

# 等価質点系モデルを用いた遮断溝の振動軽減効果 に関する数値解析

## NUMERICAL ANALYSIS ON SCREENING EFFECT AT AN OPEN TRENCH BY EQUIVALENT MASS SYSTEM MODEL

大 保 直 人\*・片 山 恒 雄\*\*

By Naoto OHBO and Tsuneo KATAYAMA

### 1. ま え が き

交通機関、建設工事および工場の機械等で発生した振動が周辺地域に伝わり、周辺住民や高精度機械に影響を与えた事例が報告され、このような振動の軽減の必要性が議論されている。空溝の有効性は古くから指摘されているが<sup>1),2)</sup>、その施工<sup>3)</sup>・保守・管理の問題、成層地盤中に設置された空溝（遮断溝）による透過波の伝播性状、遮断溝の振動軽減効果等に関しては、まだ多くの研究課題が残されている。

溝による振動軽減効果に関する実験的研究には、室内および野外によるものがある。前者には、超音波を用いたものが多く<sup>4)~6)</sup>、一部には光弾性による実験<sup>9)</sup>や実地盤をモデル化した研究<sup>10)</sup>もある。超音波を用いた実験は結果的に媒体を二次元の半無限弾性体と考えたことに相当するが、鈴木ら<sup>5)</sup>と吉井<sup>6)</sup>による結果がしばしば引用されており、透過波の伝播性状等も詳細に検討されている。

野外実験に基づくものとしては、起振機振源を用いた研究<sup>11)~13)</sup>、衝撃的な振源を用いた研究<sup>14),15)</sup>がある。遮断溝を深く掘ることは施工・保守・管理が問題となるため、溝を他の物質で充填させた遮断壁による振動軽減効果に関する研究も行われている<sup>15),16)</sup>。

遮断溝・壁による振動軽減に関する実験・研究の数に比べ、これらを実際に使用した施工例は少ない。この原因の一つとして、まだ十分に問題点が解明されていないことが挙げられよう。

著者らは、遮断溝による振動軽減効果を議論する場合、波動論的な考察が必要と考え、これまで弾性波の発生・伝播に関する計算法の比較・検討、盛土形状による波動特性の相違、空溝からの透過波の伝播性状と遮断効

果、および二層地盤での波動伝播に関する計算法などを報告してきた<sup>17)~22)</sup>。

本論文では、波動現象を扱う場合に有効な計算法を紹介し、これを遮断溝に応用して数値計算で得られた透過波形を波動論的に考察するとともに、振動軽減効果が遮断溝の位置、深さおよび振源の種類でどのように変化するかを検討した。

本論文は 6 章で構成されており、2., 3. では計算法の基本的な考え方と計算で用いた地盤と遮断溝モデルについて述べる。4. では、弾性波の基本的な伝播性状に関する知見を用いて計算法の妥当性を検証し、さらに 5. では遮断溝による振動軽減効果について述べる。最後に数値計算で得られた結果を簡単にまとめ、実際に遮断溝の設置を考える場合に、その効果を予測するために必要な情報や今後の課題について述べる。

### 2. 計算法の概要

二次元半無限弾性体の地表振源に原点をとり、地表を  $x$  軸、鉛直下方を  $z$  軸とし、 $x, z$  軸方向の変位成分をそれぞれ  $u, w$  とすると、運動方程式は

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \Delta + \mu \nabla^2 u \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \Delta + \mu \nabla^2 w \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで  $\Delta = \partial u / \partial x + \partial w / \partial z$ ,  $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial z^2$ ,  $\rho$  は密度、 $\lambda$  と  $\mu$  は Lamé の弾性定数である。

地表 ( $z=0$ ) でのせん断応力 ( $\tau_{xz}$ ) と垂直応力 ( $\sigma_{zz}$ ) は

$$\tau_{xz} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + (\lambda + \mu) \frac{\partial w}{\partial z}$$

で与えられ、地表面に外力として  $P(x, t)$  を作用させた場合、地表の境界条件式は  $\tau_{xz}=0$ ,  $\sigma_{zz}=P(x, t)$  と

\* 正会員 工修 東京大学助手 生産技術研究所

\*\* 正会員 Ph.D 東京大学教授 生産技術研究所

なる。これらの条件式と式 (1), (2) を差分表示すれば、波動伝播を数値計算で求めることができる。複雑な境界を扱う場合には、境界条件を評価するために付加的な仮定が必要となる<sup>23)</sup>。また、計算領域境界からの反射波の影響を取り除く方法はすでに提案されており、これを用いた計算例もある<sup>20)</sup>。

佐藤<sup>24)</sup>は、連続体である地盤を Fig. 1 に示すように

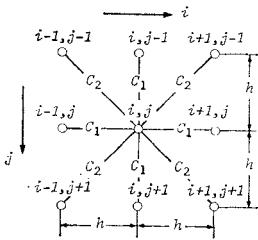


Fig. 1 Mass-Spring System.

