

用瑞利波法检测堤防基础的质量

王山山 ,任青文

(河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :介绍瑞利波法的基本原理及其在堤防基础质量检测方面的应用 ,同时介绍其现场检测的方法及所使用的仪器设备 .采用瑞利波法对淮入海水道阜宁段的堤防基础进行了无损检测试验研究 ,结果表明 ,瑞利波法在堤防基础质量无损检测中具有速度快、方便、准确的特点 ,具有广泛的应用前景 .

关键词 瑞利波 ;堤防基础 ;质量检测 ;淮入海水道

中图分类号 :TV871.4 文献标识码 :B 文章编号 :1006-764X(2004)07-0031-02

瑞利波法是一种岩土原位测试勘探方法 .在传统的利用人工激发纵波的反射波法勘探中 ,瑞利波是要想方设法从记录上消除的强干扰波 .近年来随着仪器设备和数据处理技术的发展 ,把人工激发并记录的瑞利波 ,用于解决地下浅部工程和环境地质问题的勘探方法逐渐兴起 ,成为值得推广的物探新技术 .但用瑞利波法对堤防基础进行无损检测还只是刚刚起步 .本文介绍用瑞利波法对堤防基础进行质量检测的方法与检测效果 .

1 检测原理

通过瑞利波频散特性和传播速度与介质的物理力学性质的相关性 ,对堤防的基础质量进行无损检测 .

如果两个检波器的时域记录为 $x(t)$ 、 $y(t)$,其频谱^[1]分别为

$$\begin{cases} X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2i\pi ft} dt \\ Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-2i\pi ft} dt \end{cases} \quad (1)$$

$x(t)$ 和 $y(t)$ 的自功率谱可分别表示为

$$\begin{cases} S_{11}(f) = X(f)X^*(f) \\ S_{22}(f) = Y(f)Y^*(f) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $X^*(f)$ 、 $Y^*(f)$ 为式(1)中 $X(f)$ 、 $Y(f)$ 的复共轭谱 .而 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互功率谱为

$$S_{21}(f) = Y(f)X^*(f) = X^*(f)Y(f) = |Y(f)| |X(f)| e^{i\Delta\phi(f)} \quad (3)$$

可见 ,互功率谱中的相位谱反映了包含在瑞利波中的相应单频波的相位差 .在互功率谱函数中 ,并非对各频率 f 都是有效的 ,关键是看所计算的频段内瑞利波

从检波器 1 向检波器 2 传播时是否有良好的相关性 ,也就是说该频段的质量好不好 .为此定义相干函数

$$\alpha(f) = \frac{S_{21}(f)S_{21}^*(f)}{S_{11}(f)S_{22}(f)} \quad (4)$$

式中 $\alpha(f)$ 的模恒为 1 ,可通过 $\alpha(f)$ 的实部进行质量评价 .如果在传播过程中系统是理想的 ,则该频段内 $\alpha(f)$ 的实部绝对值应接近 1 ,若由于干扰和系统的非线性使信号的质量降低 , $\alpha(f)$ 的实部绝对值将降低 .在评价瑞利波质量时 ,选择其值大于 0.8 的频段计算瑞利波的速度 .根据以上所选取的瑞利波波速可作出 $v_R \sim f$ 曲线或 $v_R \sim \lambda_R$ 曲线 .

现场检测时 ,为了提高其精度 ,采用多道瞬态瑞利波法 .在堤防上沿波的传播方向 ,以一定的道间距 Δx 设置 $N+1$ 个检波器^[2] ,就可以检测到瑞利波在 $N\Delta x$ 长度范围内的传播情况 .设瑞利波的频率为 f_i ,相邻检波器记录的瑞利波的时间差为 Δt ,或相位差为 $\Delta\varphi$,则相邻道 Δx 长度内瑞利波的传播速度为

