

文章编号 :1007 - 649X(2000)01 - 0019 - 04

道路结构瑞利波特性及动力响应分析

夏唐代¹, 胡永生², 杨顺群², 陈昭友²

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 黄河水利委员会勘测规划设计研究院, 河南 郑州 450003)

摘 要 : 利用有限单元法分析了道路结构的 R 面波传播特性 : 在深度方向上衰减较慢 , 传播较深 , 波动性大 . 提出了在道路结构动力响应计算中 , 利用面波来模拟水平向传播波 , 利用体波来模拟竖直向传播波 . 通过算例来验证该方法的可靠性和精确性 , 并利用这一动力响应计算方法分析了道路结构表面波测试中所获弥散曲线的可靠性 .

关键词 : 道路结构 ; 动力响应 ; 瑞利波 ; 传递边界 ; 半无限元

中图分类号 : TU 435 文献标识码 : A

0 引言

无界弹性介质中存在两种体波——压缩波和剪切波 , 1887 年瑞利 (Rayleigh) 发现了半空间弹性介质中存在一种由压缩波和剪切波干涉产生的波——瑞利波 , 并指出在匀质、各向同性弹性半空间中 , 瑞利波波速与振动频率无关 , 瑞利波在深度方向衰减较快 , 而在水平方向衰减很慢 , 即瑞利波主要沿半空间表面传播 , 故瑞利波是一面波 .

随着交通事业的发展 , 高速公路、机场、高速铁路道及城市地下结构的建设日趋增多 , 交通对周围环境的影响也相应加强 , 路面宽大且车流量增多 . 研究道路结构中外荷作用下 (如汽车、飞机、动力基础等) 对周围环境的影响及地下构造物的影响 (污染) 是有必要的 , 这就需要一种计算道路结构动力影响的方法 , 可为设计减少这种影响提供可靠数据 . 且公路的不断增多 , 常规检验路面质量的弯沉法已不能满足要求 , 需一套能快速可靠检测道路质量的测试系统 . 表面波法是一种能快速无损测试土参数的方法 , 道路结构中 R 面波的弥散性在文献 [1, 2] 中已详细讨论 , 但对道路结构中表面波法的机理及传播特性还不很清楚 , 需进一步研究 , 以便完善表面波法及道路结构 .

有限单元法动力计算中边界处理的好坏将直接影响计算结果的精度 , 本文将首先采用有限元

法研究道路结构 R 波的传播规律 , 然后在应用这一规律 , 并结合文献 [3] 的动力计算方法 , 提出适合于道路结构动力计算的方法 , 并对其可靠性和精确性进行讨论 .

1 方法简介

利用文献 [1~3] , 可建立道路结构 (平面应变问题) 瑞利面波弥散特征方程 , 考虑阻尼时为

$$[K] - \omega^2 [M] + i\omega [C] = 0 \quad (1)$$

式中 $[K]$ 为刚度矩阵 $[M]$ 为质量矩阵 ; ω 为振动角频率 $[C]$ 为阻尼矩阵 .

利用文献 [4] 中的计算理论 , 可有

$$[C] = \bar{\alpha} [M] + \bar{\beta} [K] \quad (2)$$

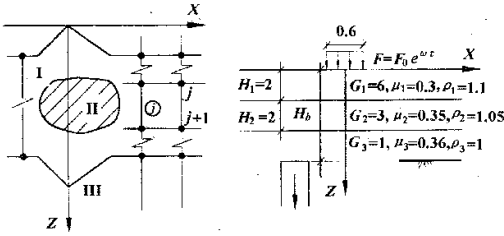
式中 $\bar{\alpha} = \zeta\omega$; $\bar{\beta} = \zeta/\omega$; ζ 为阻尼系数 .