質点を伸縮ばねで結合させた網目の力学モデルで置き換え、力のつり合いから求められた方程式を用いて弾性波の発生・伝播を解析する方法を提案している。

Fig. 1 の格子点 (i, j) の変位を (u<sub>i, j</sub>, w<sub>i, j</sub>), 質量を m, x および z 方向の格子点間隔を h, ばね定数を C<sub>1</sub>, 対角方向のばね定数 C<sub>2</sub> とすれば、格子点のつり合い方程式は

$$m \frac{d^2}{dt^2} u_{i,j} = C_1(u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}) + C_2(u_{i+1,j+1} + u_{i+1,j-1} + u_{i-1,j+1} + u_{i-1,j-1} - 4u_{i,j}) + C_2(w_{i+1,j+1} - w_{i+1,j-1} - w_{i-1,j+1} + w_{i-1,j-1}) \dots \dots \dots (3)$$

$$m \frac{d^2}{dt^2} w_{i,j} = C_1(w_{i,j+1} - 2w_{i,j} + w_{i,j-1}) + C_2(w_{i+1,j+1} + w_{i+1,j-1} + w_{i-1,j+1} + w_{i-1,j-1} - 4w_{i,j}) + C_2(u_{i+1,j+1} - u_{i+1,j-1} - u_{i-1,j+1} + u_{i-1,j-1}) \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで、C<sub>1</sub>=λ+μ, C<sub>2</sub>=μ, λ=μ (これはポアソン比 ν=0.25 に相当する) を仮定し、格子点間隔 h → 0 の極限をとると式 (3), (4) は式 (1), (2) に一致する。

自由表面の条件式は、j-1 の部分が存在しないためこの部分を存在する部分で補い、そのつり合いから求める。式 (3), (4) と自由表面のつり合い式から、波動伝播が数値的に求められ、その結果は差分法と一致する<sup>17)</sup>。

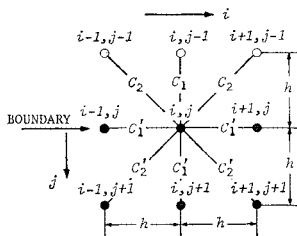


Fig. 2 Mass-Spring System at a Boundary.

一般に地盤は層構造をなすので、多層地盤にもこの計算法が拡張できるように改良する必要がある。このとき問題になる層境界を Fig. 2 のようにモデル化する。境界面を j にとり、上層の x と z

方向および対角方向の伸縮ばね定数をそれぞれ C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, 質点の質量を m とする。これらに対応する下層の量は C<sub>1</sub>', C<sub>2</sub>', m' で表わす。質点間隔は x, z 方向とも h とし、格子点 (i, j) に関する x, z 方向の力のつり合い方程式を求めると

$$m' \frac{d^2}{dt^2} u_{i,j} = C_1'(u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}) + C_2'\{(u_{i+1,j+1} + u_{i-1,j+1} - 2u_{i,j}) + (w_{i+1,j+1} - w_{i-1,j+1})\} + C_2\{(u_{i+1,j-1} + u_{i-1,j-1} - 2u_{i,j}) + (w_{i-1,j-1} - w_{i+1,j-1})\} \dots \dots \dots (5)$$

$$m' \frac{d^2}{dt^2} w_{i,j} = C_1'(w_{i,j+1} - w_{i,j}) + C_2'\{(w_{i+1,j+1} + w_{i-1,j+1} - 2w_{i,j}) + (u_{i+1,j+1} - u_{i-1,j+1})\} + C_1(w_{i,j-1} - w_{i,j}) + C_2\{(w_{i+1,j-1} + w_{i-1,j-1} - 2w_{i,j}) + (u_{i-1,j-1} - u_{i+1,j-1})\} \dots \dots \dots (6)$$

になる。ここで、C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>' および C<sub>2</sub>' は式 (3), (4) におけると同様に λ, μ で表わされるとし、λ=μ を仮定する。

境界面を式 (5), (6) で評価することにより、多層地盤での波動伝播を数値計算で求めることができる。本論文では、佐藤の提案した方法に式 (5), (6) を組み入れた計算法を等価質点系モデル法とよぶ。

### 3. モデルの概要

地盤モデルは半無限地盤と二層地盤で、それぞれの地盤に設けた遮断溝による振動軽減効果を等価質点系モデル法を用いた数値計算によって検討する。

半無限地盤と二層地盤の地盤定数、および遮断溝モデ

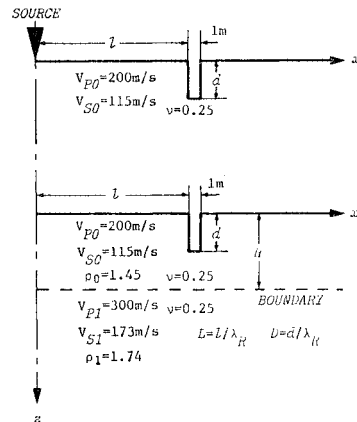


Fig. 3 Two-Dimensional Configuration of Half-Space and Two-Layered Trench Model.

