

实用路面混凝土抗折强度的 无损检测方法**

卫 军(郑州工学院)

周之津(河南省交通厅公路局)

赵永义(焦作市公路总段)

聂建国(郑州工学院)

摘 要: 通过分析大量试验数据,建立了混凝土抗折强度与超声、回弹测试指标间的相关关系,并详细地研究了现场试验条件对测试结果的影响,制定出一套实用的混凝土强度超声、回弹综合测试方法。经现场实测比较,本方法测试速度快、使用方便,误差在 15% 以内,能满足工程实用需要。

关键词: 混凝土抗折强度测试,水泥混凝土路面,超声、回弹综合法

中国图书分类号: U214.1

国家标准《水泥混凝土路面施工及验收规范(GBJ97-87)》⁽¹⁾ 规定:控制混凝土强度质量的方法有二种:小梁试件的 28 天抗折强度以及按现场钻芯取样的劈裂强度推算抗折强度。但它们均有不便之处:小梁试件龄期长,难以真实反映路面原位混凝土的强度变化;现场钻芯取样对路面有破坏性,同时试件的加工修整工作量也较大。所以,有必要寻找新的途径,作为现场混凝土强度质量控制的手段。

用超声、回弹综合法对混凝土构件的抗压强度进行测试评定,已在建筑、冶金、水电等领域中获得应用⁽²⁾⁽³⁾。混凝土强度的无损检测方法,在严格控制材料因素的前提下,有较好的精度,非常适用于现场控制混凝土强度质量。但由于路面混凝土强度的控制指标为抗折强度以及面板的结构形态等方面的原因,对路面混凝土进行测试异于混凝土构件。要建立这种检测方法,必须对混凝土的路面超声、回弹测试指标的测量方法、混凝土的抗折强度与测试指标的相关性以及路面检测的试验条件对测试结果的影响等问题进行研究。

为建立实用的无损检测方法,笔者从 1988 年开始,分三期共进行了 1300 多组(单块组)试块的试验,并作了深入研究。

* 收稿日期: 1991-8-28

** 参加试验工作的还有:李亚平、冯永齐等同志。

1 测试方法的确定

1.1 回弹值的测试

检测路面混凝土不同于其他结构混凝土,无法在成型侧面上进行。成型面上的回弹值是否能作为混凝土的回弹测试指标?有资料认为,成型面上的回弹值低于侧面上的回弹值⁽⁴⁾,但二者是否呈一致性变化?为此,我们专门进行了对比试验,试验结果见表1。

由表中看出,成型面上的回弹值的确小于侧面回弹值,二者的变化规律也大体一致,根据线性回归分析结果,用统计量 r 作检验,成型面和侧面上的回弹值均属于高度线性相关,由此证明成型面上的回弹值作为回弹测试指标与侧面上的回弹值具有等同的代表性。

表 1 成型面与侧面回弹值对比结果

成 型 面		侧 面		$N_{成}=1.034 \quad N_{侧}=2.606$		
回弹值	均方差	回弹值	均方差	相关系数	公式偏差	临界相关系 ($\alpha=0.01$)
32.25	0.37	33.75	0.15			
30.81	0.27	32.62	0.28			
32.69	0.37	34.44	0.53			
33.31	0.66	33.69	0.41	0.9538	1.084	0.798
30.75	0.39	33.00	0.41			
32.00	0.81	33.00	0.83			
38.00	0.33	40.81	0.36			
36.75	0.26	40.44	0.44			
40.12	0.54	40.50	0.19			
均 值	0.44	均 值	0.40			

* 1. 每个侧面测试 24 个结果

2. 表中所列回弹值为测试面平均值(去样 4 个最大和 4 个最小值)。

1.2 声速测试方法的确定

混凝土路面的声速测定必须用平测法,除了影响混凝土的对测速度的因素对混凝土的平测速度有影响以外,最主要的是平测,换能器与试件有一定的接触面,难以确定所测“声时”的真实“声程”,导致平测声速与对测声速不等值,据有关研究结果⁽⁵⁾,现有二类确定平测声速的方法。