道路结构中相速度 c 大于最下层 (半无限层) 的瑞利波速 , 导致 a 和 b 为复数 , 从而式 (1) 为复函数 , 对于给定的角频率 ω , 式 (1) 中只有未知数相速度 c 和波数 k . 对式 (1) 的求解 , 文献 [2] 指出 , 假设 c 为实数 , 求出的弥散曲线与理论解相差不大 , 此外也可利用逼近迭代方法求出 c 和 k , 进一步可求出各模态波的位移分布矢量 .

这里将直接引用文献 [3] 的动力计算方法 . 如图 1(a) 所示结构 , 区域 I 采用有限单元划分 , 区域 II 对区域 I 的边界力则采用传递边界单元建立 (第一模态波) , 区域 III 则采用半无限单元 , 瑞利面

收稿日期 : 1999 - 11 - 30 ; 修订日期 : 1999 - 12 - 27

作者简介 : 夏唐代 (1964 -) 男 , 江西省吉安县人 , 浙江大学副教授 , 博士后 , 主要从事岩土工程方面的研究 .



(a) 计算区域划分 (b) 地基结构

图 1 计算简图

波第一模态提供的边界力为

$$\begin{Bmatrix} F_{j,x} \\ F_{j,z} \\ F_{j+1,x} \\ F_{j+1,z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2i}{3}\alpha^2bk_1 & \frac{1}{2}(\alpha^2-2\beta^2) & \frac{i}{3}\alpha^2bk_1 & -\frac{1}{2}(\alpha^2-2\beta^2) \\ \frac{1}{2}\beta^2 & \frac{2i}{3}\beta^2bk_1 & -\frac{1}{2}\beta^2 & \frac{i}{3}\beta^2bk_1 \\ \frac{i}{3}\alpha^2bk_1 & \frac{1}{2}(\alpha^2-2\beta^2) & \frac{2i}{3}\alpha^2bk_1 & -\frac{1}{2}(\alpha^2-2\beta^2) \\ \frac{1}{2}\beta^2 & \frac{i}{3}\beta^2bk_1 & -\frac{1}{2}\beta^2 & \frac{2i}{3}\beta^2bk_1 \end{bmatrix} \cdot \rho \cdot \begin{Bmatrix} U_j \\ W_j \\ U_{j+1} \\ W_{j+1} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

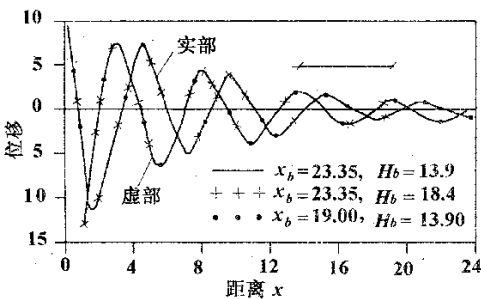
式中： $F_{j,x}$ 、 $F_{j,z}$ 和 U_j 、 W_j 分别为第 j 节点 x 和 z 方向的力和位移； α 和 β 分别为土体的压缩波速和剪切波速。

第一模态波波数 k_1 可按式(1)迭代逼近求解，为一复数，向 x 正方向传播时其虚部为负数（实部为正数）；向 x 负方向传播时虚部为正数（实部为负数）。道路结构中瑞利面波的有效传播深度不同于上硬下软地基，前者传播深度非常大，因此半无限元需取在较大深度 H_b 处。

