

公路裂缝探测方法

胡仁东^{1,2}, 赵志伟³

(1. 中国地质大学 人文与经济学院, 湖北 武汉 430074; 2. 河南省交通工程定额站,
河南 郑州 450052; 3. 兰德马克绘图国际公司 北京分公司, 北京 100029)

摘要:为研究浅层地震映像法探测垂直裂隙,基于垂直裂缝反射波运动数学模型进行了数值模拟和超声波物理模拟,并对某高速公路层用浅层地震映像法进行了检测。对理论与实测结果分析表明:必须采用偏移距不为 0 的等偏移距映像法才能得到垂直裂缝的反射,否则难以对垂直裂缝进行有效检测;不管激发和接收点处于什么位置,水平界面上的反射点均与激发和接收点同侧、距垂直裂隙 $1/2$ 偏移距处。

关键词:道路工程;地震映像;公路垂直裂缝;数值模拟;物理模拟

中图分类号:U416.06 **文献标志码:**A

Detecting method of highway fractures

HU Ren-dong^{1,2}, ZHAO Zhi-wei³

(1. School of Humanities and Economics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;
2. The Traffic Engineering Ration Station of Henan Province, Zhengzhou 450052, Henan, China;
3. Beijing Office, Landmark Graphics International Inc, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to detect vertical fracture of subsurface by seismic imagine, the mathematical model with numerical simulating and physical ultrasonic simulating is developed. The result shows that the seismic imagine is an effective testing method only when the offset is not equals to zero. The reflect point of layer is always on the same side with shot point and received point, and the space from the reflect point to the interface projective point of vertical fracture is a half of offset in spite of shot point and received point locations. 7 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; seismic imagine; highway vertical fracture; numerical simulating; physical simulating

0 引言

公路裂缝是公路常见病害中最普遍的一种,也是公路水毁病害最主要的诱发原因之一。对于由下向上发育的公路隐含裂缝,若在面层开裂之前及早对其进行检测定位,对及时进行公路养护治理非常重要。在工程无损检测中,实际常用的无损检测方

法主要包括超声波透射法及回波法、表面波法、地质雷达法^[1]和图像处理法^[2-3]等。由于高速公路结构的特殊性,无法采用超声波透射法进行检测;另外,由于高速公路表层多采用沥青碎石混合材料,对高频超声波有强烈的吸收衰减作用,采用超声波回波法探测深度仅有几厘米,很难穿透面层达到基层和底基层;表面波法是利用表面波的 $\lambda/2$ 的性质进行

勘探的,其探测深度受到很大的限制,而且表面波法具有明显的二维平均效应,对探测裂缝而言,横向分辨率较低,采用该方法难以对裂缝位置进行准确定位;地质雷达勘探属于体积勘探,更难对单裂缝进行准确定位。在此之前,有人曾采用地震资料估计裂缝参数、断层和裂隙的回声^[4-10]等理论,进行过裂缝对地震波波速和振幅的响应特征的实验研究,但均偏于深层(如石油和煤田)研究。本文采用的偏移距不为 0 的等偏移距浅层地震映像法与超声波法相似,由于其频率适中,有一定的探测深度,弥补了超声波和地质雷达的不足。通过对某高速公路的实例检测,证明采用该方法可准确确定裂缝的位置、深度和特征,为高速公路结构层隐含裂缝的检测提供了一种有效的无损检测方法。

1 裂缝反射波走时方程

所谓映像法是一种采用等偏移距或零偏移距进行激发和接收,记录来自反射界面近法线或法线反射信号的振幅和走时的浅层地震反射法。对于水平和倾斜裂缝而言,波的传播旅行时间 t 可表示为

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{x_0^2 + 4(h \cos \alpha)^2}$$