一类是“有效距离”法,即以同测距的对测声速为基准,根据平测声时反求“声程”,由此得出距离修正系数 δ ,然后按下式计算实际声程:

$$L_0 = L - \delta \quad (1)$$

式中 L_0 —实际声程, L —探头中心距离。

另一类方法是以探头中心距离为声程,根据实测声时计算声速。(包括求多点的平均声速值)或以距离—时间的回归斜率作为平测声速。

究竟哪类方法最为合适，我们进行了一系列试验。限于篇幅，表 2、表 3，仅列出部分试验结果。

表 2 δ 值

试件代号	对测速度 ($L=15\text{cm}$)	$\delta(\text{cm})$						
		$L=15\text{cm}$	$L=20\text{cm}$	$L=25\text{cm}$	$L=30\text{cm}$	$L=35\text{cm}$	$L=40\text{cm}$	$L=45\text{cm}$
A_2-1	4935	1.38	1.49	1.17	1.17			
A_2-2	5007	2.13	1.30	0.94	0.71			
A_3-1	5346	1.81	1.69	1.57	0.82	0.49	0.25	-0.23
A_3-2	5547	1.82	1.25	0.51	-0.46	-0.42	-0.92	-1.51

对测声速、平均平测

表 3 声速和回归平测声速比较

试件 代号	对测速度	平均平测声速(m/s)			回归声速	
		$L=15\sim L=30$	$L=15, L=40$	$L=15\sim L=45$	$L=15\sim L=30$	$L=15\sim L=45$
		4 点平均	2 点平均	7 点平均	4 点回归	7 点回归
A_2-1	4935	5258			4833	
A_2-2	5007	5380			4580	
A_3-1	5346	5250	5192	5074	4500	4454
A_3-2	5547	5288	5318	5108	4272	4451
A_3-1	5344	5129	5118	4956	4368	4352
A_3-2	5351	5170	5158	4988	4241	4347

由表 2 知 δ 值并不稳定，其大小随探头中心距离的增加而减小，且随混凝土配合比的不同而不同。

表 3 则反映出，平均平测速度随点数增多而减小，回归速度则随点数增多略有增大，但它们与对测速度在数值上均不相同。

考虑用平测法测量混凝土只能反映其表面以下 6 厘米左右之内的情况,以及混凝土表面不平整性等因素的影响,这些与用对测法测试声速的试验条件不一致。我们认为：用平测声速来完全等价对测声速并不合理，也无必要。事实上，只要能找到一个与穿透声速变化规律一致的测试统计量，就能达到以此来反映混凝土内部质量变化的目的。除此之外，尚应在保证精度的前提下，尽可能地减少测试

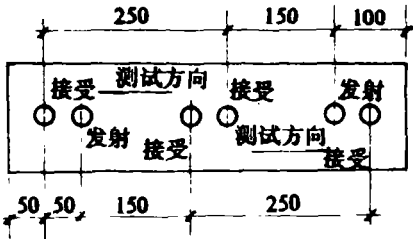


图 1

数量。根据这两个原则，选用 $L=15$ 和 $L=40\text{cm}$ 两点的平测平均速度作为测试统计量（测点布置见图 1）为提高精度、对同标距的声时分别测试两次，以平均值作为最终结果。

2 混凝土抗折强度与超声、回弹测试指标的相关性

2.1 确定影响混凝土抗折强度与测试指标关系的因素

一般来说,影响混凝土强度与无破损测试指标对应关系的是那些导致它们变化不同步的因素,就混凝土的抗压强度来说,考虑混凝土破损测试指标间所具有的互补性,主要影响因素有水泥品种、标号、骨料种类、用量和表面湿度等。("碳化深度"可不计)。

至于混凝土的抗折强度,因研究甚少,我们只有借助于它与抗压强度之间的关系来间接推断,据资料^{[6][7]}报导,在相同养护条件的情况下,影响二者之间的关系主要是粗骨料(粗细程度,级配,种类等),而这与影响混凝土的抗压强度与无损检测指标关系的因素一致,所以我们选用与混凝土抗压强度相同的控制因素来研究混凝土的抗折强度与超声、回弹测试指标的相关性。