根据式(3)及半无限元矩阵，结合区域Ⅰ单元的刚度矩阵和质量矩阵，可得稳振时平面内道路结构的动力响应方程（约去时间因子）

$$([K] + i\omega[C] - \omega^2[M])\{U\} = \{F\}.$$

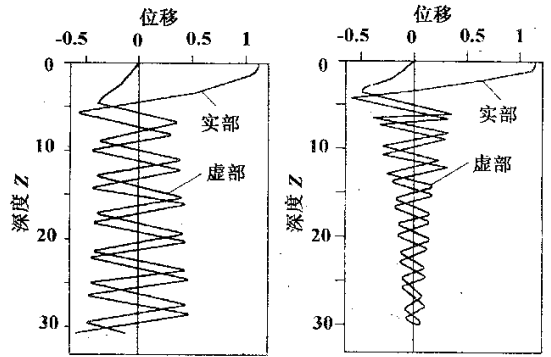
式中 $[C]$ 为阻尼矩阵，取法与式(2)相同。



(a) $\xi = 0.0$

2 算例分析

这里只讨论 3 层上硬下软道路结构地基，结论也适用于多层地基，结构图见 1(b)，有关参数见图(已无量纲化)，匀布荷载 $F_0 = 1333$ 。文献[2]对道路结构 R 波弥散性进行了讨论，指出当波长短时(频率高)，第一模态波相速度趋近于第一层结构的瑞利波速，反之则趋近于最下一层结构的瑞利波速。图 2 为道路结构 R 波第一模态波竖向位移分布，从图中可知，波的传播深度远比上软下硬地基深，前者沿深度方向衰减很慢，并且波动性强，可认为是一种深层 R 波，而不是表面 R 波。

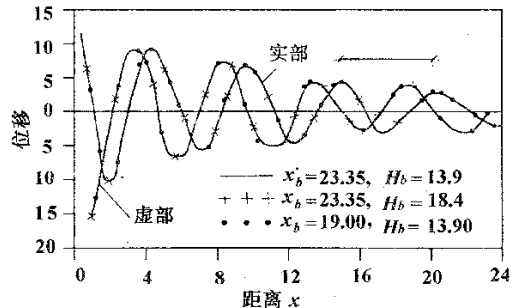


(a) $\xi = 0.0$

(b) $\xi = 0.05$

图 2 位移矢量分布

动力计算时，由于第一模态波沿深度方向衰减慢，在应用该方法时， H_b 应取较大值。限于篇幅，这里只讨论一种频率 $\omega = 2.4$ 的动力计算，结论也适用于其他频率波。图 3 给出了无阻尼和有阻尼时不同 H_b 及 x_b 情况下结构表面质点竖向位移。图 4 为截面 $x = 2.08$ ($\xi = 0$)和 $x = 13.4$ ($\xi = 0.05$)处质点的水平向位移分布，这里 k_1 仍取最下层结构的剪切波波数， $k_1 = (1.127, -0.0705)$ 及 $k_1 = (1.238, -0.1025)$ 。从图 3、4 知，边界 x_b 不同对结果影响很小，半无限元处 H_b 达到一定



(b) $\xi = 0.05$

图 3 本文方法表面质点竖向位移

值时对结果影响较小,尤其对有阻尼情况的 H_b 影响更小. 主要是因为有阻尼时,第一模态波位移分别矢量沿深度方向是衰减的(见图 2(b)),而实际工程上半无限层土是有阻尼的,因此该方法用于计算道路结构的动力响应是可靠的,精度也较高. 能满足要求,计算表明,一般 $H_b = 2.0\lambda_1 \sim 3\lambda_1$, λ_1 为第一模态波波长. 图 3 中同时给出了向 x 方向传播的波(地表上)的波长 λ ,可知与 R 面波的第一模态波波长相差很小,因此可见向 x 方向传播的波用 R 面波第一模态波模拟是合理的. 还可看出,在道路结构动力问题上(动力基础、城市交通等),波沿水平方向衰减较快,而竖直方向则较慢,波传播较深(这些结论正好与上软下硬地基相反),对地下建筑物有一定的影响,设计时应考虑.

图 5 利用文献 [5] 给出了一般传递边界法(即在一定深度 H_b 处刚性截断)计算的结果. 由图可知,假设结构在 H_b 以下为刚性,该法精度较高

(相对于不同 x_b 而言),但如果基岩较深,不同 H_b 处截断时,计算结果变化较大,精度很低,原因是因刚性截断产生高阶波,含一定能量. 图 6 为 $H_b = 7.025$ 处刚性截断的 R 面波的位移分布矢量,可知位移分布情况与实际不同,且低模态波在地表能量较小,高阶波则较大.