式中: x_0 为偏移距; h 为真深度; v 为波在介质中的传播速度; α 为倾斜裂缝的视倾角。

当偏移距 x_0 很小时,即可视为自激自收,则有

$$t \approx \frac{2h \cos \alpha}{v}$$

当偏移距 $x_0 \neq 0$ 时,必须作等偏移距正常时差校正,其校正量 Δt_N 为

$$\begin{cases} \Delta t_N = \frac{1}{v} \sqrt{x_0^2 + 4(h \cos \alpha)^2} - \frac{2h \cos \alpha}{v} \approx \frac{x_0^2}{2t_0 v^2} \\ t_0 = \frac{2h \cos \alpha}{v} \end{cases}$$

式中: t_0 为法线回声时间。

而对于垂直裂缝而言,如图 1 所示(NM 代表垂直裂隙或裂缝),由几何关系有

$$\tan \beta = \frac{h_i}{x_i} = \frac{h - h_i}{x_p}$$

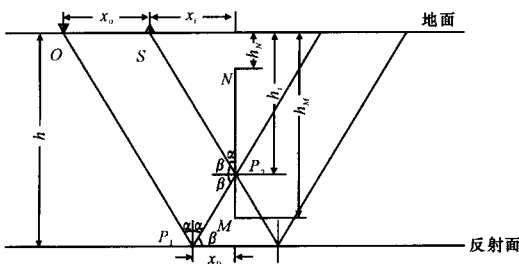


图 1 等偏移距映像原理

则

$$x_p = \frac{(h - h_i)x_i}{h_i} \tag{1}$$

$$\tan \alpha = \frac{x_i}{h_i} = \frac{x_0 + x_i - x_p}{h} = \frac{(x_0 + x_i)h_i - (h - h_i)x_i}{hh_i}$$

式中: x_p 为中间点偏移距离; h_i 为 P_2 点到地面的距离; β 为反射角; x_i 由式(2)给出。

$$\text{则} \quad h_i = \frac{hx_i}{2x_i + x_0} \tag{2}$$

显然,当偏移距 $x_0 = 0$ 时,即自激自收时,有 $h_i = h$ 。此时,无垂直裂缝反射,说明仅当偏移距 x_0 不为 0 时,才能得到垂直裂缝的反射。因此,实际探测时必须采用偏移距 x_0 不为 0 的等偏移距映像法进行探测,否则不能对垂直裂缝进行有效检测。

将式(2)代入式(1),得

$$x_p = \frac{(h - h_i)x_i}{h_i} = \frac{x_0}{2} \tag{3}$$

可见,不管激发和接收点处于什么位置,裂缝的反射在水平界面上的反射点均与激发和接收点同侧,且距垂直裂缝 $1/2$ 偏移距处。于是,在实际探测中必须适当选择偏移距 x_0 ,以便有效地从事垂直裂缝的探测。

垂直裂缝的反射时间 T 可表示为双曲线

$$T = \frac{1}{v} \left(\frac{h}{\cos \alpha} + \frac{h - h_i}{\cos \alpha} + \frac{h_i}{\cos \alpha} \right) = \frac{2h}{v} \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} = \frac{1}{v} \sqrt{(2x_i + x_0)^2 + 4h^2}$$

从而垂直裂缝两侧的反射同相轴构成似“八”字形,这是判别是否存在垂直裂缝的标志特征和依据。

$$\text{式(2)可写成} \quad x_i = \frac{x_0 h_i}{2(h - h_i)}$$

$$\text{当 } h_i = h_N \text{ 时,有} \quad x_N = \frac{x_0 h_N}{2(h - h_{Ni})} \tag{4}$$

$$\text{当 } h_i = h_M \text{ 时,有} \quad x_M = \frac{x_0 h_M}{2(h - h_{Mi})} \tag{5}$$

式中: h_N 、 h_M 分别为垂直裂缝顶、底端点的埋深。因此,仅在垂直裂缝长度 x_N 、 x_M 之间可接收到垂直裂缝的反射,否则只能接收到垂直裂缝两端点的绕射。