$$v_{Ri} = \Delta x / \Delta t \quad (5)$$

或
$$v_{Ri} = 2\pi f_i \Delta x / \Delta\varphi \quad (6)$$

测量范围 $N\Delta x$ 内平均波速为

$$v_R = N\Delta x / \sum_{i=1}^N \Delta t_i \quad (7)$$

或
$$v_R = 2\pi f_i N\Delta x / \sum_{i=1}^N \Delta\varphi \quad (8)$$

在同一地段测出一系列频率的 v_R 值 ,就可以得一条 $v_R \sim f$ 曲线 ,即所谓的频散曲线或转换为 $v_R \sim \lambda_R$ 曲线 ,其中 λ_R 为波长 , $\lambda_R = v_R / f$. $v_R \sim f$ 曲线或 $v_R \sim \lambda_R$ 曲线的变化规律与堤防的基础存在着内在联系 ,通过对频散曲线进行解释 ,可推断堤防的基础某一深

度范围内的介质构造.另一方面, v_R 值的大小与介质的物理力学特性有关,据此可对堤防基础的物理力学特性做出评价.

2 测试方法

正式检测前先进行试验工作,包括道一致性检测,合理布置道间距和偏移距.合理安置检波器,检波器要求安装垂直,保证与地面有良好的耦合.通过显示器对检波器状态和接受信号的质量进行监测.然后进行激发及数据采集.

计算机安装瑞利波分析处理软件,能对记录信号进行频谱分析、相位谱分析,把各个频率的瑞利波分离出来,从而得到频散曲线,再反演解释为瑞利波速度与深度曲线.

检测时,采用锤击震源,利用纵向多道采集的人工地震记录,提取瑞利面波波速频散数据.数据处理流程如图 1 所示.

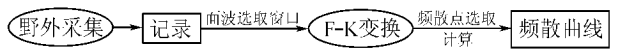


图 1 数据处理流程示意图

检测仪器为德国 DMT 公司生产的 SUMMIT 高分辨率、大动态范围遥测地震仪.主要性能如下:

- ①采样间隔为 1/128 ms, 1/64 ms, 1/32 ms, …… 8 ms;
- ②最大输入信号 2 V RMS;
- ③系统输入噪声 0.6 μ V RMS(1/4 ms 时);
- ④动态范围大于 130 dB(1/4 ms 时);
- ⑤系统分辨率 24 bit(2 ms 时);
- ⑥前置放大为自动增益控制.

瑞利波激发及数据采集系统由震源、检波器、采集单元、传输线及高分辨率地震仪组成.系统布置如图 2 示.