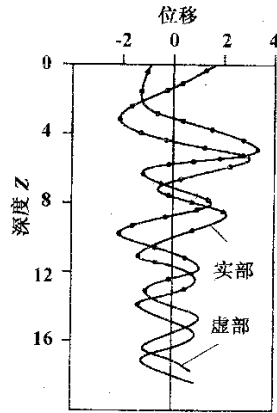
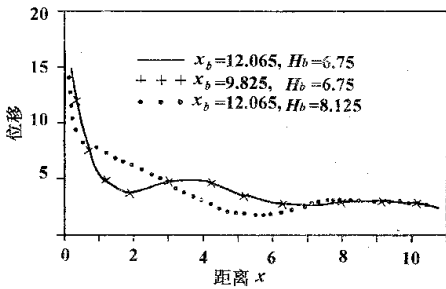
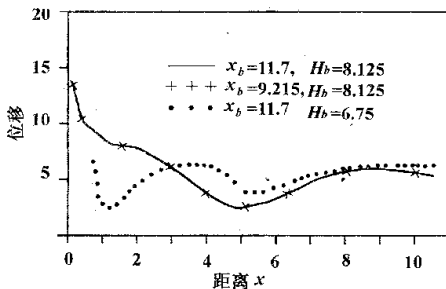


图 4 截面水平向位移 ($\zeta = 0.05, \omega = 2.40$)

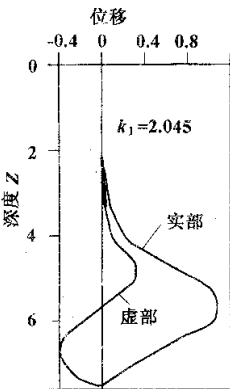


(a) $\zeta = 0$

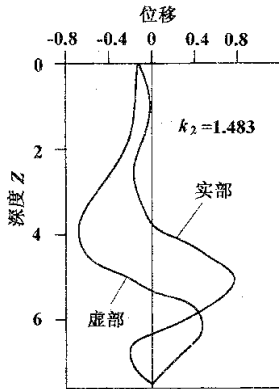


(b) $\zeta = 0.05$

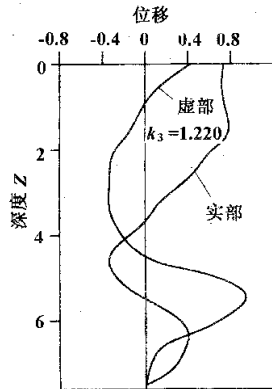
图 5 传递边界法表面质点竖向位移 ($\omega = 2.40$)



(a) 第一模态



(b) 第二模态



(c) 第三模态

图 6 位移分布曲线

通过瑞利面波现场测试,设检波器 1 和 2 相距 L ,将信号进行频谱分析,可得到频率 ω ($\omega = 2\pi f$) 所对应的两传感器之间的相位角差 Φ ,则相速度 c 和波数 k 即为

$$c = 360 L f / \Phi; \lambda = c / f, \quad (7)$$

对于固定的 f ,如果所测 c 与传感器位置无关,则 x 与 Φ 应呈直线关系,否则表面波法是不可靠的.

图 7 给出了不同频率 ω 时 $x \sim \Phi$ 的关系(使用本文方法进行动力计算),不难看出 x 与 Φ 呈直线关系,图中同时给出了由式 7 计算的相对速度 c , c 与第一模态波波速 c_1 相差很小($\omega = 1.0$ 时, $c_1 = 1.495$; $\omega = 1.82$ 时, $c_1 = 1.707$; $\omega = 2.4$ 时, $c_1 = 1.950$; $\omega = 3.75$ 时, $c_1 = 1.954$). 由此可见,道路结构表面波测试中所获弥散曲线为第一模态波弥散曲线.

