

混凝土强度与应力波速相关性研究

郭秀琴* 方利成

(铁道部第十六工程局)

提 要 本文依据一年来的室内 100组混凝土试件试验,率定出混凝土强度(R)与应力波速(V)相关公式及曲线,在工程检测精确计算中具有一定的参考价值。

主题词 混凝土强度 应力波速 相关性

随着我国铁路建筑业的高速发展,混凝土材料得到了广泛地应用,对混凝土结构物(桩基、隧道衬砌、桥墩等)性能检测也提出了相应的研究课题。目前应用于铁路建筑业混凝土结构强度检测常用的方法有:钻孔取芯法、回弹法、超声波法。钻孔取芯法直观可靠,破坏结构物,成本高,只能用于少数混凝土结构物的抽检;回弹法用于对混凝土表面强度的测试,所测结果不能代表大结构物整体强度;超声波法精度高,但需要打孔或预埋管,仍不经济。

瞬态动力法无损检测技术,基于弹性振动和波动理论,利用纵波在介质中传播过程中,遇到不同介质界面发生反射的原理,以此实现对混凝土结构物强度的测定。该方法无需破坏被测物,且操作简单,经济可靠,检测效率高,克服了其它检测技术的不足,是一页值得推广的新技术。

瞬态动力法检测结果是建立在“混凝土强度(R)—应力波速(V)”相关曲线基础上进行分析判断的,能否提供准确可靠的 R — V 相关曲线,是瞬态动力法检测成败的关键之一。本文对 R — V 相关曲线的率定过程及结果初探如下。

1 瞬态动力法检测混凝土强度试验

1.1 测试原理

瞬态动力法的主要检测设备由三部分组成(如图1)采集系统、信号放大系统和分析处理系统。其中分析处理系统可以对采集的信号进行多种频谱分析,并存储打印。

若已知混凝土结构物厚度或深度(L),通过 $V = 2L/\Delta t$ 求 V ;利用 R — V 曲线可直接确定该结构物混凝土强度。

* 本文收稿日期: 1997-03-10 郭秀琴 工程师 铁道部第十六工程局科技处 北京 邮编: 100018

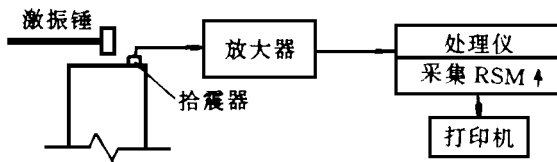


图 1 瞬态动力法无损检测技术主要设备示意图

若已知混凝土强度,利用 $R-V$ 曲线求速度 (V) 通过 $L = V/2\Delta f$ 可求得混凝土结构物厚度。

以往,有人利用“波速范围——结构质量”关系表,作为判定检测结果的依据。这样容易导致结果上误差如:对于设计标号较低的混凝土,波速为 3 000 m/s 左右时,依据“波速——质量”表将其视为质量可疑;对于设计标号较高的混凝土波速已达到 3 300 m/s 以上者,均视为质量良好,这都是不精确的,甚至可能造成误判。

也有人利用超声波测强法所率定的 $R-V$ 相关曲线,计算动力法测强结果。由于 $R-V_{\text{声}}$ 和 $R-V_{\text{波}}$ 两条曲线差异较大,即在相同强度下的超声波速比应力波速快约 1 km/s。所以这种方法,也容易给检测结果带来误差。

因此,率定应力波 $R-V$ 相关曲线具有一定实际意义,它即给检测工作带来许多方便,也提高了动力测强精度。

那么,利用应力波测强法能否建立应力波 $R-V$ 相关曲线呢?动力检测混凝土强度是基于应力波在混凝土中的传播速度与弹性模量的相关性:弹性模量高的混凝土,其应力波速亦高,即:

$$V_P = \frac{E \cdot (1 - \nu)}{d \cdot (1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

式中:

E ——介质的弹性模量;

ν ——介质的泊松比;

d ——介质的密度;

V_P ——纵波波速。

从测试方程: $\Delta f = V/2L$ 中也说明了振动测试的自振频率 (f) 和弹性波速 (V) 成正比,即与介质的弹性模量也成正比例关系。

再者,从混凝土的密实性、孔隙率反映,密实性差,孔隙率大者,波速则低,强度也低;密实性好,孔隙率小者,波速则高,强度也高。

所以,根据混凝土强度 (R) 与应力波速 (V) 之间具有良好的相关性 (混凝土强度越高,波速也越高),故利用动力测强法率定 $R-V$ 相关曲线是行之有效的。

1.2 测试过程

混凝土是由多成分、多相态组成的非均质体。由于瞬态动力法采用的混凝土频率 n^+ kHz ~ 20 kHz 在该频率范围内,混凝土内部的孔隙、颗粒尺寸的差异可以忽略不计,将其视为一个

