

溝を介して伝播する弾性波動の性質

Elastic Wave Propagation in Elastic Medium with a Trench

大保直人*・片山恒雄*

Naoto OHBO and Tsuneo KATAYAMA

1. ま え が き

道路交通振動が社会問題となるにつれて、これを軽減する方策が議論されるようになり、いろいろな試みが行われている。軽減法としては、振動の伝播経路の途中に空溝を設けて、伝播を遮断するのが有効であることは周知の事実であろう。しかし、実際となると、施工・保守・管理等の問題を含め、未解決の部分が多く残されている。

溝による振動遮断に関する研究は寺田・坪井^{1),2)}によるものが最初であろう。かれらは高精度機械をそなえた研究所・工場等を鉄道・自動車等で発生し伝播してくる振動から遮断する方法として溝の効果に注目した。その後、この問題は多数の研究者によって扱われ、主に室内実験結果³⁾から、溝での振動遮断効果は溝の深さと主要伝播波動（主にレイリ波）の波長の比に関係することが明らかにされている。この方法を道路交通振動の遮断問題に適用するにあたっては、溝へ入射する波動が複雑であること、振動源と溝の距離が対象波動の波長と同オーダーであることなどについて、十分な注意が必要であろう。

本報では、半無限弾性体の地表面にある上下動方向の単一振動源から発生・伝播した弾性波動が溝でどのように遮断され、さらに伝播・透過するかを数値実験から明らかにした。

2. 数値実験モデルの概要

道路交通振動の軽減法として溝を用いる場合、溝と振動源との距離は表面波の波長とはほぼ同程度になる可能性が高いが、このように振動源近くに存在する溝での遮断・伝播の問題はまだ不明な点が多い。

本報告の数値実験では、既往の室内実験結果との対応を考えながら溝の位置を変化させている。

対象とする溝のモデルと地盤の諸元を図1に示す。入力は一自動車走行時に後輪で発生する波形に近似させ、単位振幅の正弦1波とした。図1には、計算で用いた諸量も示してある。計算モデルは2次元モデルで、振動源に対して軸対称である。すなわち、振動源も溝も線状に無限に存在していることになり、溝の側方からの回折は

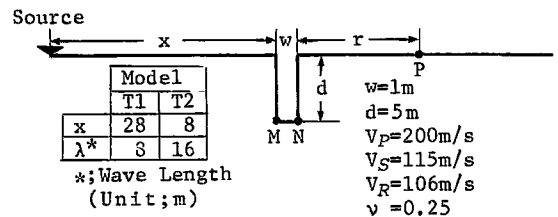


図1 計算モデルの概要

考えなくてよい。また、地表面を伝播するレイリ波には幾何減衰がなく、内部減衰も考慮していない⁴⁾

溝の位置(x)とレイリ波の波長(λ)との比(x/λ)をもとに、従来の室内実験で扱われているものに近いモデルをT1($x/\lambda=3.5$)、溝が振動源の近くにあるモデルをT2($x/\lambda=0.5$)とした。

3. 位相特性

振動源で発生した弾性波動が地表面でP波とレイリ波に分離され、かつ主要動がレイリ波の性状を十分に備えるためには、振動源からレイリ波の波長の少なくとも2倍以上離れる必要がある⁵⁾したがって、溝に入射する波動の性状は振動源から溝までの距離と伝播波動の波長の関係により大きく異なる点に注意する必要がある。

振動源と溝との距離が十分離れている(5波長以上)ときの溝後方への転化・透過波の位相特性については、かなりの成果が得られている⁶⁾しかし、溝が振動源近く(2波長以内)に存在する場合の転化・透過の問題は十分に検討されているとは言えず、たとえば、振動源からレイリ波の半波長の距離に存在する溝での遮断効果を数値実験で求めた結果によると、水平動成分に特異な性状がみられると報告されている⁷⁾

ここでは、溝の位置と転化・透過波の性状を上下動・水平動成分について詳細に検討した。

3.1 波形からの検討

溝での遮断では、溝を通過した波形の最大振幅の大きさが重要な量である。しかし、各種弾性波は伝播速度が異なるため、波形にはしばしば位相の交差が生じ、振幅が大きくなったり、小さくなったりする。