我们按水泥品种,标号的不同,确定了 38 个配合比,成型了 1140 组试块进行了第一期试验,根据测得的强度和无损测试结果,对其对应关系进行了分析研究。

2.2 抗折强度和超声、回弹关系式的确定

我们首先按抗压强度与测试指标的常用回归公式:

$$R = A + BV + CN \quad (2)$$

$$R = A + BV^2 + CN^2 \quad (3)$$

$$R = A + BV + CN^2 \quad (4)$$

$$R = AV^B N^C \quad (5)$$

式中 R —混凝土强度(MPa), V —声速(Km/s), N —回弹值, A 、 B 和 C 均为回归系数。

按水泥品种,标号和混凝土配合比进行回归分析,共获得 324 个回归关系式,表 4 和表 5 分别为按水泥品种、标号不同以及混凝土配合比不同得出的部分回归结果

表 4 不同水泥品种的回归公式

水泥品种	回归公式	组数	复相关系数 R^2	相对均方差 $S_r(\%)$
矿渣 325 水泥(B)	$R_f = A + BV + CN$	210	0.805	0.399
	$R_f = A + BV^2 + CN$		0.804	0.400
	$R_f = A + BV + CN^2$		0.818	0.3484
	$R_f = AV^B N^C$		0.800	0.404
普通水泥(C)	$R_f = A + BV + CN$	198	0.588	9.8
	$R_f = A + BV^2 + CN$		0.589	9.8
	$R_f = A + BV + CN$		0.592	9.8
	$R_f = AV^B N^C$		0.580	9.9

* 均以焦作产碎石、辉县产粗砂为粗细骨料

表 5 不同配合比的混凝土回归情况

混凝土配合比	回归公式	组数	复相关系数 R^2	相对均方差 $Sr(\%)$
1:2.19:4.66, 0.56(E^3)	$R_f = A + BV + CN$	30	0.904	4.3
	$R_f = A + BV^2 + CN$		0.905	4.3
	$R_f = A + BV + CN^2$		0.913	4.1
	$R_f = AV^BN^C$		0.908	4.2
1:1.50:4.26, 0.45(E^4)	$R_f = A + BV + CN$	29	0.869	4.3
	$R_f = A + BV^2 + CN$		0.868	4.3
	$R_f = A + BV + CN^2$		0.872	4.2
	$R_f = AV^BN^C$		0.850	4.6
1:1.10:2.65, 0.38(E^6)	$R_f = A + BV + CN$	30	0.803	7.8
	$R_f = A + BV^2 + CN$		0.811	7.6
	$R_f = A + BV + CN^2$		0.823	7.3
	$R_f = AV^BN^C$		0.805	7.6

* 骨料使用情况同表 4，水泥为普通 525 水泥

显然，它们之间均有较好的相关性，（经对其中的直线回归方程用 F 检验，均属高度显著），在回归统计分析中，我们发现这样一个事实，凡用 $R = A + BV + CN^2$ 的回归公式计算，其相关性要好于其它式，我们认为这一现象并非偶然，在此基础上，经理论推导，我们得出用“加权”手段来进行回归分析的新方法，其回归精度及相关性均高于常用方法，因限于篇幅，我们将另文叙述。

表 6 部分试验结果

水泥品种	混凝土配合比	第一期试验 $R_f^{\text{①}}$ cmP		第二期试验 $R_f^{\text{②}}$ cmP	
		试块强度	计算值	试块强度	计算值
矿渣 325	1:2.78:4.95, 0.65	3.03	3.13	2.94	3.22
	1:1.97:4.60, 0.56	3.14	2.84	3.65	3.69
	1:1.65:3.84, 0.48	4.22	3.97	4.34	4.06
	1:1.32:3.09, 0.40	4.31	4.13	4.65	4.17
矿渣 425	1:2.74:4.88, 0.64	4.11	4.17	3.85	4.07
	1:2.18:4.24, 0.56	4.02	3.91	4.58	4.13
	1:1.76:3.73, 0.48	4.30	3.98	4.32	4.02
	1:1.14:3.07, 0.40	4.68	5.57	4.72	4.75
	1:1.00:2.94, 0.36	5.77	5.54	5.05	4.90

2.3 回归方程精度的试验检验

在第一期试验分析的基础上,我们用相同的材料进行了第二期试验工作,在第一期 38 个混凝土配合比中选出 24 个,成型了第二批共 144 组试件,对试验分析结果进行了验证,表 6 为部分结果。结果表明,计算值与实测值吻合较好。