垂直裂缝两端点(N 、 M)绕射波时距曲线方程为

$$N \text{ 点} \quad t_N = \frac{1}{v} (\sqrt{(x_i + x_0)^2 + h_N^2} + \sqrt{x_i^2 + h_N^2})$$

$$M \text{ 点} \quad t_M = \frac{1}{v} (\sqrt{(x_i + x_0)^2 + h_M^2} + \sqrt{x_i^2 + h_M^2})$$

两者均为高次曲线。

2 垂直裂缝的数字和物理模拟

为了进一步阐明垂直裂缝在映射剖面上的特

征,设计了一个由一条长度为 6.0 cm 的垂直裂缝和一个埋深为 15.0 cm 的水平界面所构成的理论和超声物理模型,两者均为二维模型,其波速 $v=2\,200$ m/s。超声物理模型采用厚度为 0.3 cm 的有机玻璃板,裂缝宽度为 0.1 cm,整个模型竖立于水中,有机玻璃板顶边置于水面下 0.3 cm。模型见图 2。

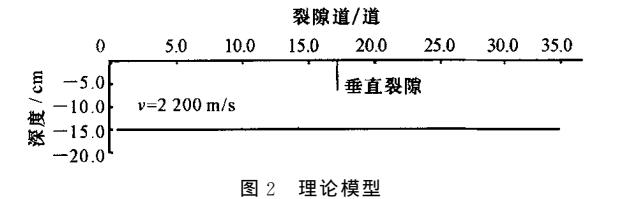


图 2 理论模型

2.1 数字模拟

数字模拟所采用的理论子波是频率为 70 kHz 的雷克子波,采样间隔 $dt=1.0\,\mu\text{s}$,偏移距 $x_0=1.0$ cm,记录道距 $dx=0.5$ cm。数字模拟时未考虑波的动力学特征,并且只考虑一次反射和绕射。由式(3)和式(4)得, $x_N=0$, $x_M=0.33$ cm。也就是说,仅当激发接收中点置于 16.75 cm 处时才能得到垂直裂缝的反射波,否则均为垂直裂缝下端点的绕射波。

图 2 模型相应的深度剖面记录如图 3 所示,可见,记录特征表现为以垂直裂隙为对称轴,第 34 和 35 道(即垂直裂缝投影处左右道)水平界面反射波振幅明显比其他道大,这是水平界面反射波与垂直裂缝反射波叠加之故,同理论结果相符。垂直裂缝在记录上呈现出似“八”字型,这是判别是否存在垂直裂缝的重要依据。

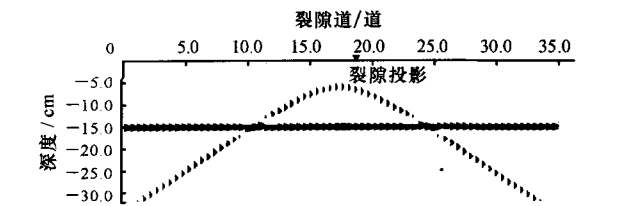


图 3 数字模拟深度剖面

垂直裂缝长度由 x_N 和 x_M 来确定,即

$$h_N = \frac{2hx_N}{2x_N + x_0} \quad h_M = \frac{2hx_M}{2x_M + x_0}$$

2.2 超声物理模拟

模拟采用的换能器固有频率为 70.0 kHz,采样率 $dt=1.0\,\mu\text{s}$,偏移距 $x_0=1.0$ cm,记录道距 $dx=0.5$ cm。同理,由式(3)和式(4)得, $x_N=0$, $x_M=0.33$ cm。图 2 模型相应的深度剖面记录如图 4 所示,可见,记录特征表现为以垂直裂缝为对称轴,第 34 和 35 道(即垂直裂缝投影处左右道)水平界面反射波振幅明显比其他道大,垂直裂缝在记录上呈现出似“八”字型特征,同数字模拟结果相符。说明了