ルの概要を Fig. 3 に示す. 地盤は水平を  $x$  軸, 鉛直下方を  $z$  軸とした二次元で,  $z$  軸に関しては対称である. 地盤は 1 m 間隔 ( $h=1$ ) で細分化し, 時間間隔は計算が不安定にならないように, 半無限地盤では  $\Delta t=0.00433$  秒, 二層地盤では  $\Delta t=0.003$  秒とした.

振源は, 一般に 1~3 波程度の波を発生させる衝撃的なもの (たとえば, ディーゼル・ハンマー, 交通振動) と正弦波を連続的に発生させる定常的なもの (たとえば, 起振機) に分類できる. 今回の検討例では, 衝撃型振源としては上下動単位振幅の正弦波一波を, 定常型振源としては上下動単位振幅の正弦波を連続的に作用させた. これら外力の数学的表現は

$$P(t, x) = F(t) \cdot G(x)$$

ただし

$$F(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft) & 0 \leq t \leq N/f \\ 0 & N/f < t \end{cases}$$

$$G(x) = \begin{cases} [1 + \cos(2\pi fx/V_{s0})]/2 & 0 \leq x \leq V_{s0}/2 \cdot f \\ 0 & V_{s0}/2 \cdot f < x \end{cases}$$

である. ここで,  $F(t)$ ,  $G(x)$  はそれぞれ時間, 空間分布関数,  $f$  は振動数,  $V_{s0}$  は表層の S 波速度である.  $N$  は正弦波の数で, 衝撃型振源では  $N=1$ , 定常型振源では  $N=20$  とした.

#### 4. 計算法の検証と弾性波の伝播性状

等価質点系モデル法による精度を論ずるために, 計算で得られた伝播パターンや振動波形を波線理論, モード解析などの理論的考察から推定される結果と比較する.

##### (1) 伝播パターン

振源からの波面の広がりがある瞬間に注目して表示したものを伝播パターンと定義する. 地表点振源から放射される弾性波の振幅分布は, 理論的に Miller<sup>25)</sup>, 音田<sup>26)</sup>により求められている.

半無限地盤, 二層地盤の地表に衝撃型外力が作用し, 約 0.3 秒経過したときの伝播パターンをそれぞれ Fig. 4, 5 に示す. これは各格子点の変位の大きさと振動方向をベクトル表示したもので, 振源位置での最大変位振幅の 1/30 より大きい振幅のみが示されている.

Fig. 4 の半無限地盤の例においては, P 波 ( $P_0$ ) と S 波 ( $S_0$ ) の波面はそれ

ぞれの弾性波速度から推定される位置に一致し, 表面波と実体波振幅の距離減衰 ( $r^{-0}$ ,  $r^{-1/2}$ ) は二次元媒質での理論値に一致する. 一方, Fig. 5 の表層厚  $H=4$  m の二層地盤に対する計算結果によれば, 下層では S 波 ( $S_1$ ) の波面のみが確認でき, この位置は弾性波速度から推定される位置に対応する. 表層内での波の反射・屈折の性状は, 伝播パターンのみからでは解釈できない. しかし, 地表面に垂直な方向を示している最大振幅は, 半無限地盤と同様レイリ波成分であることがわかる.

##### (2) 伝播波形

Fig. 6, 7 はそれぞれ半無限地盤, 表層厚  $H=4$  m の二層地盤の地表を伝播する上下動・水平動の振動変位波形を示したものである. 縦軸は任意スケールで, 各地点の上下動最大振幅で正規化されており, 同一地点の水平動波形との大小関係は比較できる. 顕著な P 波位相には上向き, レイリ波位相およびレイリ波群には下向きの矢印を付してある.

半無限地盤の地表で確認される位相は (Fig. 6 参照), P 波とレイリ波で, その位相速度はそれぞれ 200 m/s, 107 m/s であり, 地盤条件で与えられた値に一致し

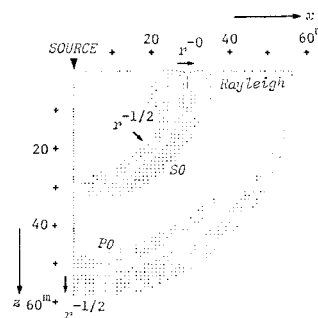


Fig. 4 Displacement Vector Field in Half-Space Model at  $t=0.3$  s.