均质的整体,进行综合性的评价。混凝土本身固有的特性(如强度),通过瞬态动力法所测的混凝土固有自振频率(f),可以间接地反映

因此,在考虑不同养护条件,不同龄期,不同水灰比,不同的水泥标号和不同的含砂率,相同品种的碎石、粒径(最大粒径40 mm),相同拌合、振捣制作方式,不掺任何外加剂,且在考虑测试精度的前提下,遵循建立每条 $R-V$ 曲线必须10组以上的原则,对100组试件进行测试试验。

按照常规的试验方法:在垂直于试件浇注面(底面)四个侧面进行应力波、超声波和抗压测试。其中,一组相对应的侧面为应力波和超声波测试面;另一组相对的侧面为抗压测试面。(见图2)首先,进行应力波测试,在测试设备安装调试完成后,试件下面垫上减振材料(泡沫板、海绵),目的是避免波的衰减,当弹性波传到试件底面后,能够反射到试件顶部

在试件的测点处涂上黄油,把传感器压紧在侧面,使之产生较好的耦合效果,所接收到的信号真实、清晰,用小锤激振试件,将采集到的信号经过谱分析,求出自振频率(f)。

谱分析如图3所示。

其次,同一组试件侧面上做超声波检测。在相对两个侧面上分别涂上黄油,一侧为发射换能器,一侧为接受换能器,压紧在测点,要求收发两个换能器在同一条直线上,这样所测出的声波时间为经过两个相对面垂直间距的时间。利用 $V_{\text{声}} = L/T$ (T —时间)公式,求出 $V_{\text{声}}$ 值

最后在两种测量的基础上,对试件的另一组侧面作抗压试验,得出 R 值。

2 率定 $R-V$ 曲线

前面已经提到了预先率定 $R-V$ 曲线的意义,那么 $R-V$ 曲线的特点是什么呢?如何率定 $R-V$ 曲线呢?

2.1 $R-V$ 曲线的特点

在测得 R 、 $V_{\text{声}}$ 、 $V_{\text{波}}$ 试验数据后,以一组三个试件测试结果的算术平均值 R 、 $V_{\text{波}}$ 、 R 、 $V_{\text{声}}$ 两对数据,分别标在坐标图上,根据散点图的最后连线,可以看出 $R-V$ 波光滑曲线有如下特点:

混凝土强度较低时 ($\leq 30 \pm 2$ MPa),波速随着混凝土强度增加,呈较大幅度的增加;混凝土强度较高时 ($\geq 30 \pm 2$ MPa),波速随着混凝土强度增加,呈较小幅度的增加。通常 R 、 V 变量之间成非线性正比例关系,这种密切关系,只能称作“相关性”。为了使率定的 $R-V$ 曲线更加接近所有实测点,常根据最小二乘法原理,找出描述自变量与因变量之间的数学表达式,进行回归分析。

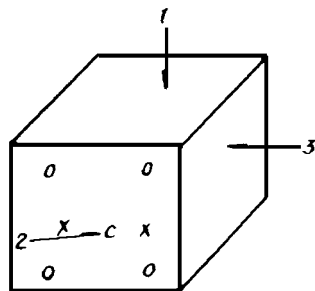


图2 测试位置示意图

1—浇注面 2—抗压测试面

3—超声波、应力波测试面

X—应力波测试位置; O—超声波测试位置

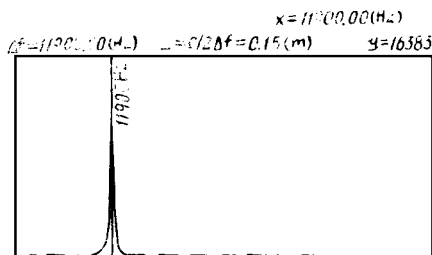


图3 试件波形曲线图

所谓最小二乘法原理是: 已知 n 个试验点 $(x_i, y_i), i = 1, 2, 3 \dots n$, 求待定系数 A, B , 使实测值 y_i 与计算值 $y_{\text{计}}$ 之差 $(y_i - y_{\text{计}})$ 的平方和最小。即: $\sum (y_i - y_{\text{计}})^2 = \sum (y_i - A - B \cdot x_i)^2$ 最小。