3 现场实测条件对测试结果的影响

3.1 路面结构形式的影响

在实验室内,我们是对混凝土的小梁试件进行测试研究的,与路面板的形式并不一致,考虑回弹法是一种仅能反映材料表面和局部情况的试验方法,结构形式对回弹测试结果不会有大的影响(这已被试验资料^{[4]、[5]}所证实)。在此不考虑路面板与试件结构形式不同所产生的影响,但超声声速就不同,根据资料^[5],弹性波沿杆状弹性体传播时,其波速与介质弹性参数的关系为:

$$V_{杆} = \sqrt{\frac{Ed}{\rho}} \quad (6)$$

式中 Ed —材料的动弹性模量, ρ —材料的密度,类似弹性波沿板状结构传播时,其波速与介质弹性参数的关系为

$$V_{板} = \sqrt{\frac{Ed}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (7)$$

式中 μ 为泊桑比

将混凝土视为弹性材料,试件近似为杆状体,路面为板状结构,由(6)或(7)式得:

$$V_{杆} = \sqrt{\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu}} \sqrt{板} \quad (8)$$

$$\text{取 } \mu = 1/6 \text{ 则 } \sqrt{杆} = 0.966 \sqrt{板} \quad (9)$$

即超声波沿板状体传播时,其声速度要高于沿杆状体传播,这与我们在路上的实测结果一致,因(9)式的试验验证工作难度很大,所以我们直接用(9)式作为声速对结构形式的修正公式。

3.2 路面板表面状况的影响

混凝土路面最后要进行刻痕处理(刻痕形状见图 2),压痕破坏了混凝土路面的平整性。在其表面的平整部分进行回弹值测试是足够的。在实测中我们直接应用此法来测试回弹值。

但路面刻痕破坏了超声探头与路表面混凝土间的声速耦合,必须对测区表面进行磨平处理,考虑磨平表面除去了混凝土表面的浮浆,暴露出了混凝土中骨料,这种表面状况不同于小梁试件中的任何一个表面,为确定磨光表面对声速测量规律的影响,我们进行了模拟试验。试验在 $15 \times 15 \times 55$ 厘米小梁试件上进行,用手持砂轮机在试块成型面上磨一条

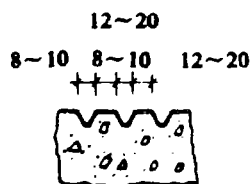


图 2

6×55 厘米的带状区域，以磨去浮浆为止，然后分别在成型面和磨光表面上进行测试（测点布置同图 1）。主要试验结果见表 7。

由表可知，磨光面上的声速要低于成型面上的，经相关性检验，两者之间具有高度显著性相关关系，它们之间的换算关系为：

$$V_{磨} = 1.092V_{光} - 0.359(\text{千米/秒}) \tag{10}$$

式中 $V_{磨}$ —成型侧面上的混凝土声速(千米/秒)；

$V_{光}$ —磨光面上的混凝土声速(千米/秒)

根据(10)式，可对路面磨平后测得的声速进行换算。

表 7 磨光面与成型侧面上的声速比较

混凝土配合比	L = 15,40cm 2 点平均声速		回归式	r	$r_{0.01}$
	磨光面	侧 面			
1:1.32:3.09, 0.45(B ₄)	5.489	5.687	$V_{磨} = 1.092, V_{光} - 0.359$	0.905	0.661
	5.964	6.064			
	5.824	6.080			
1:1.00:2.94, 0.36(D ₆)	6.076	6.319			
	5.830	5.940			
	5.970	6.262			
1:1.97:4.18, 0.53(B ₃)	5.657	5.731			
	5.698	5.979			
	5.810	5.922			
1:1.31:3.37, 0.42(A ₃)	5.78	5.834			
	5.692	5.868			
	5.749	5.910			

4 路面混凝土强度实测

我们在焦作市郛泗路上铺筑了两段试验路，路宽 4.5 米，分别长 30 和 25 米，施工同时，预留混凝土小梁试块。并于 1991 年 4 月对试验路面进行了实测，结果见表 8。

表 8 试验路实测结果 *

试验路桩号	混凝土配合比	试块强度 $R_f^{(1)}(MPa)$	实测强度 $R_f^{(2)}(MPa)$	$\delta = \frac{R_f^{(1)} - R_f^{(2)}}{R_f^{(1)}} \times 100\%$
57K±817-57K+787	1:1.00:2.94,0.36	5.16	5.18	-0.4
56K+765-56K+790	1:1.14:3.07,0.41	5.34	5.62	-5.2