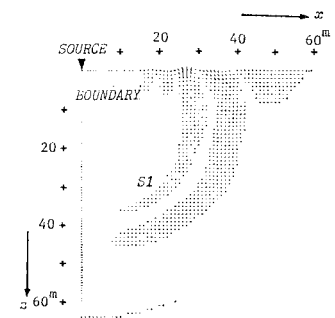


Fig. 5 Displacement Vector Field in Two-Layered Model at  $t=0.3$  s.

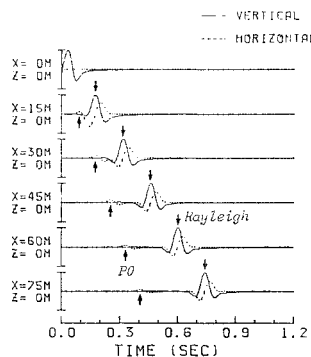


Fig. 6 Vertical and Horizontal Displacement Time Histories on the Surface of Half-Space Model.

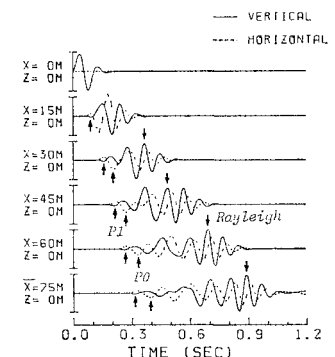


Fig. 7 Vertical and Horizontal Displacement Time Histories on the Surface of Two-Layered Model.

ている。

一方、二層地盤 (Fig. 7 参照) では、半無限地盤と同一の外力を作用させたにもかかわらず波形は複雑である。走時曲線を描いてみると屈折 (PI) および直接 (P0) の位相、さらに分散性レイリ波が確認できる。得られたレイリ波の位相速度 および 群速度は、文献 22) と同様、与えられた地盤条件で求まるレイリ波理論分散曲線の基本モードの値に一致している。

これらの数値計算の結果から、等価質点系モデル法が波動伝播を扱う計算に有効であると同時に、提案した境界面の評価法も妥当であることがわかる。

5. 遮断溝による振動軽減効果

遮断溝による振動軽減問題では、地表に沿って伝播するレイリ波の遮断が重要であり、その効果は溝の深さに大きく支配されるが、溝の位置・幅などの影響も無視できない。

遮断溝の問題を数値計算で検討した例はすでにいくつか報告されており<sup>27), 28)</sup>、遮断溝の幅が軽減効果に大きな影響を与えないという報告もある<sup>5), 29)</sup>。

ここでは、Fig. 3 に示した半無限地盤と表層厚  $H=4\text{ m}$  の二層地盤に幅 1 m の溝を設置したときの振動軽減効果を、等価質点系モデル法を用いて検討する。なお、振源から  $l\text{ m}$  の地点に深さ  $d\text{ m}$  の遮断溝を設置した場合、これらの量をレイリ波の波長 ( $\lambda_R$ ) で正規化した値 ( $L=l/\lambda_R$ ,  $D=d/\lambda_R$ , Fig. 3 参照) をパラメーターにとり、振動軽減効果を評価する量としては、透過率  $T=A_t/A_0$  を用いた。ここで、 $A_t$ ,  $A_0$  は同一地点における溝がある場合とない場合の最大振幅である。

(1) レイリ波の波長

半無限地盤を伝わるレイリ波の速度 ( $V_R$ ) は

$$\left\{ 1 + \left( \frac{V_R}{V_S} \right)^2 \right\} = 4 \left[ \left\{ 1 - \left( \frac{V_R}{V_P} \right)^2 \right\} \times \left\{ 1 - \left( \frac{V_R}{V_S} \right)^2 \right\} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

で一義的に決まる。

しかし、多層地盤になるとレイリ波は分散性を示し、その速度は波長が長くなると下層の S 波速度に、短くなると表層の S 波速度に近づくが、厳密には特性方程式を解いて求めなければならない<sup>30)</sup>。

実測される分散性表面波は、ほぼ極小群速度の振動数を中心としたわずかの範囲の成分波をもつと考えられ<sup>31)</sup>、ポアソン比  $\nu=0.25$  の二層地盤における基本モードのレイリ波の極小群速度を与える振動数は  $f_R = V_{P0}/4H$  で近似できる<sup>32)</sup>。

Fig. 3 の二層地盤で表層厚  $H$  を変化させ、それぞれの分散曲線を計算し、 $f_R$  に対する波長  $\lambda_R$  を求めた結果、これらの間に

$$\lambda_R \approx 2.5 H \dots\dots\dots (8)$$

の関係が得られた。以下の試算で対象とする二層地盤は  $H=4\text{ m}$  であるからレイリ波の波長は  $\lambda_R \approx 10\text{ m}$  と考えてよい。半無限地盤でのレイリ波の波長は二層地盤と同