目前, 国内外常采用: 抛物线: $V = a + bR + cR^2$, 指数函数: $V = ae^{bR}$ 和幂函数: $V = aR^b$ (式中 a, b, c ——待定系数), 作为描述 $R-V$ 变量相关表达式。

在指数函数, 幂函数作最小二乘法运算时, 通过取对数形式。本文, 采用指数函数进行回归分析。

(1) 求待定系数 a, b

指数函数: $V = ae^{bR}$,

两边同时取自然对数:

$$\ln V = \ln a + b \ln e \cdot R$$

令: $\ln V = y, \ln a = A, b = B, R = x$ ($\ln e = 1$) 则直线方程 $y = A + Bx$ 。

利用最小二乘法原理, 采取微积分求极值方法, 求得待定系数 A, B :

$$\begin{aligned} B &= \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \\ &= \frac{n \sum R \ln V - \sum R \sum \ln V}{n \sum R^2 - (\sum R)^2} \\ A &= \frac{\sum Y \sum X^2 - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \\ &= \frac{\sum \ln V \sum R^2 - \sum R \sum R \ln V}{n \sum R^2 - (\sum R)^2} \\ &= \frac{1}{n} (\sum \ln V - B \sum R) \end{aligned}$$

式中: n ——试验点数

将 A, B 值代入定义式: $b = B, \ln a = A$ 中, 可求待定系数 a, b , 将 a, b 值代入指数函数: $V = ae^{bR}$ 式中: 即确定了 $R-V$ 相关曲线的方程式。

(2) 检验 $V = ae^{bR}$ 的精确度。为了检验选用的线型所配出的回归曲线是否有意义, 即变量之间是否存在密切相关性。采用相关系数 (r) 来判断。

$$r = B \cdot \frac{n \sum R^2 - (\sum R)^2}{n \sum (\ln V)^2 - (\sum \ln V)^2}$$

在非线性回归曲线中: r 的取值范围: $0 \leq r \leq 1$, 当 r 的绝对值越接近于 1 时, 说明变量之间对该线性的相关性越好。

为了检查回归曲线的精度, 确定强度或波速误差范围, 采用平均相对误差 ($\bar{\epsilon}$) 和均方根相对误差 (S_r) 来判断。

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{V_i - V_{\text{计}}}{V_{\text{计}}} \right|}{n} \times 100\%$$

$$S_r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i - V_{jt}}{V_{jt}} \right)^2 \times 100\%$$

式中: V_i —实测波速; V_{jt} —计算波速。

当 \bar{e} 和 S_r 值愈小时,说明回归曲线 r 值的精度愈高,反之,说明回归曲线 r 值的精度愈低。

2.2 率定 $R-V$ 曲线

为使率定的 $R-V$ 曲线能够适于实际情况,基于原材料和试验条件,将全部试验分为两大部分。

第一部分:目的是查明不同的水灰比,不同的水泥标号和不同的含砂率分别在自然养护、水中养护条件下,对动力法检测混凝土强度的影响。

- (1) 自然养护、水中养护条件下,不同的水灰比对动力法测强的影响;
- (2) 自然养护、水中养护条件下,不同的水泥标号对动力法测强的影响;
- (3) 自然养护、水中养护条件下,不同的含砂率对动力法测强的影响。

通过分析看出:

(1) 相同养护条件下,水灰比在 0.51~0.8 (变化范围,不同标号的水泥和含砂率在 26%~35% 变化范围) 对率定 $R-V_{波}$ 曲线列明显影响。

(2) 相同养护、相同强度条件下,不同水灰比、水泥标号和含砂率的应力波速值的变化为: $< 100 \text{ m/s}$ 故认为在不考虑水灰比、水泥标号、含砂率对动力法测强影响前提下,所率定的 $R-V_{波}$ 曲线是可信的。

第二部分:从上述试验结果看,构成影响动力法检测混凝土强度的主要因素是粗骨料的品种、用量,不同养护条件和不同养护龄期。

故本部分试验目的:率定同品种的碎石,正常配合比用量,在自然养护、水中养护条件下的 7 天、28 天、65 天龄期的 $R-V_{波}$ 相关曲线,以此指导实际检测。

