

波動理論を用いた舗装の構造評価に関する数値シミュレーション

東京電機大学 学生会員 清木 啓
東京電機大学 フェロー会員 松井 邦人

東亜道路工業(株) 横田 明之
国土技術政策総合研究所 正会員 八谷 高好

1. はじめに

舗装の構造評価のための非破壊試験として FWD 試験が普及している。FWD 試験は測定したたわみ形状より構造評価を行う。一方、表面波の伝播速度に着目し構造評価を行う SASW 試験がある。舗装のような層状構造においては周波数により伝播速度が異なるという分散性を伴い周波数と伝播速度の分散曲線が求まり、層特性が推定できる。SASW 試験においては各層の弾性係数と共に層厚の推定も可能である。しかし筆者らも層厚既知の舗装断面で SASW 試験を行ってきたが本手法による層厚推定の困難さを認識している。そこで本研究では SASW 試験の理論的アプローチとして舗装を 2 層の 2 次元弾性体と仮定し層内の伝播速度を数値シミュレーションで求めている。表層厚が分散曲線に及ぼす影響を明らかにし、SASW 試験による層厚推定の是非を問うことを目的としている。

2. 弾性波動論

弾性体の釣合い式から導いた弾性波動の支配方程式は次式で表わされる。

$$(\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + G \nabla^2 u_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1)$$

ここに、 $i = 1, 2, 3$: x, y, z 方向成分

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

式(1)の支配方程式を膨張項について解く。

$$V_P = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho} \quad (2)$$

式(2)は P 波の伝播速度である

$$V_S = \sqrt{G/\rho} \quad (3)$$

式(3)は S 波の伝播速度である。実体波である P 波、S 波以外に式(1)の支配方程式にポテンシャル関数を代入して導かれる R 波(レイリー波)と呼ばれる波がある。R 波は、表面近傍では、実体波より大きなエネルギーを

有して、楕円を描く運動をしながら弾性体表面に沿って伝播している。

3. 弾性波動解析

本研究では、鉛直方向の変位を支配する超越関数を線形化することにより、層構造内の波動の伝播速度を求めている。この手法は超越関数を線形化し応力と変位の剛性マトリックスを作成することで、無限個ある波数 k を有限個の固有値問題に置き換えている。変位と応力の定義

$$\begin{Bmatrix} u(k, z) \\ s(k, z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U(z) \\ S(z) \end{Bmatrix} e^{i(\omega t - kx)} \quad (4)$$

外力と変位の剛性マトリックスを作成する。

$$\{P\} = [K(k)]\{u\} \quad (5)$$

本解析では外力がない弾性体における解析であるので、外力項にゼロを代入すると次式が成り立つ。

$$[A] \begin{Bmatrix} U \\ kV \end{Bmatrix} = k^2 [B] \begin{Bmatrix} U \\ kV \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{ここに、} [K(k)] = [A] + k^2 [B]$$

式(6)の k^2 を固有値解析し、伝播速度と波数 k の関係を求める。この伝播速度と周波数より分散曲線を作成する。

4. 解析モデル

数値シミュレーションには図1に示す3つのモデルを用いた。それぞれ1層厚、1層弾性係数、2層弾性係数を変化させている。

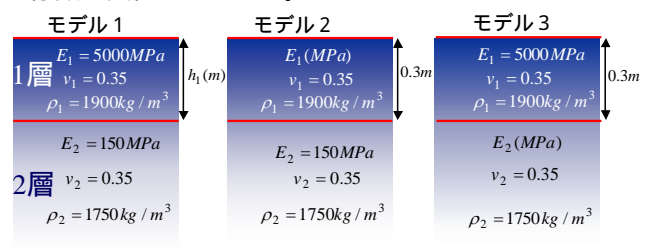


図1. 解析モデル

表1. 各モデルにおける変化パラメータ値

モデル1	h_1 (m)	0.05	0.15	0.30	0.45
モデル2	E_1 (MPa)	2500	5000	7500	10000
モデル3	E_2 (MPa)	150	300	450	600

キーワード：弾性波動 表面波 SASW 試験 分散曲線 層厚

連絡先：〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂 TEL：0492-96-5731 内線(2734)

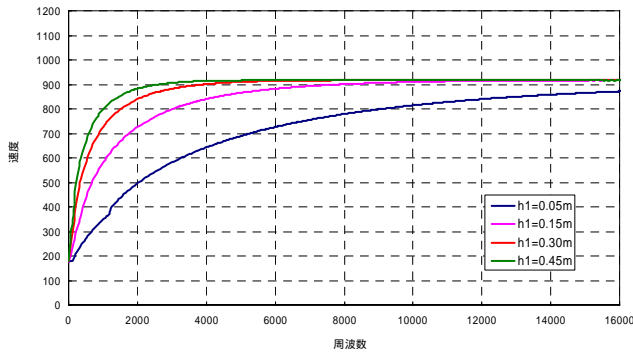


図2．分散曲線(モデル1)