溝の後方1mから31mまで、5m間隔の上下動・水平

* 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

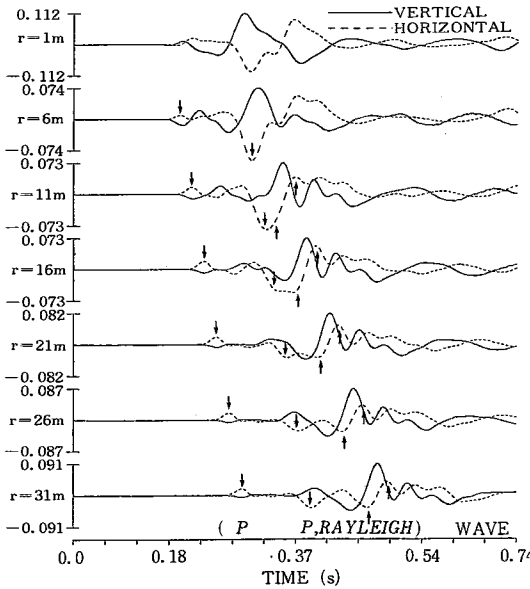


図2 モデルT1の計算波形

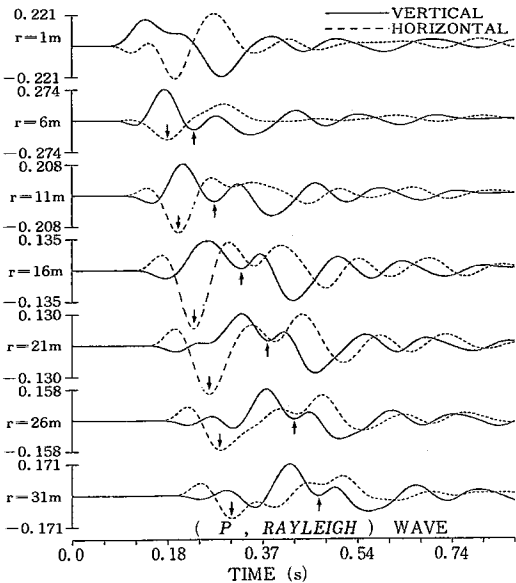


図3 モデルT2の計算波形

動成分の計算波形を、モデルT1については図2に、また、モデルT2については図3に示す。縦軸には振動源での上下動最大振幅値を単位にしたときの各地点での上下動最大振幅の大きさが示されている。また、P波・レイリ波の概略位相に矢印を付してある。

P波とレイリ波の位相は両モデルに共通して存在し、モデルによる位相の違いは、P波位相の数にある。波形の周期は溝に入射する波長を変化させるために異なり、

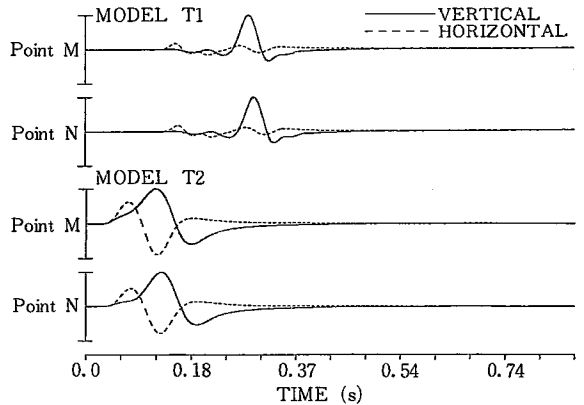


図4 溝底部に入射する波形

波形形状の違いは単純には比較できない。一方山あるいは谷の最大振幅は、モデルT2の水平動成分の谷のみがP波位相上にある、その他はすべてレイリ波位相上にある。r=1mでの位相と振幅は複雑な性状を示す。図2および図3にみられる性状の違いは溝に入射する波動が原因と考えられる。

二つのモデルの溝底部の点(M, N)に対する半無限弾性体内の位置で得られる計算波形を図4に示す。振幅の大きさは任意になっているが、最大振幅を示すのはそれぞれレイリ波、SV波であることは走時および振動軌跡から確かめられる。そこで、溝がある場合には、底部の2点M, Nから、これらの振動を波源とする波が放射されるとみなすと、モデルT1ではレイリ波、モデルT2ではP波動的な性状をもつ波が卓越するであろう。

3.2 走時図からの検討

上下動・水平動成分波形の顕著な山・谷の走時を読み取り位相と振幅の特徴を解明した。図5, 6はモデルT1, 図7, 8はモデルT2の上下動・水平動成分の山・谷走時図を示す。山と谷の最大振幅の走時はそれぞれの記号を丸く囲んで示してある。

モデルT1; 計算波形(図2参照)および走時図によると二つのP波とレイリ波の位相がある。最初のP波は直接P波であり、その後のP波とレイリ波は、溝に入射したレイリ波からの転化波(Converted Waves)に相当し、室内実験結果と一致している。⁹⁾山と谷の最大振幅はほぼレイリ波の位相上にあるが、溝の近傍ではややレイリ波の位相からずれている。上下動・水平動成分とも同様な性状を示している。

モデルT2; 計算波形(図3参照)では明確でなかったが、上下動・水平動成分ともP波とレイリ波の位相がみられる。モデルT1とはP波位相の数が少ないが、これは溝底部に入射した波が単一であるのが原因であり、それぞれの位相はSV波からの転化波に相当する。ところ

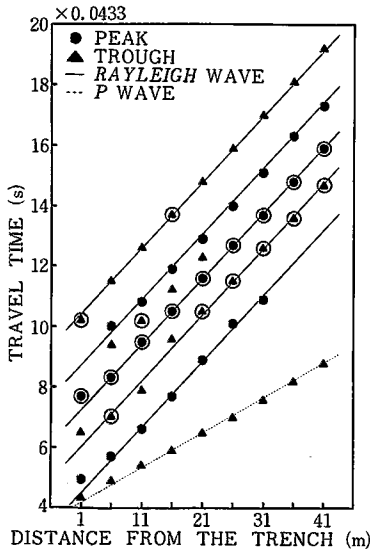


図 5 上下動走時図 (モデルT1)