1. 率定 7 天龄期的 $R-V_{波}$ 相关曲线

A. 自然养护条件下

——确立相关曲线方程 $V = ae^{bR}$ (见表 1)

$$a = e^A, b = B$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{n \sum \ln V \cdot R - \sum R \sum \ln V}{n \sum R^2 - (\sum R)^2} \\ &= \frac{12 \times 252.256166 - 208.69 \times 13.856015}{12 \times 4602.6655 - (208.69)^2} \\ &= 0.011597 \\ A &= 1/n \left(\sum \ln V - B \sum R \right) \\ &= 1/12 (13.856015 - 0.011597 \times 208.69) \\ &= 0.952986 \end{aligned}$$

$$b = 0.011597, a = e^A = 2.593442$$

$$V = ae^{bR} = 2.593442e^{0.011597R}$$

表 1 灰自然养护条件下动力法测强结果

V	R	$\ln V$	$R \ln V$	R^2	$(\ln V)^2$
2.58	4.43	0.947 789	4.198 707	19.624 9	0.898 305
2.58	5.49	0.947 789	5.203 364	30.140 1	0.893 305
2.81	7.81	1.033 184	7.418 265	51.552 4	1.067 470
3.09	9.50	1.128 171	10.717 625	90.250	1.272 770
3.17	13.09	1.153 732	15.102 346	171.348 1	1.331 097
3.32	19.50	1.199 965	23.399 313	380.250	1.439 915
3.3	19.75	1.193 923	23.579 969	390.062 5	1.425 451
3.44	21.25	1.235 471	26.253 769	451.562 5	1.526 39
3.41	22.75	1.226 712	27.907 705	517.562 5	1.504 823
3.47	23.0	1.244 155	28.615 556	529	1.547 921
3.56	30.25	1.269 761	38.410 256	915.062 5	1.612 292
3.58	32.5	1.275 363	41.449 291	1056.25	1.626 550
$n=$ 12	$\sum R=$ 208.69	$\sum \ln V=$ 13.856 015	$\sum R \ln V=$ 252.256 166	$\sum R^2=$ 4602.665 5	$\sum (\ln V)^2=$ 16.151 288

—— 求相关系数 (r):

$$r = B \frac{n \sum R^2 - (\sum R)^2}{\sum (\ln V)^2 - (\sum \ln V)^2}$$
$$= 0.011\ 597 \times \frac{12 \times 4\ 602\ 665\ 5 - (208.69)^2}{12 \times 16.151\ 288 - (13.856\ 015)^2}$$
$$= 0.927\ 447$$

—— 求平均相对误差 ($\bar{\epsilon}$)和均方根相对误差 (S_r):

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{V_i - V_{fit}}{V_{fit}} \right|}{n}$$
$$= 0.426\ 841 / 12 \times 100\%$$
$$\approx 3.56\%$$
$$S_r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i - V_{fit}}{V_{fit}} \right)^2 \times 100\%$$
$$= \frac{1.860\ 338\ 094}{11} \times 100\%$$
$$\approx 4.3\%$$

根据所求的 $\bar{\epsilon}$ 和 S_r 三个指标,认为 $V=2.593\ 442e^{0.011\ 597R}$ 与实测结果相符,故建立 R — $V_{波}$ 相关曲线

B.水中养护条件下:

1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

—— 确立相关曲线方程 $V= ae^{bR}$ (见表 2)

表 2 灰水中养护条件下动力法测强结果

V	R	$\ln V$	$R \ln V$	R^2	$(\ln V)^2$
2.58	4.64	0.947 789	4.397 743	21.529 6	0.898 305
2.58	5.49	0.947 789	5.203 364	30.140 1	0.898 305
2.68	6.97	0.895 817	6.871 143	48.580 9	0.971 835
2.79	7.39	1.026 042	7.582 447	54.612 1	1.052 761
2.76	7.68	1.015 231	7.796 972	58.982 4	1.030 693
2.77	7.81	1.018 847	7.957 198	60.996 1	1.0380 50
2.81	8.02	1.033 184	8.286 140	64.320 4	1.067 470
2.92	12.67	1.071 584	13.576 964	160.528 9	1.148 291
3.14	12.88	1.144 223	14.737 590	165.894 4	1.309 246
3.28	16.25	1.187 843	19.302 456	264.062 5	1.410 972
3.3	18.50	1.193 922	22.087 566	342.25	1.425 451
3.58	30.88	1.275 363	39.383 203	953.574 4	1.626 550
$n=$ 12	$\sum R=$ 139.18	$\sum \ln V=$ 12.847 635	$\sum R \cdot \ln V=$ 157.182 784	$\sum R^2=$ 222 5.471 8	$\sum (\ln V)^2=$ 13.877 929