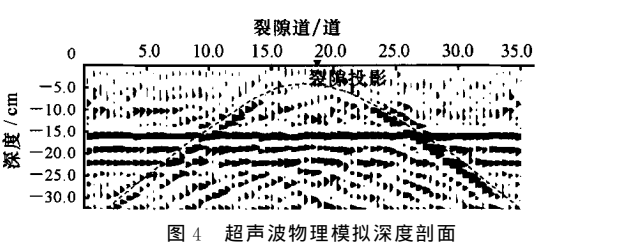


图 4 超声物理模拟深度剖面

采用弹性波法探测裂缝的可行性和有效性。

3 实例分析

以某高速公路地震映像检测剖面为例。该路段面层沿超车道和行车道的分界线位置出现纵向开裂。为查明引起开裂的原因,首先采用地质雷达进行了全线扫描,但由于地基土含水量偏高,探测深度受到了限制。为此,又采用地震映像法进行了试验。从试验结果发现,除可观察到的面层开裂外,在完好的沥青面层以下还分布着较多的隐含裂缝。

3.1 浅层地震条件及工作方法

浅层地震映像法是基于不同介质间存在物性差的地球物理方法。地震波遇到物性分界面或物性突变点时必然产生反射或绕射。高速公路的结构由上到下一般分为沥青面层(厚 15~20 cm)、水泥稳定碎石上基层(厚 30~50 cm)、石灰土底基层(厚 30~50 cm)、路堤填土(由填土高度决定)等。基层和面层的厚度一般较均匀。如果在横向上存在介质强度变化、层位厚度变化或深部存在隐含裂缝等缺陷,则在地震映像剖面上必然会明显反射或绕射,这是非常良好的地震地质条件,为采用浅层地震映像法进行检测提供了前提。另外,高速公路表层为强度较高的沥青层,具有较好的激发和接收条件。

为了确保试验结果的可靠性、准确性及信号具有较宽的频带,采用了 SE2404 增强型 24 道浅层地震仪和 100 Hz 高频检波器及频谱丰富的锤击震源。根据探测对象的特点并通过现场多参数试验,主要采集和观测参数为:记录道数 $N=1$;偏移距 $x_0=1.0$ m;采样间隔 $dt=0.025$ ms;道距 $d=0.1$ m(横向)或 $d=0.2$ m(纵向);垂直叠加次数 $n=3$ 。

3.2 资料处理与分析

为了提高记录的信噪比和分辨率,必须对数据进行数字处理,主要进行了真振幅恢复、提高分辨率的反褶积、获取有效波与干扰波频带的一维频谱分析、提高信噪比的一维滤波、消除偏移距影响的等偏移距高精度校正、时深转换及成图输出等处理,处理后获得的成果深度剖面如图 5~图 7 所示。

图 5 为沿公路超车道中线位置所做的一段纵向

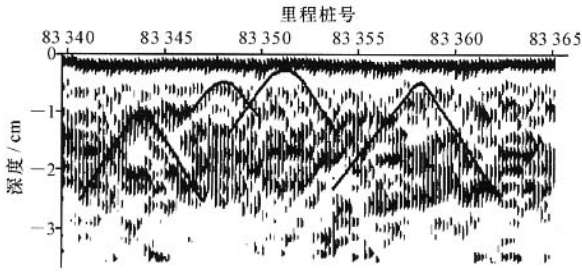


图5 公路地震映像深度剖面(沿路方向)

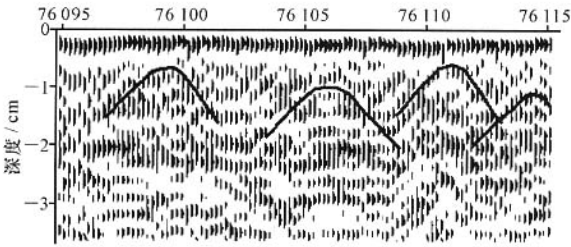


图6 公路地震映像深度剖面(沿路方向)