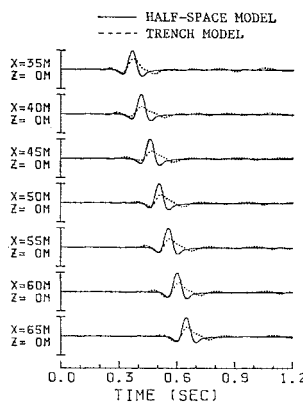


Fig. 8 Vertical Component of Displacement Time Histories on the Surface of Half-Space Model with and without Trench Excited by the Stationary Sinusoidal Source ( $N=1$ ,  $L=3$ ,  $D=0.4$ ).

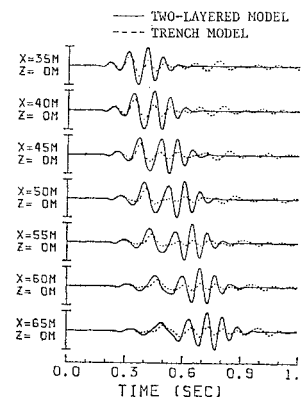


Fig. 10 Vertical Component of Displacement Time Histories on the Surface of Two-Layered Model with and without Trench Excited by the Stationary Sinusoidal Source ( $N=1$ ,  $H=4\text{ m}$ ,  $L=3$ ,  $D=0.4$ ).

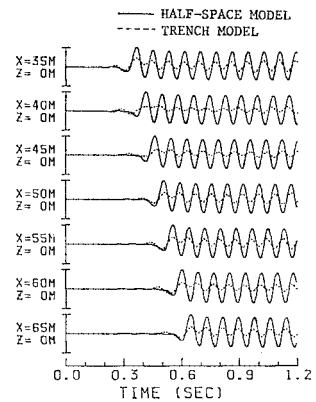


Fig. 9 Vertical Component of Displacement Time Histories on the Surface of Half-Space Model with and without Trench Excited by the Stationary Sinusoidal Source ( $N=20$ ,  $L=3$ ,  $D=0.4$ ).

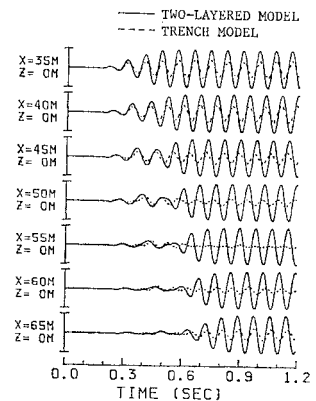


Fig. 11 Vertical Component of Displacement Time Histories on the Surface of Two-Layered Model with and without Trench Excited by the Stationary Sinusoidal Source ( $N=20$ ,  $H=4\text{ m}$ ,  $L=3$ ,  $D=0.4$ ).

様に  $\lambda_R \approx 10 \text{ m}$  である。

### (2) 透過波とその位相

**Fig. 8, 9** は半無限地盤の衝撃型、定常型振源から 35 m 以上離れた地点の上下動波形を、溝 ( $L=3, D=0.4$ ) のない場合とある場合で比較したものである。縦軸は任意スケールであるが、溝がないときの各地点の波形の最大振幅で正規化されているので、透過波の振幅は遮断溝による振動軽減効果を直接示している。

**Fig. 8** の衝撃型振源の場合では、溝を通過したレイリ波の位相は溝がない場合に一致しているが、その周期はやや長くなっている。これは溝底部を通過したレイリ波と溝壁面に沿って伝わったレイリ波の位相差がレイリ波の周期より小さいため、2つのレイリ波の干渉が発生しているためと考えられる<sup>8)</sup>。**Fig. 9** の定常型振源では、透過波の位相は溝がない場合に一致している。

二層地盤の結果を半無限地盤同様、それぞれ **Fig. 10, 11** に示す。

たとえば、**Fig. 10** の衝撃型振源に対する  $x=65 \text{ m}$  地点の波形は走時曲線によれば、0.6 秒以前の部分には実体波、0.6 秒以後の部分には表面波の成分が卓越しており、それぞれの位相は溝の有無に影響されていないことがわかる。さらに、透過波(点線)と溝がないとき(実線)の振幅を比較すると、実体波部分ではほぼ同じ振幅であるが、表面波部分では透過波の振幅がきわめて小さく、振動軽減効果は表面波部分で大きいことが認められる。

一方、**Fig. 11** の定常型振源では、 $x=35 \text{ m}$  地点を除くと、透過波の位相は溝がない場合に一致していない。さらに、透過波の振幅は地点によって変化がみられる。