$B= 0.013\ 369$
 $A= 0.915\ 578$
 $V= ae^{bR}= 2.498\ 219e^{0.013\ 369R}$

—— 求相关系数 (r)

$r= 0.943242$

—— 求平均相对误差 ($\bar{\sigma}$)和均方根相对误差 (S)

$\bar{\sigma} \approx 2.76\%$
 $S \approx 3.56\%$

根据所求的 r 、 $\bar{\sigma}$ 和 S 三个指标,判定 $v= 2.498\ 219e^{0.013\ 369R}$ 方程与实测结果基本相符,故建立 R-V 相关曲线

(2)率定 28 天养护龄期 R-V 波 相关曲线:

A.自然养护条件下:

—— 确立相关曲线方程 $V= ae^{bR}$ (见表 3)

$B= 0.006\ 574$
 $A= 1.101\ 581$
 $V= ae^{bR}= 3.008\ 919e^{0.006\ 574R}$

表 3 28天自然养护条件下动力法测强结果

V	R	$\ln V$	$R \ln V$	R^2	$(\ln V)^2$
3. 15	10. 56	1. 147 402	12. 116 570	111. 513 6	1. 316 532
3. 26	11. 19	1. 181 727	13. 223 527	125. 216 1	1. 396 479
3. 28	12. 88	1. 187 843	15. 299 423	165. 894 4	1. 410 972
3. 29	13. 1	1. 190 888	15. 600 627	177. 610 0	1. 418 213
3. 54	23. 22	1. 264 127	29. 353 023	539. 168 4	1. 598 016
3. 55	23. 75	1. 266 948	30. 090 006	564. 062 5	1. 605 156
3. 72	30	1. 313 724	39. 411 710	900	1. 725 870
3. 72	32. 5	1. 313 724	42. 696 019	1056. 25	1. 725 870
3. 75	34. 62	1. 321 756	45. 759 187	1198. 544 4	1. 747 039
3. 78	34. 75	1. 329 724	46. 207 909	1207. 562 5	1. 768 166
3. 8	36. 73	1. 335 001	49. 034 589	1349. 092 9	1. 782 228
3. 84	37. 79	1. 345 472	50. 845 401	1428. 084 1	1. 810 296
$n=$ 12	$\sum R=$ 301. 09	$\sum \ln R=$ 15. 198 336	$\sum R \ln V=$ 389. 637 991	$\sum R^2=$ 8816. 998 9	$\sum (\ln V)^2=$ 19. 304 837

—— 求相关系数 (r):
 $r=$ 0. 989 525
—— 求平均相对误差 (\bar{e})和均方根相对误差 (S_r):

$$\bar{e} \approx 0. 78\%$$
$$S_r \approx 1. 06\%$$

根据所求的 r 、 \bar{e} 和 S_r 三个指标,认为 $V=$ 3. 008 919e^{0. 006574R} 方程与实测结果相符,故建立 $R-V_{\text{波}}$ 相关曲线

B 水中养护条下率定 $R-V_{\text{波}}$ 曲线的步骤:
—— 确定相关曲线方程 $V=ae^{bR}$ 。(见表 4):

表 4 28天水中养护条件下动力法测强结果

V	R	$\ln V$	$R \ln V$	R^2	$(\ln V)^2$
3. 19	11. 19	1. 160 021	12. 980 634	125. 216 1	1. 345 649
3. 3	12. 25	1. 193 922	14. 625 550	150. 062 5	1. 425 452
3. 36	17. 74	1. 211 941	21. 499 833	314. 707 6	1. 468 801
3. 42	17. 95	1. 229 641	22. 072 048	322. 202 5	1. 512 016
3. 54	19. 42	1. 264 127	24. 549 341	377. 136 4	1. 598 016
3. 61	22. 8	1. 283 708	29. 268 537	519. 84	1. 647 906
3. 62	23. 65	1. 286 474	30. 425 111	559. 322 5	1. 655 015
3. 75	27. 88	1. 321 756	36. 850 553	777. 294 4	1. 747 039
3. 75	31. 75	1. 321 756	41. 965 748	1008. 062 5	1. 747 039
3. 72	34. 63	1. 313 724	45. 494 251	1199. 236 9	1. 725 870
3. 78	35. 75	1. 329 724	47. 537 633	1278. 062 5	1. 768 166
3. 75	38. 25	1. 321 756	50. 557 161	1463. 062 5	1. 747 039
$n=$ 12	$\sum R=$ 293. 26	$\sum \ln V=$ 15. 238 549	$\sum R \ln V=$ 377. 826 400	$\sum R^2=$ 8 094. 206 4	$\sum (\ln V)^2$ = 19. 388 005

