

瞬态瑞雷面波法检测路面强度的应用研究

李 嘉, 董海文

(湖南大学土木工程学院 长沙市 410082)

摘 要: 针对目前水泥混凝土路面强度检测的缺陷,提出了利用瞬态瑞雷面波法无损检测路面强度的基本原理和方法。通过工程试验实例验证,瞬态瑞雷面波法能较好地实现对水泥混凝土路面强度的无损检测,且检测方法简单、可靠,具有较高的工程实用价值。

关键词: 瞬态瑞雷面波; 频散性; 抗折强度; 无损检测

目前在公路工程质量检测中对水泥混凝土路面强度检测的方法有两大类^[1]:一为直接法,即在工地现场浇注混凝土时,预留规定数量的小梁试件(15 cm×15 cm×55 cm)进行抗折强度试验,或对水泥混凝土路面进行钻芯取样,再对试样进行劈裂抗拉强度试验;二为间接法,即对水泥混凝土试样进行抗压强度试验,由抗压强度与抗折强度的经验换算公式求得试件的抗折强度。这两种确定路面强度的方法都具有以点盖面,代表性差,且费时费工,结果出来较缓慢的特点。此外,钻芯取样法不可避免地对原状路面具有破坏性。因此,对快速、高效、简便的现场原位路面质量的无损检测技术的寻求显得尤为重要和迫切。

瞬态瑞雷面波(下简称“瑞雷波”)法检测评定路面强度,是利用面波的频散特性,它不需要钻孔取样,只需在层状路面结构的表面上用一个力锤施加瞬时的垂直冲击,产生一组以振源为中心、具有各种频率成份并沿地表一定深度向四周传播的瑞雷面波,通过对面波信号的分析处理,实现路面强度无损检测。该方法速度快、检测效率高,将为水泥混凝土路面质量评定提供一种全新的途径。

1 瑞雷波法检测水泥混凝土路面强度原理

利用瑞雷波进行路面强度的检测主要利用了瑞雷波的两种特性:(1)瑞雷波在分层介质中传播时的频散特性;(2)瑞雷波传播速度与水泥混凝土路面介质强度的密切相关性。前者可根据实测频散曲线图

划分层位,求取路面瑞雷波层速度。后者则是利用已求得的瑞雷波速度与水泥混凝土强度的关系,计算路面的强度。

1.1 理论分析

对于均匀弹性半空间分层介质,其结构表面受到瞬态冲击作用时,将产生瞬态振动,振动组分中包括 P 波(纵波)、 S 波(横波)和 R 波(瑞雷波)。在一次冲击产生的波能中, R 波占67%, S 波占26%, P 波占7%,并且在结构表面,随波传播距离 r 的增大, P 波、 S 波引起的位移振幅以 r^2 的比例衰减,而 R 波以 $r^{1/2}$ 的比例衰减。因此,在地基表面的瞬态振动中, R 波的衰减要比 P 波和 S 波慢得多,瞬态表面波主要由 R 波组成。 R 波的能量主要集中在一个波长深度内,其传播特性也主要受该深度内介质特性的控制,故通过对瑞雷面波测试信号的分析研究,可获得所测介质的强度、刚度、模量。

根据波动理论, R 波传播速度 V_R 与路面各分层介质的剪切波速 V_S 有以下近似关系^[2]:

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} V_S \quad (1)$$

式中: σ 为路面结构分层介质的泊松比。式(1)表明瑞雷面波的传播速度 V_R 与横波的传播速度 V_S 的相关关系,奠定了瑞雷面波在测定水泥混凝土物理力学参数中的应用基础。

在水平分层介质中, R 波相速度 V_R 与频率有关,这种 V_R 随频率或波长变化而变化的特性被称为 R 波频散特性。此点是利用瑞雷面波进行路基压

实度检测的理论基础。在弹性波理论中,介质的力学性能可以完全由介质的纵波速度 V_P 和横波速度 V_S 和介质密度 ρ 表示出来,即用 V_P 、 V_S 、 ρ 描述介质力学性质是完全等价的。而瑞雷波波速 V_R 在介质一定的情况下与纵波波速 V_P 、横波波速 V_S 存在很好的对应关系,在水泥混凝土中密度 ρ 可视为常值,所以由 V_P 、 V_S 、 ρ 可以求得水泥混凝土的抗压模量、剪切模量,而水泥混凝土的抗压强度可由其抗压模量、剪切模量求得^[3]。故通过测试介质的 V_R 即可反映出水泥混凝土的抗压强度。