**Fig. 9, 11** に示した定常型振源で得られた波形は、外力が作用した瞬間からの時刻歴を示したものであるが、起振機を用いた野外実験では、これらの図で 0.9 秒付近までの振動波形は通常測定されない部分であることに注意されたい。

### (3) 遮断溝の位置と振動軽減効果

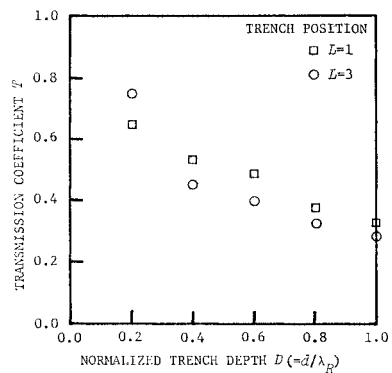
遮断溝を振源近くに設置した方が、振動軽減効果は大きくなるのが実験結果から報告されている<sup>21)</sup>。また、振動エネルギーが広範囲に広がっている箇所での対策は大規模になりがちなので、遮断溝の位置はできるだけ振源に近づけ振動エネルギーの広がりを防ぐのがよいという考えもある<sup>34)</sup>。これらの報告では、溝底部および側方からの影響は考慮されていないが、溝底部および側方からの回折波(転化波)が溝の位置でどのように変化するかも重要な問題である。

溝底部からの転化波は水平成分に大きく寄与し、遮断溝が振源に近いほど転化波の振幅は大きくなり、軽減効果は期待できないという結果が得られている<sup>21)</sup>。野外実験でも水平成分に軽減効果が得られなかった例<sup>12)</sup>が報告されているが、その原因は明らかにされていない。

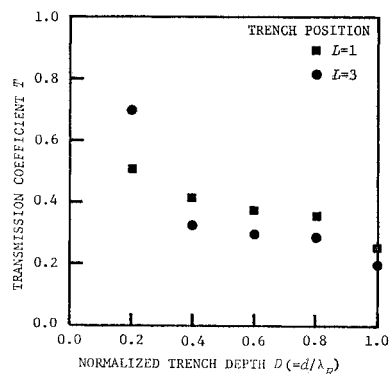
二層地盤で衝撃型、定常型振源を用い、遮断溝を  $L=1, 3$  とその位置を変化させた場合、振動軽減効果が溝の深さでどのように変化するかを示したのが **Fig. 12, 13** である。透過率としては溝後方 5 m から 60 m までの 5 m 間隔の地点で得られた上下動の値の平均値を用いている。

溝の深さによる透過率の変化は、振源の種類、溝の位置で異なる(**Fig. 12, 13** 参照)が、溝の位置と振動軽減効果の関係は、振源の種類に関係なく一定の傾向を示している。

溝が表層厚より浅い ( $D < 0.4$ ) 場合、溝は振源近く



**Fig. 12** Effect of Trench Position and Normalized Trench Depth on Transmission Coefficient for Two-Layered Model to the Single Sinusoidal Source ( $N=1, H=4 \text{ m}$ ).



**Fig. 13** Effect of Trench Position and Normalized Trench Depth on Transmission Coefficient for Two-Layered Model to the Stationary Sinusoidal Source ( $N=20, H=4 \text{ m}$ ).

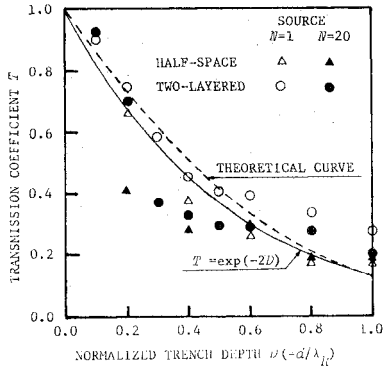


Fig. 14 Relation between Transmission Coefficient and Normalized Trench Depth.

に設置した ( $L=1$ ) 方が効果は大きいようである。この傾向は、レイリ波の分散を波線理論から検討した結果から考察すると<sup>35)</sup>、振源近くに遮断溝を設けた方がレイリ波の分散に必要なエネルギーを遮断しやすいと考えると定性的に説明できる。一方、溝の深さが表層厚以上になると ( $D \geq 0.4$ )、溝を振源から離れた ( $L=3$ ) 方が効果は大きい。これは、透過波の振幅が溝底部に入射した実体波の振幅値に影響されるものと考えて定性的に説明することができる。

#### (4) 溝の深さによる振動軽減効果

Fig. 14 は半無限地盤と二層地盤の  $L=3$  の地点に幅 1 m の溝を設置した場合について、溝の深さと上下動の透過率の関係を振源別に示したものである。点線は半無限地盤中の遮断溝に垂直にレイリ波が入射したとき、溝底部より下の地盤を通過するレイリ波のエネルギーをもとに計算した透過率を示す<sup>36)</sup>。