$$A=1.127\,013$$
$$V=a e^{bR}=3.086\,424\cdot e^{0.005\,846R}$$

——求相关系数 (r)

$$r=0.926\,917$$

——求平均相对误差 ($\bar{\epsilon}$)和均方根相对误差 (S_r):

$$\bar{\epsilon}\approx 1.92\%$$

$$S_r\approx 2.33\%$$

根据所求的 κ ($\bar{\epsilon}$)和 S_r 三个指标,认为 $V=3.086\,424e^{0.005\,846R}$ 方程与实测结果相符,故建立 $R-V_{\text{波}}$ 曲线。

(3)率定 65 天养护龄期的 $R-V_{\text{波}}$ 相关曲线

A.自然养护条件下

——确定相关曲线方程 $V=a e^{bR}$ (见表 5)。

表 5 65 天自然养护条件下动力法测强结果

V	R	$\ln V$	$R \ln V$	R^2	$(\ln V)^2$
3.31	13.3	1.196 948	15.919 411	176.89	1.432 685
3.33	13.8	1.202 972	16.601 018	190.44	1.447 142
3.34	14	1.205 971	16.883 591	196.00	1.454 366
3.37	14.2	1.214 913	17.251 761	201.64	1.476 013
3.39	14.2	1.200 830	17.335 785	201.64	1.490 426
3.55	20.9	1.266 948	26.479 250	436.81	1.605 156
3.56	20.9	1.269 761	26.537 995	436.81	1.612 292
3.62	22.2	1.286 474	28.559 723	492.84	1.655 015
3.66	24.9	1.297 463	32.306 832	620.01	1.683 411
3.73	27.6	1.316 408	36.332 867	761.76	1.732 931
3.75	31.1	1.321 756	41.106 607	967.21	1.747 039
3.75	33.3	1.321 756	44.014 469	1 108.89	1.747 039
$n=$ 12	$\sum R=$ 250.4	$\sum \ln V=$ 15 122 199	$\sum R \ln V=$ 319.329 265	$\sum R^2=$ 5790.94	$\sum (\ln V)^2$ 19.083 513

$$B=0.006\,678$$
$$A=1.120\,836$$
$$V=a e^{bR}=3.067\,417e^{0.006\,678R}$$

——求相关系数 (r)

$$r=0.970943$$

——求平均相对误差 ($\bar{\epsilon}$)和均方根相对误差 (S_r)

$$\bar{\epsilon}\approx 0.98\%$$

$S_r \approx 1.15\%$

根据所求的 κ (°)和 S_r 三个指标,认为 $V= 3.067\,417e^{0.006\,678R}$ 方程与实测结果相符,故建立 $R-V_{\text{波}}$ 曲线。

(2) 水中养护条件下

—— 确立相关曲线方程 $V= ae^{bR}$ (见表 6)

表 6 6 天水中养护条件下动力测强结果

V	R	$\ln V$	$R \ln V$	R^2	$(\ln V)^2$
3.32	8.4	1.199 965	10.079 704	70.56	1.439 915
3.38	11.6	1.217 876	14.127 358	134.56	1.483 221
3.41	12.2	1.226 712	14.965 890	148.84	1.504 832
3.42	13.6	1.229 641	16.723 111	184.96	1.512 016
3.47	16	1.224 155	19.906 474	256	1.547 921
3.58	20	1.295 363	25.507 256	400	1.626 550
3.59	23.6	1.278 152	30.664 392	556.96	1.633 673
3.63	24	1.289 233	30.941 584	576	1.662 121
3.63	24.4	1.289 233	31.457 277	595.36	1.662 121
3.65	26.7	1.294 727	34.569 215	712.89	1.676 318
3.66	26.9	1.297 463	34.901 759	723.61	1.683 411
3.67	27.3	1.300 192	35.495 232	745.29	1.690 498
3.77	30.2	1.327 075	40.077 665	912.04	1.761 128
3.79	30.7	1.332 366	40.903 637	942.04	1.751 99
3.84	34.7	1.345 472	46.687 891	1204.09	1.810 296
$n=$ 15	$\sum R=$ 330.3	$\sum \ln V=$ 19.147 624	$\sum R \ln V=$ 426.508 445	$\sum R^2=$ 8 163.65	$\sum (\ln V)^2=$ 24.469 212