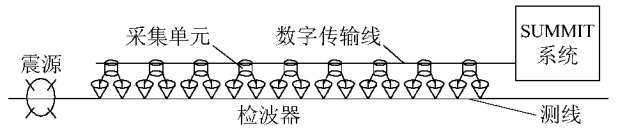


图 2 激发及数据采集系统布置示意图

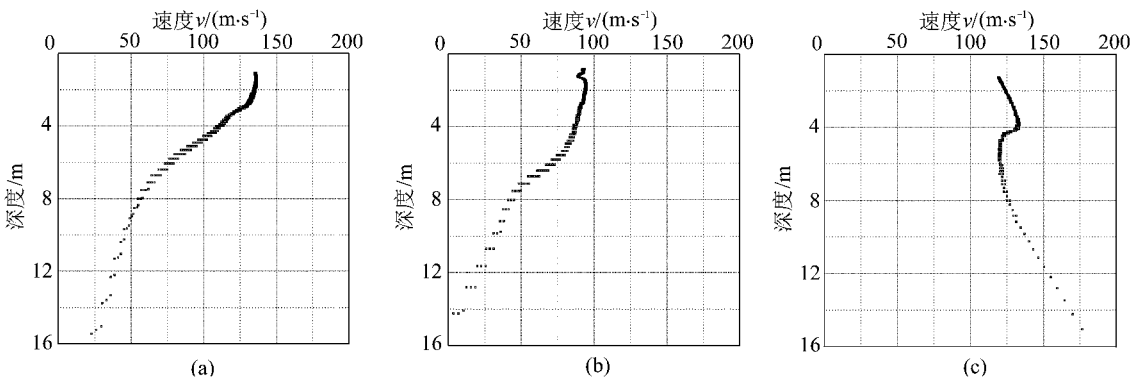


图 3 频散曲线

3 检测实例

淮河入海水道阜宁段堤防,地基为深厚的淤泥质软土.为了快速了解工程建设过程中堤防基础的质量状况,对淮河入海水道阜宁段 87 + 450 断面的堤防基础进行了瑞利波检测的试验研究.

检测得出的典型频散曲线如图 3 所示.图 3(a) 为新筑堤的堤身及基础的瑞利波频散曲线,图 3(b) 为新筑堤堤下原状土的瑞利波频散曲线,图 3(c) 为老堤的堤身及基础的瑞利波频散曲线.

新筑堤现已施工的堤身高度为 2.8 m,由图 3(a) 可知堤身密实度均匀,瑞利波波速约为 135 m/s,其基础密实度较差,从地表开始至以下 1.5 m,瑞利波波速由 135 m/s 迅速降至 75 m/s.其下在测试的有效深度 16 m(基础有效深度 13.2 m)瑞利波波速不断降低.图 3(b) 的瑞利波波速与图 3(a) 的瑞利波波速基本规律一致,说明此处堤防基础的淤土尚未固结.图 3(c) 为在同一断面上的淮河原灌溉总渠使用的老堤及基础的瑞利波频散曲线,堤身约为 4 m,密实度自上而下有小幅度增大.基础上面部分 4 m 范围内密实度较堤身有所降低,瑞利波波速约为 125 m/s;基础下面部分 4 m 范围内密实度逐渐增大,瑞利波波速由 125 m/s 增大到 180 m/s.此处堤基的密实度明显大于新筑堤基础的密实度,说明此处堤防基础的淤土已经固结.

4 结 论

a. 瑞利波波速可以有效地反映堤防基础的刚性,可用于堤防基础质量的快速无损检测.瑞利波法不仅可以检测已施工完毕的堤防基础的质量,而且还可以在施工过程中随时进行现场检测,对施工过程起到全程监测的作用.

b. 瑞利波法在工程质量无损检测中具有速度快、方便、准确的特点,可适用于大面积检测堤防基础的质量状况,具有广泛的应用前景.

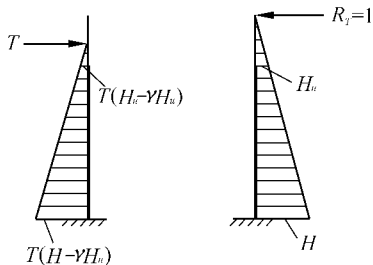


图2 位移 Δ_{1T} 的计算

$$R_T = \frac{-\Delta_{1T}}{\delta_{11}} =$$

$$T \left\{ \left[\frac{(1-\gamma)^2}{n} + \frac{(1-\gamma)^2\gamma}{2n} + \frac{3\gamma}{2} - 1 \right] \lambda^3 - \frac{3}{2} \gamma \lambda + 1 \right\} \frac{1}{\left[1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]} \quad (4)$$

又已知 $R_T = C_5' T$ 则 $C_5' = \frac{R_T}{T}$,于是

$$C_5' = \frac{\left(\frac{\gamma^3 - 3\gamma + 2}{2n} + \frac{3\gamma}{2} - 1 \right) \lambda^3 - \frac{3}{2} \gamma \lambda + 1}{1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right)} \quad (5)$$

分子、分母同乘以 2 得

$$C_5' = \frac{\left(\frac{\gamma^3 - 3\gamma + 2}{n} + 3\gamma - 2 \right) \lambda^3 - 3\gamma \lambda + 2}{2 \left[1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]} \quad (6)$$