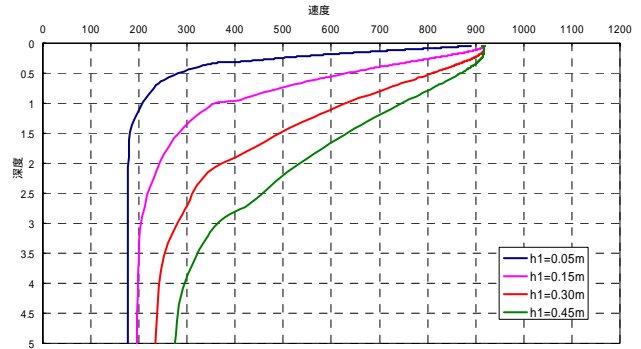


図3．速度と波長(モデル1)

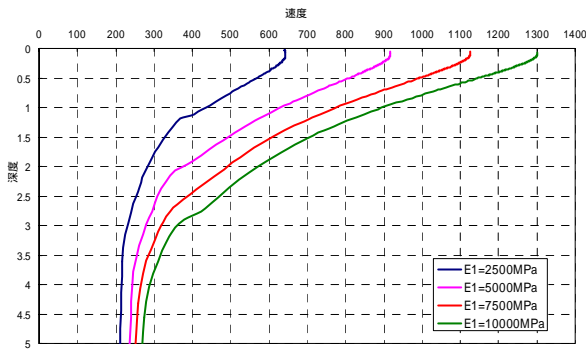


図4．速度と波長(モデル2)

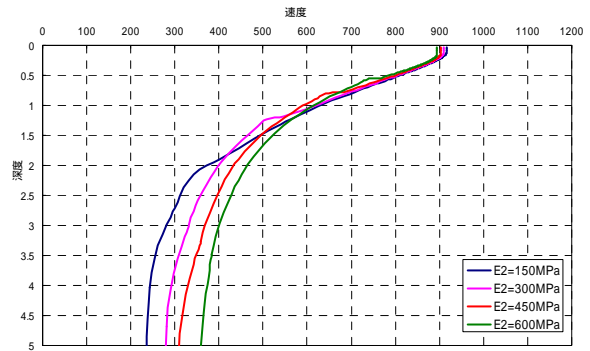


図5．速度と波長(モデル3)

5. シミュレーション結果

シミュレーションより得られたモデル1の分散曲線を図2に、各モデルの速度と波長の関係をそれぞれ図3、図4、図5に示す。図2より1層厚が厚いほど分散曲線は低周波部で1層のレイリー波速度に収束していく事が確認できる。また図4、図5より、各層の弾性係数を変化させた場合、収束する速度には違いが見られるが1層付近において速度と波長の関係はほぼ同じ勾配を持って1層のレイリー波速度に収束している。このことから速度と波長の関係において弾性係数は収束する速度の影響が大きく勾配にはあまり影響しない。

以上のことから1層厚と勾配の相関を求める。1層厚と勾配との関係を次式で表わす。

$$h_i = \alpha \phi_i \quad (7)$$

ここで h_i は1層厚、 ϕ_i は勾配

図3より各1層厚に対する勾配を読み取り、式(7)における α を最小二乗法により求める。最終的に α は

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i \times h_i}{\sum_{i=1}^n \phi_i^2} \quad (8)$$

となり $h_i = 107.737 \phi_i$ なる関係が導ける。

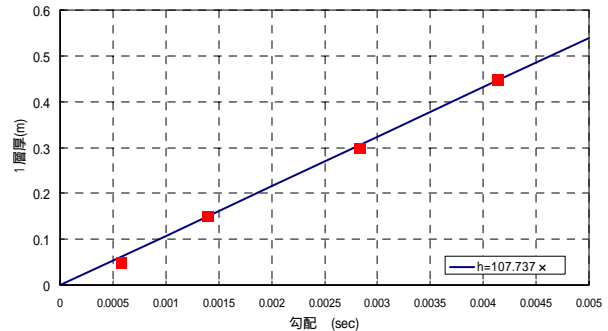


図6．1層厚と の関係

6. おわりに

- 1). 弾性係数は収束する速度にのみ関係し速度と波長の関係における勾配には影響を与えない。
- 2). 1層厚が同じであるなら弾性係数に依らず勾配は同じである。このことから1層厚と勾配には $h_i = 107.737 \phi_i$ なる関係が見出せる。

謝辞

本研究は運輸施設整備事業団基礎研究制度及び、科研費（課題番号：13650512）の支援を受けて行ったものである。ここに謝意を表する。

参考文献

Kausel.B.E ・ Rosset.J.M :STIFFNESS MATRICES FOR LAYERED SOILS ,Bullentin of the Seismological Society of America, Vol.71,pp.1743-1761,1981