$B= 0.005\,478$

$A= 1.155\,883$

$V= ae^{bR}= 3.176\,827\cdot e^{0.005\,478R}$

—— 求相关系数 (r)

$r= 0.992\,767$

—— 求平均相对误差 (°)和均方根相对误差 (S_r)

$\approx 0.42\%$

$S_r \approx 0.57\%$

根据所求的 κ (°)和 S_r 三个指标,认为 $V= 3.176\,827\cdot e^{0.005\,478R}$ 方程与实测结果相符,故建立 $R-V_{\text{波}}$ 曲线。

从上述自然养护、水中养护条件下的 7天、28天、65天养护龄期的超声法和动力法检测混凝土强度的系列 $R-V$ 曲线对比图中,从 7天、28天、65天养护龄期条件下,自然养护和水中养护的动力法检测混凝土强度的 $R-V$ 曲线对比图中,从自然养护、水中养护条件下 7天、28天和 65天养护龄期的动力法检测混凝土强度 $R-V$ 曲线对比图中,都可以得出如下结论:

(1) 同养护、同龄期条件下的超声法率定 $R-V_{\text{声}}$ 相关曲线和动力法率定的 $R-V_{\text{波}}$ 相关曲线相比,在同一强度 (R) 下的超声波传播速度比应力波传播速度快 1 km/s 。由此,说明采用超声法率定的 $R-V_{\text{声}}$ 曲线,分析动力法检测混凝土强度结果会产生较大误差。

(2) 同龄期、不同养护条件下,动力法率定的 $R-V_{\text{波}}$ 相关曲线有差异。因此,在实际应用中,应该选用相同养护条件的 $R-V_{\text{波}}$ 相关曲线。

(3) 同养护、不同龄期条件下动力法率定的 $R-V_{\text{波}}$ 相关曲线有差异。其中 7天龄期的应力波速 ($V_{\text{波}}$) 随着混凝土强度增加,呈较大幅度的增加;而 28天和 65天龄期的应力波速 ($V_{\text{波}}$) 随着混凝土强度增加,呈平稳的幅度增加。从图中可以看到: 28天和 65天龄期的 $R-V_{\text{波}}$ 曲线基本趋于一致,而 7天龄期的 $R-V_{\text{波}}$ 曲线与 28天、65天的 $R-V_{\text{波}}$ 曲线相比,差异较大。因此,认为无论是自然养护还是水中养护条件下,28天龄期以后的 $R-V_{\text{波}}$ 曲线变化不大,在检测 7天龄期左右的混凝土强度时,为提高测试精度,应该首先测定预留试件强度 (R),从 $R-V_{\text{波}}$ 曲线上找出对应 $V_{\text{波}}$ 值,再分析检测结果。

3 结束语

本文利用瞬态动力无损检测法率定的 $R-V$ 曲线,经过多次的测强、测厚检验,认为所率定的 $R-V$ 曲线可靠准确,并且能给检测工作带来许多方便。但是如前所述,混凝土是由复合材料组成的非均质体,由于某种材料的不同,则会产生不同的 $R-V$ 曲线,因此,在运用 $R-V$ 曲线时,尤其注意它的局限性。

参考文献

- 1 罗骥先. 水工建筑混凝土的超声检测. 南京水利科学研究院
- 2 罗骥先. 混凝土非破损测强数据处理. 南京水利科学研究院

RESEARCH ON RELATION BETWEEN CONCRETE STRENGTH AND STRESS WAVE VELOCITY

Guo Xiuqin Fang Licheng

Sixteenth Railway Engineering Bureau of MOR

Abstract Based on the experiments of 1000 sets of concrete parts in room for a year, the relation's formula and curve for concrete strength (R) and stress wave velocity (V) are determined. They are valuable as reference for the engineering testing.

Keywords concrete strength; stress wave velocity; relation