半無限地盤では、溝の深さが  $D \leq 0.4$  では定常型振源が小さな透過率を示すが、これより溝が深くなると振源の種類による透過率の変化は小さくなる。一方、二層地盤では溝の深さが  $D \geq 0.3$  になると定常型振源の方が透過率は小さいが、 $D < 0.3$  では透過率の振源による変化は小さい。全体的な傾向としては、定常型振源の透過率が小さく、振源の違いによる効果の差は無視できない。

従来の中には、透過率と溝の深さの関係式を提案した例もある<sup>9), 10)</sup>。これらの式が実際問題でどの程度信頼性があるかに問題は残るが、対策を考える場合の目安としては重要であろう。著者が半無限弾性体の数値計算結果から求めた関係式を Fig. 14 に実線で示した<sup>36)</sup>。二層地盤での衝撃型振源の結果もこの関係式でほぼ近似できるが、定常型振源に関しては、あまりよい近似を示していない。

## 6. まとめ

波動現象を扱う問題に有効な計算法（等価質点系モデル法）を紹介し、この計算法を用いて半無限地盤と二層地盤に遮断溝を設けた場合の透過波の伝播性および振動軽減効果に関する数値計算を実施して以下の結果を得た。

(1) 半無限地盤の波動伝播の解析に有効な佐藤の提案した計算法<sup>24)</sup>を、多層地盤にも適用できるように境界面の評価法を提案した。この評価法を佐藤の計算法に組み入れた計算法（等価質点系モデル法）を二層地盤に応用した結果、境界面の評価法と等価質点系モデル法の有効性が確かめられた。

(2) 限られた試算例からではあるが、振源の種類、遮断溝の位置および深さを变化させたときの遮断溝による振動軽減効果を定量的に把握することができた。

(3) 二層地盤における遮断溝の振動軽減効果は、遮断溝の位置で異なり、溝が表層厚より浅い場合には溝を振源近くに設けた方が軽減効果は大きく、溝が表層厚より深い場合には溝を振源から離れた方が軽減効果は大きい。この結果は波線理論で定性的に説明できる。

(4) 二次元モデルを扱ったため溝側方からの回折波の影響は考慮されていないが、試算結果から、溝の深さと振動軽減効果の関係を簡単な経験式で表わすことの可能性が示唆された。

(5) 数値計算結果の考察から、遮断溝による振動軽減効果を予測するとき重要となる要素は、

- i) 外力の種類とその振動数特性
- ii) 周辺地盤の構造と地盤定数
- iii) 卓越すると予想される表面波の波長

などであり、中でも iii) の情報が特に重要であると考えられる。

今回の検討結果で仮定した地盤条件はきわめて単純にモデル化されたものであり、実際問題への適用を考える場合には、より現実的なモデルを用いた系統的な解析が必要である。なお、著者は、本論文で示したような各種の波動伝播解析の結果をグラフィック・ディスプレイに表示し、動く映像としてビデオ録画することによって、波動現象の本質的理解を容易にするとともに、数値解析結果を解釈するための有力な一助とすることを考え、各種ソフトウェアを開発している。この内容については、その性質上、本論文では触れていない。

謝 辞：本研究を行うにあたり東京大学名誉教授（現埼玉大学工学部教授）久保慶三郎博士、鹿児島大学理学部教授 佐藤泰夫博士、および群馬大学工学部助教

授 音田 功博士から数々の有益なご助言をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。なお、本研究は昭和56年度科学研究費補助金(奨励研究(A))の補助を受けた。また、数値計算には東京大学大型計算機センター HITAC M 200 H を使用した。