我们通过试验对比研究,表明瑞雷波速 V_R 与抗压强度 $R_{\text{压}}$ 的回归公式模式可建立为:

$$R_{\text{压}} = aV_R^b \quad (2)$$

水泥混凝土路面的强度包括混凝土抗压强度和混凝土抗折强度,且两者间存在有良好的相关关系,一般具有如下形式^[3]:

$$R_{\text{折}} = \frac{R_{\text{压}}}{aR_{\text{压}} + b} \quad (3)$$

式中: a 、 b 为关系系数。

所以,由式(2)和式(3)可推出瑞雷波波速与水泥混凝土的抗折强度的对应关系模型为:

$$R_{\text{折}} = \frac{1}{a + bV_R^c} \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 c 为实验系数。

对瑞雷面波速度频散曲线反演可以得到路面结构各层的瑞雷波速,再通过式(4)可以求出水泥混凝土抗折强度,最终实现由瑞雷波速对路面强度的质量检测。

1.2 检测原理

图1是瞬态瑞雷面波检测水泥混凝土路面强度的原理图。

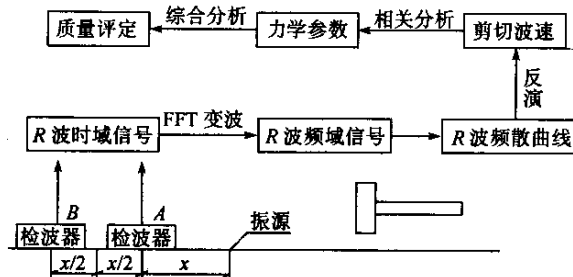


图1 瞬态瑞雷面波检测水泥混凝土路面强度的原理

用力锤敲击水泥混凝土路面,在距震源一定距离处的 A 点检波器记录到瑞雷波的频谱为^[4]:

$$F_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

在波前进方向与 A 点相距为 Δx 处的 B 点检波器测到的瑞雷波 $f_2(t)$ 的频谱为:

$$F_2(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(t) e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

假若波从 A 到 B ,两个信号之间的变化纯粹是由瑞雷波频散引起的,则有:

$$F_2(\omega) = F_1(\omega) e^{-i\omega \frac{x}{V_R(\omega)}} \quad (7)$$

$V_R(\omega)$ 是圆频率为 ω 的瑞雷波相速度。

$$\varphi = \omega \frac{x}{V_R(\omega)} \quad (8)$$

根据记录信号的互功率谱,即:

$$R_{21}(\omega) = \frac{1}{N} |F_2(\omega)| |F_1(\omega)| \exp(i\varphi(\omega)) \quad (9)$$

我们可以由相频曲线求出 $F_2(\omega)$ 和 $F_1(\omega)$ 之间对应频率 f 的相位差 $\varphi(f)$,进而求得两道信号对应 f 的时差 $\Delta t = \varphi(f)/2\pi f$,从而得到相应速度。

$$V_R(f) = x/\Delta t = 2\pi f x / \varphi(f) \quad (10)$$

式中: x 为两个检波器之间的距离。

互功率谱的另一重要应用是估算相关函数。为评价 A 、 B 两记录中各频率的质量,并判断噪声干扰对有效频率信号的影响程度,我们需做相关函数。

$$\gamma(f) = \frac{|R_{21}(f)|^2}{R_{11}(f)R_{22}(f)} \quad (11)$$

在工地现场进行瑞雷波测试后,对所测信号进行互谱分析,提取相关函数大于 0.8 的频率点上的相角差,根据式(10)绘制频散曲线图,根据频散曲线图的“Z”字形拐点与路面实际分层界面的对应情况可求得路面厚度,最后采用等效半空间法反演计算出路面的瑞雷波层速度,将求得的瑞雷波速代入理论分析中的式(4)便可计算出路面抗折强度,进而对路面结构的质量做出评价。

2 检测系统的正确配置和方案确定

检测系统的正确配置和检测方案的正确确定是保证检测精度和检测可靠性的关键。

2.1 检测系统正确配置^[5]