式(6)即为计算吊车水平荷载作用在任意点处时柱顶不动支点反力的计算系数通式。

3 计算系数 C_5' 的验证

令 $\gamma = 0.6, 0.7, 0.8$ 本文计算系数 C_5' 与文献[1]附录 10 中的系数 C_5 的比较见表 1。可见 本文给出的 C_5' 计算式与原有计算系数 C_5 计算式完全相同,说明本文所给出的计算系数 C_5' (式(6))是正确的。

表 1 系数 C_5 与 C_5'

γ	C_5	C_5'
0.6	$\frac{\left(\frac{0.416}{n} - 0.2 \right) \lambda^3 - 1.8\lambda + 2}{2 \left[1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]}$	$\frac{\left(\frac{0.416}{n} - 0.2 \right) \lambda^3 - 1.8\lambda + 2}{2 \left[1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]}$
0.7	$\frac{\left(\frac{0.243}{n} + 0.1 \right) \lambda^3 - 2.1\lambda + 2}{2 \left[1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]}$	$\frac{\left(\frac{0.243}{n} + 0.1 \right) \lambda^3 - 2.1\lambda + 2}{2 \left[1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]}$
0.8	$\frac{\left(\frac{0.112}{n} + 0.4 \right) \lambda^3 - 2.4\lambda + 2}{2 \left[1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]}$	$\frac{\left(\frac{0.112}{n} + 0.4 \right) \lambda^3 - 2.4\lambda + 2}{2 \left[1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]}$

4 计算举例

下面通过举例对本文给出系数 C_5' 的公式与文

献[1]推荐的计算方法进一步比较。令水平力 T 作用在 $y = 0.653 H_u$ 位置, $\lambda = 0.314, n = 0.369$, 计算反力 R_T ($R_T = C_5 T$)。

a. 利用原有方法计算。先计算出 $y = 0.6 H_u$ 时

$$C_5 = \frac{\left(\frac{0.416}{n} - 0.2 \right) \lambda^3 - 1.8\lambda + 2}{2 \left[1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]} \approx 0.695$$

再计算出 $y = 0.7 H_u$ 时

$$C_5 = \frac{\left(\frac{0.243}{n} + 0.1 \right) \lambda^3 - 2.1\lambda + 2}{2 \left[1 + \lambda^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right]} \approx 0.648$$

然后利用插值法求 $y = 0.653 H_u$ 时的 C_5 :

$$(C_5)_{0.653} = \frac{0.695 - 0.648}{0.7 - 0.6} \times (0.7 - 0.653) + 0.648 = 0.6701$$

b. 利用本文公式(6)直接求得

$$C_5' = 0.6697$$

查文献[1]中附图 10-4 得 $C_5 = 0.67$ 。因此可证明本文所提出的方法与文献[1]给出的方法相比既简捷又精确。

5 结 语

综上所述两种方法比较,可见本文增加计算系数 γ 后的推导公式 C_5' 比原公式的查表插值简便,省去了插值计算过程,使计算吊车水平荷载 T 作用下柱顶不动支点反力 R_T 更简捷、精确。

参考文献 :

- [1] 东南大学, 同济大学, 天津大学. 混凝土结构(下册) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. 535 ~ 539.
- [2] 龙双球, 包世华. 结构力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1979. 140 ~ 146.

(收稿日期 2004-05-08 编辑 高建群)

(上接第 32 页)

c. 利用瑞利波法定量分析堤防基础的刚度等特性还需进一步从理论模型、现场测试方法及数据处理手段等方面作进一步深入的研究。

参考文献 :

- [1] 王兴泰. 工程与环境物探新方法新技术 [M]. 北京: 地质出版社, 1996. 32 ~ 66.
- [2] 赵明. 瑞利波法在工程勘探中的应用 [J]. 勘探科学技术, 199(5): 54 ~ 57.

(收稿日期 2004-05-11 编辑 熊水斌)