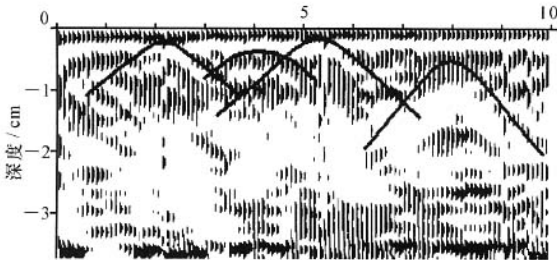


图7 公路地震映像深度剖面(垂直于路方向)

地震映像剖面,剖面长度为 25 m。在这 25 m 试验路段内,从路面看不到任何横向裂缝,但从地震映像剖面上却能看到明显的“八”字形特征反射波,而且深浅不一,说明在完好的沥青面层以下的基层和路堤填土中已有垂向裂缝发育。图 6 与图 5 的情况类似。图 7 为一条垂直于路方向的横向剖面,长 11 m。从路的表面看,有两条明显的纵向裂缝已穿透路面,剖面中已有明显反映(左起第 1 和第 3 条反射弧);而从映像剖面上看,还有两条隐含的纵向裂缝存在,为基层断裂。该隐含裂缝之上的沥青面层却非常完好。

4 结 语

(1) 浅层地震映像法探测垂直裂缝时,必须采用偏移距 x_0 不为 0 的等偏移距映像法才能得到垂直裂缝的反射,否则难以对垂直裂缝进行有效检测。不管激发和接收点处于什么位置,垂直裂缝的反射在水平界面上的反射点均与激发和接收点同侧,且距垂直裂缝 $1/2$ 偏移距处,反射波(或绕射波)同相轴呈现出似“八”字形特征,它是判别是否存在垂直裂缝的重要依据。

(2) 浅层地震映像法是一种检测公路隐含裂缝的行之有效的无损检测方法。

参考文献:

References:

- [1] 国家建筑工程质量监督检验中心. 混凝土无损检测技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,1999.
- [2] 刘 桦,尹如军,王国安. 公路裂缝处理技术及设备[J]. 筑路机械与施工机械化,2004,21(3):25-27.
LIU Hua, YIN Ru-jun, WANG Guo-an. Highway crack treatment technique and equipment[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2004, 21(3):25-27.
- [3] 李晋惠. 用图像处理的方法检测公路路面裂缝类病害[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(3):24-29.
LI Jin-hui. Pavement crack diseases defecting by image processing algorithm[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(3): 24-29.
- [4] 王金昌,朱向荣. 软土地基上含反射裂缝沥青道路的动力响应分析[J]. 中国公路学报,2004,17(1):1-6.
WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong. Dynamic analysis of asphalt pavement with reflective cracking on the soft clay ground[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 1-6.
- [5] 王宏畅,黄晓明,傅 智. 半刚性基层表面裂缝影响因素[J]. 交通运输工程学报,2005,5(2):38-41.
WANG Hong-chang, HUANG Xiao-ming, FU Zhi. Influence factors on surface crack of semi-rigid base course[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2):38-41.
- [6] Bakulin A, Grechka V, Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data, part I: HTI model due to a single fracture set[J]. Geophysics, 2000, 65(6): 1788-1802.
- [7] Bakulin A, Grechka V, Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data, part II: fractured models with orthorhombic symmetry [J]. Geophysics, 2000, 65(6): 1803-1817.
- [8] Bakulin A, Grechka V, Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data, part III: fractured models with monoclinic symmetry[J]. Geophysics, 2000, 65(6): 1818-1830.
- [9] Groenenboom J, Van D D B. Monitoring hydraulic fracture growth: Laboratory experiments[J]. Geophysics, 2000, 65(2): 603-611.
- [10] Haugen G U, Schoenberg M A. The echo of a fault or fracture[J]. Geophysics, 2000, 65(1): 176-189.