲线计算值的比较

$k = 0.8 \sim 1.3$, $l_0 = 2$ mm 及 $l_0 = 3$ mm, 对应于不同的碳化深度比例系 b , 分别用测强曲线 $f_{\text{校准}}$, $f_{\text{全国}}$ 及比拟实际砼结构的 $f_{\text{四川}}$ 的计算公式来计算各 f_{cu} 值, 现将其结果列于表 1. 各测强曲线按骨料种类对应于不同 k , l_0 及 b 值的偏差 e 也综合列于表 2, 以资比较. 表 2 中的 $e_{\text{校准}} =$

表1 $R_a^0=30, k=0.8\sim 1.3, b=0\sim 2.0$ 时各测强曲线的强度推定值 f_{cu} (MPa)

k	曲线类型	碎石/mm							卵石/mm						
		$l=0$		$l_0=2$			$l_0=3$		$l=0$		$l_0=2$			$l_0=3$	
		0	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0	0	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0
0.8	$f_{四川}$	16.6	15.1	13.7	11.3	14.4	12.5	—	13.3	12.1	11.0	—	11.5	10.0	—
	$f_{校准}$	17.3	15.5	14.3	12.1	14.7	13.0	10.1	14.0	12.6	11.6	9.8	11.9	10.5	—
	$f_{全国}$	14.9	13.7	12.6	10.7	13.2	11.6	—	14.9	13.7	12.6	10.7	13.2	11.6	—
1.0	$f_{四川}$	27.3	24.8	22.5	18.6	23.6	20.5	15.3	21.8	19.8	18.0	14.8	18.9	16.4	12.2
	$f_{校准}$	27.3	24.5	22.5	19.1	23.1	20.5	16.0	21.8	19.5	18.0	15.3	18.5	16.4	12.8
	$f_{全国}$	23.3	21.5	19.8	16.8	20.6	18.2	14.2	23.3	21.5	19.8	16.8	20.6	18.2	14.2
1.3	$f_{四川}$	48.9	44.4	40.4	33.3	42.4	36.7	27.5	39.0	35.4	32.2	26.6	33.8	29.2	21.9
	$f_{校准}$	46.8	41.9	38.6	32.7	39.6	35.0	27.3	36.8	32.9	30.3	25.7	31.1	27.5	21.5
	$f_{全国}$	39.5	36.4	33.5	28.4	34.9	30.9	24.1	39.5	36.4	33.5	28.4	34.9	30.9	24.1

$(f_{校准}/f_{四川}-1)\times 100\%$, $e_{全国}=(f_{全国}/f_{四川}-1)\times 100\%$, 它们分别代表 $f_{校准}$ 及 $f_{全国}$ 与 $f_{四川}$ 在同一回弹值 R_a 和同一碳化深度 l 下所对应的强度推定值的偏差. 表格中只有横杠而无数据的空格为 $f_{cu}<9.8$ MPa, 超出曲线范围者按规范要求不予外推.

表2 $R_a^0=30, k=0.8\sim 1.3, b=0\sim 2.0$ 时 $f_{校准}$ 和 $f_{全国}$ 相对于 $f_{四川}$ 的强度推定偏差值 $e(\%)$

k	偏差类型	碎石/mm							卵石/mm						
		$l=0$		$l_0=2$			$l_0=3$		$l=0$		$l_0=2$			$l_0=3$	
		0	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0	0	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0
0.8	$e_{校准}$	3.8	1.1	4.0	6.9	1.9	4.1	—	5.1	3.9	5.3	—	3.3	5.4	—
	$e_{全国}$	-10.5	-9.2	-7.9	-5.4	-8.6	-6.7	—	11.8	13.4	15.0	—	14.2	16.6	—
1.0	$e_{校准}$	0	-1.4	0	2.8	-2.1	0	4.2	0	-1.4	0	3.4	-2.1	0	4.2
	$e_{全国}$	-14.6	-13.4	-12.2	-9.8	-12.8	-11.0	-7.2	6.8	8.3	9.8	12.9	9.1	11.4	16.1
1.3	$e_{校准}$	-4.3	-5.8	-4.5	-1.8	-6.5	-4.6	-0.5	-5.7	-7.2	-5.9	-3.3	-7.9	-6.0	-2.0
	$e_{全国}$	-19.2	-18.1	-17.0	-14.7	-17.6	-15.8	-12.3	1.2	2.6	4.1	7.0	3.4	5.5	9.9
	$e_{校准,max}$	-4.3	-5.8	-4.5	6.9	-6.5	-4.6	—	-5.7	-7.2	-5.9	—	-7.9	-6.0	—
	$e_{全国,max}$	-19.2	-18.1	-17.0	-14.7	-17.6	-15.8	—	11.8	13.4	15.0	—	14.2	16.6	—