图2为检测系统的配置。为了获得不同深度路面分层介质的波速,要求震源能产生各种频率组成的 R 波,这可通过变换力锤的锤头(不同材料制成)来实现;检波器采用压电加速度传感器,并用石蜡粘接在路面上,放大器采用低噪音电荷放大器,工作带

宽 0~40 kHz;信号采集和分析可由计算机组成的信号分析系统实现,其分析频带可任意选定;仪器之间的连接导线应尽量短,且忌抖动。

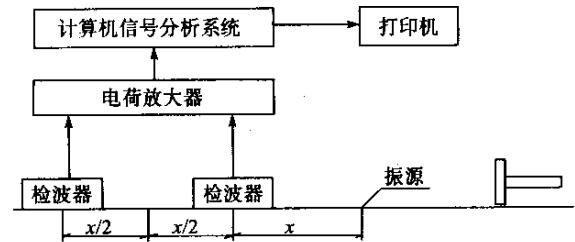


图 2 检测系统配置

2.2 检测方案

检测前,应对现场路面进行调查,确定检测点,通常情况下,两个加速度传感器间距应视测试的路面深度而定,一般应使其间距大于路面深度的一半,

并且取震源到最近的传感器的距离与传感器之间的距离相等。

3 瑞雷波检测路面强度的实例研究

3.1 工程实例

湖南省衡阳至枣木铺高速公路为水泥混凝土路面结构,全长 186.065 km。其主要工程技术指标为:采用全部控制出入的四车道高速公路标准,设计行车速度 100 km/h,路基宽度 26 m,路面宽度 11.25 m×2。荷载标准:汽车—超 20 级,挂车—120。

3.2 实测瑞雷波数据

在工地现场锤击激振后,检波器接收到路面垂直方向振动加速度信号,模拟信号经滤波放大并模数转换被信号采集系统存盘。将存盘的数据文件导入我们自编的软件,计算求取瑞雷波波速。部分实测数据及反演结果见表 1。

表 1 衡枣高速公路水泥路面试验数据

采样编号	测试桩号	钻探路面厚/cm	瑞雷波速 V_R /(km/s)	抗折强度/MPa
Y7	K137+840	29.2	1.815	6.08
Y11	K139+980	29.1	1.908	5.89
Y13	K138+400	29.0	1.900	6.10
Y20	K134+280	30.0	1.843	5.96
Y23	K132+130	30.0	2.111	6.06
Y29	K130+070	30.0	1.784	6.02
Y39	K127+120	29.8	1.942	6.30

3.3 试验研究与分析

理论与试验研究表明,瑞雷波波速与水泥混凝土路面抗折强度的相互关系可用下述数学模型表征: $R_{折} = \frac{1}{\alpha + bV_R^c}$ 。将现场对应桩位所测瑞雷波波速与小梁抗折强度进行回归分析,建立了由瑞雷波波速推算混凝土抗折强度的关系式:

$$R_{折} = \frac{1}{0.1281 + 0.0274V_R^{0.4651}} \quad (12)$$

其曲线拟合如图 3。

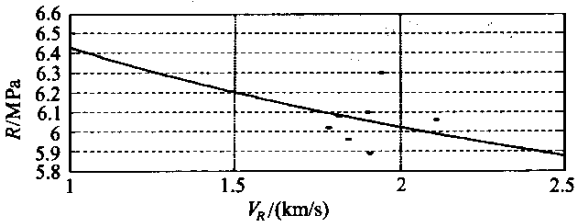


图 3 瑞雷波波速 V_R 与混凝土抗折强度 R 关系

已有的研究采用下述方法计算水泥混凝土路面强度。

(1)建立抗压强度 R 与纵波波速 V_P 的关系,即:

$$R_{压} = 0.649V_P^{3.04} \quad (13)$$

(2)将抗压强度转换为抗折强度:

$$R_{折} = R_{压} / (0.0058R_{压} + 3.5) \quad (14)$$

(3)纵波波速 V_P 与瑞雷波波速 V_R 存在以下关系:

$$V_P = 1.883V_R \quad (15)$$

由式(13)、(14)、(15)可计算出路面抗压和抗折强度。

从表 2 中可以看出,使用文献[3]中公式计算的强度结果,与试件结果差值较大,其误差在 0.134 3~0.855 0 MPa 之间,Y23 编号所对应的测点结果相差达 2.984 8 MPa;而根据我们在现场检测得出的瑞雷波波速与混凝土强度建立拟合回归公式,计算所得出的各测点抗折强度和现场钻芯所得的抗折强度结果比较接近,相差仅 0.004 9~0.257 7 MPa,平均相对误差为 1.72%。