图 8 利用文献[5]给出了使用一般传递边界法计算时不同 H_b 情况下 $x \sim \Phi$ 的关系,同时给出了直线段的相速度 c ,可见 c 与 H_b 有关,且都大于第一模态波波速 c ,与前面分析的高阶波占主要相符.

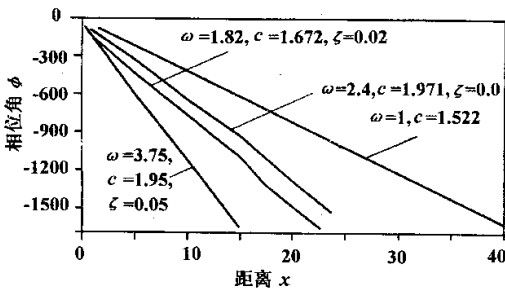


图 7 本文方法 $x \sim \Phi$ 关系

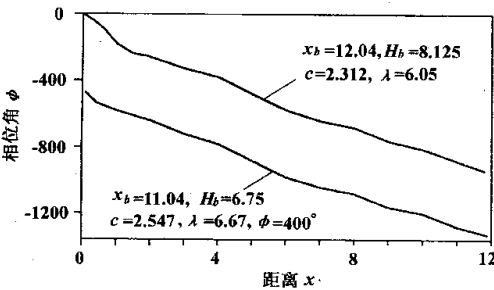


图 8 传递界法 $x \sim \Phi$ 关系

3 结论

本文讨论了道路结构瑞利波传播特性及道路结构的动力响应计算,得出如下结论:

(1) 道路结构中瑞利波在深度方向上衰减较慢,传播较深,波动性大,是一种深层 R 波.

(2) 传递边界法需在一定深度 H_b 处刚性截断,产生高阶波,结果误差大,不稳定.而利用本文方法计算道路结构地基时结果稳定性好,精度高,能满足工程要求,道路结构动力计算时 H_b 较大,一般 $H_b = 2.0\lambda_1 \sim 3.0\lambda_1$.

(3) 在道路结构动力问题中波沿水平方向衰减较快,竖直向则衰减慢,传播深,这与上软下硬地基相反,道路结构表面波测试中所获弥散曲线为第一模态波弥散曲线, x 与 Φ 呈直线关系.

参考文献:

- [1] 夏唐代. 地基中表面波特性及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 1992. 12.
- [2] 夏唐代, 陈云敏, 吴世明. 道路结构瑞利波弥散曲线计算[A]. 中国土力学编委会. 第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集[C]. 上海: 同济大学出版社, 1991.
- [3] 夏唐代, 蔡袁强, 陈云敏, 等. 瑞利波特性计算地基动力响应的进一步探讨[J]. 岩土工程学报, 1996(3): 28-34.
- [4] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- [5] WAAS G, RIGGS H R, WERKLE H. Displacement solution for dynamical loads in transversely - isotropic stratified media[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1985, 13: 173-193.

Characteristics of R Wave and Calculating Dynamic Responses in Pavement Structures

XIA Tang - dai¹, HU Yong - sheng², YANG Shun - qun², CHEN Zhao - you²

(1. Institute of Rock Soil Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Institute of Reconnaissance Planning, Design & Research, the Yellow River Conservancy Commission, 450003, China)

Abstract Propagation characteristics of R wave in a pavement structures are analysed in this paper. Based on the propagation characteristics of R wave, the horizontal propagation wave is simulated by using R wave, the vertical propagation wave is also simulated by using body wave in calculating dynamic response of pavement structures. The availability and accuracy of dispersion curves measured by SASW in pavement structures is analysed by using the presented method used to calculate dynamic response.

Key words pavement structure; dynamic response; Rayleigh wave transmitting boundary; semi - infinite element