从表2可看出, 与 $f_{校准}$ 及 $f_{全国}$ 对应的各个 e_{max} 关系如下: $e_{校准,max} < e_{全国,max}$, 即经校准以后的测强曲线 $f_{校准}$ 的精度明显优于 $f_{全国}$. 这说明对于满足在被校准曲线龄期内的砧结构, 若分别取 R_a 及 l 的居中值作为校准点处的回弹参数和碳化参数(即 R_a^0 及 l_0), 在 $k=0.8\sim 1.3$ 范围内, $f_{校准}$ 的最大偏差 e_{max} 可控制在 8% 以内, 而 $f_{全国}$ 的 e_{max} 可达 19% 以上, 且碎石砧的 $f_{校准}$ 精度优于卵石砧的 $f_{校准}$.

根据 $l_0=2$ mm 及 $l_0=3$ mm 两组数据的同类项比较, 若对碳化深度分组(如分为 $0\leq l_1\leq 3, 3\leq l_2\leq 6$ 两组, 取 $l_{01}=1.5$ mm, $l_{02}=4.5$ mm)建立 $f_{校准}$, 则 $f_{校准}$ 的精度可进一步提高. 从表1和表2还可以看出, 同时处于室外或室内的同一批建筑构件, 它们的环境条件大体一致, 其砧碳化深度也大致相同, 即 $b=l/l_0=1$ (尤其当 $l_0=l=0$ 时), $f_{校准}$ 的偏差为最小.

4 结论

对于中小型工程,特别是砼等级单一的情况下,不一定要成型不同等级的大量砼试块去制定完整的专用测强曲线,可采用建立校准测强曲线的方法.其所需试块(或芯样)少,工作量也小,且曲线的针对性强、偏差小,在特殊区段范围内有足够的可信度.该法不仅可用于正在施工工程的检测,也可用于已有结构砼强度的检测.

本文用 $f_{\text{四川}}$ 来比拟实际工程的结构砼强度,以 $f_{\text{全国}}$ 作为被校准的测强曲线.由于地区测强曲线 $f_{\text{地区}}$ 的强度误差值低于 $f_{\text{全国}}$ 的强度误差值,当有地区测强曲线时,可把地区测强曲线作为被校准的测强曲线,则据此建立的 $f_{\text{校准}}$ 的曲线精度将进一步得到提高.

参 考 文 献

- 1 晏文钊. 砼回弹测强的试验研究. 四川建筑科学研究, 1985, (1): 40~45
- 2 中华人民共和国行业标准. JGJ/T23-92 回弹法检测砼抗压强度技术规程. 北京: 中国华龄出版社, 1994

Calibration Curve Method for Improving Accuracy of Resilience Method in Measuring Compressive Strength of Concrete

Chen Zhiping

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract Based on national and regional curve for measuring compressive strength of concrete, a calibration curve method is formed for inferring compressive strength of concrete. The method is explicit in what it directed against, small in deviation and adequately confident in special sector. It can be applied to the detection in engineering under construction and in engineering with structured concrete strength. It is a handy, reliable and feasible method with an accuracy higher than that of resilience method.

Keywords resilience, compressive strength of concrete, accuracy, calibration curve, thoroughness of carbonization