(1)实测强度为面板上各测位测试结果的平均值;

(2)试块强度的龄期与面板龄期相同。

在试验路验证检测的基础上,我们又于 1991 年 4 月按水泥品种和水灰比两个因素选择强度—无破损测试指标关系的作法对詹泗路实际路面进行了检测,其主要结果见表 9

表 9 路面实测部分结果 *

路段桩号	水灰比 / 水泥品种	试块强度 $R_f^{(1)} (MPa)$	实测强度 $R_f^{(2)} (MPa)$
60K+855	0.44 / 普通 425	4.17	4.40
74K+870	0.44 / 矿渣 425	4.72	5.03
80K+850	0.44 / 矿渣 425	4.64	4.80

* 表中试块为 28 天龄期的强度

可见用无破损检测方法测试路面混凝土抗折强度,精度较好,可满足路面检测需要。

5 结束语

5.1 在混凝土的成型面测试回弹值,其数值小于侧面上的回弹值,但二者的平均离散程度基本一致。

5.2 用平测法测试混凝土的超声声速,不同的确定方法对声速值有较大影响,在本课题研究,没有获得与对测声速等值的平测声速。为简化起见,我们选定与对测声速变化大体一致,测距为 15 和 40 厘米的平均平测速度作为不测声速的统计量。

5.3 根据上述检测指标建立的混凝土抗折强度与无损检测指标间的关系式均属高度显著,可用于路面混凝土强度检测。

5.4 因实测时要对混凝土路面表面进行磨平处理,导致混凝土的平测声速发生变化。经模拟试验,磨平表面上的声速与试件成型侧面上的声速间的换算关系为:

$$V_{\text{测}} = 1.054V_{\text{光}} - 0.359 (\text{千米/秒})$$

实测时应按上式进行换算。

5.5 经按上述方法对路面实测结果与预留试块结果非常一致,可满足实测精度要求。

参 考 文 献

- (1) 中华人民共和国国家标准. 水泥混凝土路面施工及验收规范(GBJ97-87). 中国计划出版社.
- (2) 罗骥光. 用超声法、综合法测量混凝土强度时强度的评定问题. 混凝土与加筋混凝土, 1988 年第 3 期
- (3) 混凝土非破损测试技术资料选编. 中国建筑科学研究院结构所编印. 1984 年 9 月
- (4) 李为杜. 混凝土无损检测技术. 同济大学出版社

(5) 吴慧敏. 结构混凝土现场检测技术. 湖南大学出版社

(6) Sidney Mindess. J. Francis Young, Concrete Practice—Hall INC. Englewood Cliffs. New Jersey 07632, 1981.

Practical Non-destructive Method for Testing Flexural Strength of Concrete Pavement

Wei Jun Zhou zhigin Zhao Yongyi Nie Jianguo

Abstract: On the basis of a great amount of experiment, the relationships between flexural strength of concrete and non-destructive testing data, Schmidt rebound and ultrasonic velocity, have been established, and the effects of different experimental condition to practical procedure for testing flexural strength of concrete pavement is determined. Compared with testing results determined by standard testing method, the flexural strength of concrete determined by non-destructive method are accurate enough. This method can be used as a practical measure to control concrete quality in pavement site.

Keywords: flexural strength of concrete, concrete pavement, non-destructive method

(上接 106 页)

参 考 文 献

- (1) 周毓麟, 符鸿源, 高阶非线性拟抛物型方程组周期解和初值问题, 中国科学A(1982). No. 2
- (2) Friedman. A. Partial Differential Equations, New York, Academic Press (1969)
- (3) 周毓麟, 符鸿源. 广义Sine-Gordon型非线性高阶双曲方程组, 数学学报26(1983). N0.2

Initial-Boundary Value Problems and Periodic-Boundary Value Problems and Initial Value Problems for the Nonlinear Pseudo-Parabolic Equations

Yang Zhijian

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: In this paper, Using Galerkin method and Sobolev estimates, we discuss the existence, uniqueness and stability of the classical solutions of the first initial-boundary value problems and periodic-boundary problems and initial value problems for the nonlinear pseudo-parabolic equations $U_t - a_1(t)U_{xx} - a_2(t)U_{xx} = f(x, t, U, U_x)$

Keywords: pseudo-parabolic equation, initial-boundary problem, operator.