瑞雷波波速和强度之间的回归关系在不同路段和不同的条件下有不同的系数,要得到准确的测试结果,必须进行现场进行校核才能达到较好的精度。

表 2 湖南省永州市衡枣高速公路水泥混凝土路面实测的部分测点数据

采样编号	测试桩号	钻探路面厚	试压抗折强度	试压抗压强度	瑞雷波速	已有公式	回归公式	相对误差
		cm	MPa	MPa		计算抗折强度*	计算抗折强度**	
					km/s	MPa	MPa	%
Y7	K137+840	29.2	6.08	45.2	1.815	5.826 5	6.084 9	0.08
Y11	K139+980	29.1	5.89	42.6	1.908	6.745 0	6.053 5	2.78
Y13	K138+400	29.0	6.10	43.6	1.900	6.662 7	6.056 1	−0.72
Y20	K134+280	30.0	5.96	44.2	1.843	6.094 3	6.075 3	1.93
Y23	K132+130	30.0	6.06	41.8	2.111	9.044 8	5.988 7	−1.18
Y29	K130+070	30.0	6.02	45.5	1.784	5.538 8	6.095 6	1.26
Y39	K127+120	29.8	6.30	44.8	1.942	7.101 8	6.042 3	−4.09

注：* 按文献[3]公式(13)~(15)计算；

* * 按本文建立的公式(12)计算。

4 结语

用瑞雷波检测路面强度是一种新型的快速无损检测法,通过大量的理论与实验验证,建立起了瞬态瑞雷面波波速与水泥混凝土路面强度之间的关系模型,通过采集现场原位面波信号,由便携式计算机进行各种数据处理和频谱分析,即可输出路面强度检测结果。与传统小梁试件法和钻芯取样法对比,其稳定性较好。

瞬态瑞雷面波法检测路面强度具有以下特点。

(1)该方法检测速度快,成果显示直观,当场即可显示结果,2~3 h 即可提交正式成果,更适合现场检测,检测后可以对检测数据进一步分析,如绘制平面等值线图。

(2)仪器设备轻便,检测方便,可减少检测人员,节约检测费用。

(3)瞬态瑞雷面波法以其高的检测效率,能提高同一路段上的点检密度,更好地控制工程质量。

(4)对比分析表明:水泥品种、骨料、水灰比、施工工艺、养护条件等的差异可能造成水泥混凝土弹

性性能不同,从而波速与强度的回归系数也随之变化,所以同一回归公式不能用于不同的工地,甚至不同的路段。需要在施工现场校核后才能使用。

研究表明,检测的精确性和可靠性需进一步提高,未来的研究重点应放在检测系统的正确配置及数据处理方法(如瑞雷波信号提纯处理)方面,此外对频散曲线的正反演结合研究,以精确求解瑞雷波波速也应当是今后工作的方向。

参考文献:

[1] JTJ 071—98,公路工程质量检验评定标准[S].
[2] 杨成林,等编著. 瑞雷波勘探[M]. 北京:地质出版社,1993.
[3] 建材科学院. 水泥物理检验[M]. 北京:建筑工业出版社,1985.
[4] 孙朝云,编著. 现代道路交通测试技术[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
[5] Wu T T, Liu P L. Advancement on the nondestructive evaluation of concrete using transient elastic waves [J]. Ultrasonics, 1998, 36.

A Study on Application of Pavement Intensity Inspection
by Transient Rayleigh Wave

LI Jia, DONG Hai-wen

(Institute of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To counter the defects of intensity inspection of cement concrete pavement, the basic principle and method of non-destructive intensity inspection of pavement by transient Rayleigh wave are presented. The method is proved to be more simple and reliable in application, and shows a good practicability.

Key words: transient Rayleigh wave; property of frequency spread; flexural tensile strength; NDT