#### 参 考 文 献

- 1) Terada, T. and C. Tsuboi : Experimental Studies on Elastic Waves Part 1, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., Vol. 3, 1927.
- 2) Tsuboi, C. : Experimental Studies on Elastic Waves Part 2, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., Vol. 4, 1928.
- 3) 労働安全衛生規則, 第6章掘削作業等における危険の防止, 労働省令, 昭和52年3月改正.
- 4) Suzuki, Z. and A. Ishigaki : On Converted Waves by a Narrow Canal on the Surface of a Semi-Infinite Elastic Medium, Sci. Rep., Tôhoku Univ., Ser. 5, Vol. 10, 1958.
- 5) 鈴木次郎・石垣 昂 : 衝撃波の最大振幅が色々な溝によって減少する度合について, 地震, 第11巻, 第2号, 1959年.
- 6) 吉井敏尙 : 溝によるレイリー波の減衰, 地震, 第24巻, 第1号, 1971年.
- 7) 藤井和成・中山善律・今井健二・中野正吉 : 溝を通過するレイリー波群について(I), 地震, 第33巻, 第1号, 1980年.
- 8) 藤井和成・滝本孝哉・中山善律・中野正吉 : 溝を通過するレイリー波群について(II), 地震, 第33巻, 第1号, 1980年.
- 9) Dally, J.W. : Dynamic Photoelastic Studies of Stress Wave Propagation, Modern Problems in Elastic Wave Propagation, A Wiley-Interscience Publication, 1977.
- 10) 江島 淳 : 新幹線鉄道の桁式高架橋における地盤振動軽減対策のための基礎的研究, 東京大学学位論文, 1981年.
- 11) 後藤勝志・若林 進 : 地盤振動の溝による振動軽減効果について, 第32回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第I部, 1977.
- 12) 岩崎敏男・若林 進・後藤勝志 : 道路交通振動の軽減対策実験, 土木技術資料, 第21巻, 第1号, 1979.
- 13) Woods, R.D. : Screening of Surface Waves in Soils, J. Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE, Vol. 94, 1968.
- 14) Koyanagi, T. : Experimental Study on Surface Wave Propagation Along the Surface of the Medium with Trench, Thesis of Hokkaido Univ., 1978.
- 15) 東京都道路交通振動防止対策委員会 : 道路交通振動防止対策についての報告, 東京都建設局, 1977.
- 16) 斎藤二郎・小出忠男・木村 董 : 地盤振動と対策について(その4)—複合防振壁の振動しゃ断効果に関する検討, 大林組技術研究所報, No. 21, 1980年.
- 17) 大保直人・片山恒雄 : 弾性波の発生・伝播に関する計算手法の比較, 生産研究, 第32巻, 第12号, 1980年.
- 18) 片山恒雄・大保直人 : 道路交通で発生する地盤振動の特性, 自動車技術, 第34巻, 第12号, 1980年.
- 19) 大保直人・片山恒雄 : 盛土上で与えられた外乱による振動伝播の波動論的考察, 生産研究, 第33巻, 第2号, 1981年.
- 20) 大保直人・片山恒雄 : 溝を介して伝播する弾性波動の性質, 生産研究, 第33巻, 第3号, 1981年.
- 21) 大保直人・片山恒雄 : 溝による弾性波動の遮断効果, 生産研究, 第33巻, 第5号, 1981年.
- 22) 大保直人・片山恒雄 : 二層地盤内の波動伝播性状に関する数値実験例, 生産研究, 第34巻, 第4号, 1982年.
- 23) Alterman, Z.S. and A. Rotenberg : Seismic Waves in a Quarter Plane, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 59, 1969.
- 24) Satô, Y. : Characteristic Oscillation of Rectangular Elastic Body by the Simulation Using a Framework Model, J. Phys. Earth., Vol. 26, 1978.
- 25) Miller, G.F. and Pursey, H. : The Field and Radiation Impedance of Mechanical Radiators on the Free Surface of Semi-Infinite Isotropic Solid, Proc. Royal Society, London, A, Vol. 223, 1954.
- 26) Onda, I. : Effect of Poisson's Ratio on Elastic Wave Radiation in a Semi-Infinite Medium, J. Phys. Earth. Vol. 30, 1982.
- 27) 内藤和章・木村 董・藤原紀夫・小出忠男 : 有限要素法による地中防振壁の解析, 大林組技術研究所報, No. 12, 1976.
- 28) Fuyuki, M. and Y. Matsumoto : Finite Difference Analysis of Rayleigh Wave Scattering at a Trench, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 70, No. 6, 1980.
- 29) 大保直人 : 空溝の振動遮断効果に関する一考察, 第37回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第I部, 1982年.
- 30) Haskel, N.A. : The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 43, No. 1, 1943.
- 31) Okada, H. : Analyses of Seismic Waves Generated by Small Explosions-Experiment at Wakino-machi, Niigata Prefecture—(continued), J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Vol. VII, No. 2, 1963.
- 32) 岡田 広 : 分散性レーレー波の変位と周期との関係, 地震, 第18巻, 第4号, 1965.
- 33) 芹沢富雄・中野新一 : 建設機械の騒音と地盤振動の実態と2, 3の対策, 建設省土木研究所資料, 第867号, 昭和48年7月.
- 34) 木村 董・小出忠男 : 地盤振動の遮断工法, 土と基礎, 第27巻, 第8号, 1979年.
- 35) Tolstoy, I. and E. Usdin : Dispersive Properties of Stratified Elastic and Liquid Media, Geophys., Vol. 18, 1953.
- 36) Ohbo, N. and T. Katayama : A Numerical Experiment on Screening of Surface Wave at an Open Trench, Bull. Earthq. Resis. Struc. Res. Center, No. 15, 1982.

(1982.9.6・受付)