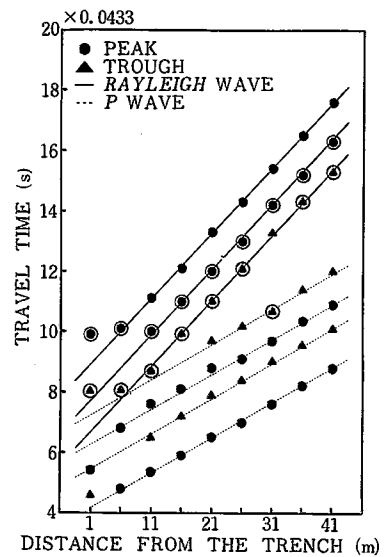


図 6 水平動走時図 (モデルT1)

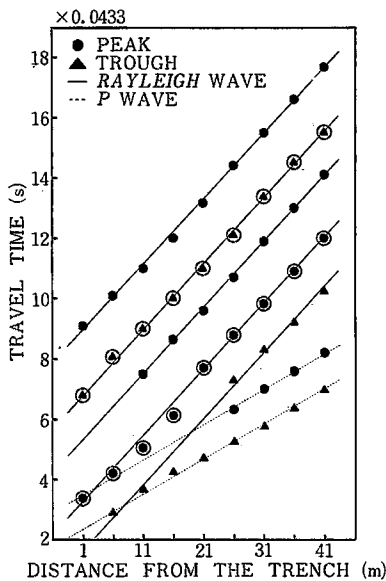


図 7 上下動走時図 (モデルT2)

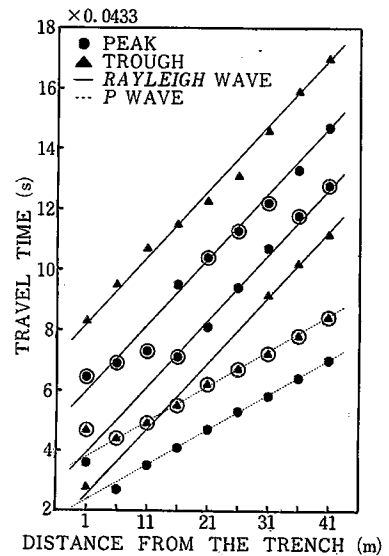


図 8 水平動走時図 (モデルT2)

で、山と谷の最大振幅で水平動成分の谷はP波位相上にあり、これを除くと他はすべてレイリ波位相上に存在している。

つまり、溝に入射する波動により、転化・透過波の性状は大きく異なる。特に、モデルT2の位相・振幅特性は特徴的であるが、これは溝底部に入射した波動を地中振動源とみなすことで定性的には説明できる⁷⁾したがって、溝の位置で転化・透過波の位相・振幅特性は異なった性状を示し、溝の位置には十分注意する必要がある。

4. 遮断効果

転化・透過波の振幅の距離変化および溝の位置と遮断効果との関係について検討する。

図9はモデルT1の上下動・水平動成分の同一位相の山、図10はモデルT2の上下動・水平動成分の谷の最大振幅の距離変化をそれぞれ示す。モデルT1の上下動・水平動成分およびモデルT2の上下動成分はレイリ波、モデルT2の水平動成分はP波の位相に相当する。なお、振幅の大きさは計算で得られた値を用いている。

研究速報

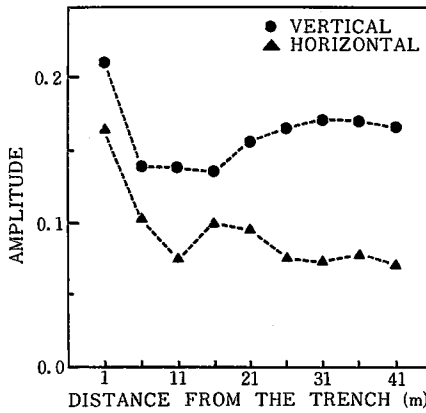


図9 山の振幅の距離変化(モデルT1: $x/\lambda = 3.5$)

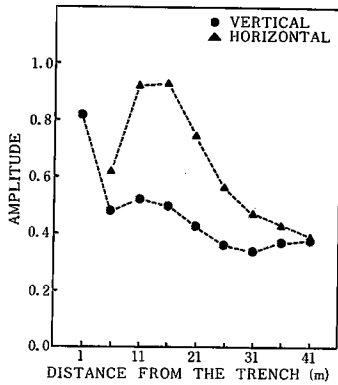


図10 谷の振幅の距離変化(モデルT2: $x/\lambda = 0.5$)

レイリ波の振幅は溝近傍を除くと、多少バラツキはあるが、ほぼ一定の値であり2次元でのレイリ波の距離変化に一致している。一方、P波の振幅は溝から11mまでの地点を除くと距離とともに減衰し、実体波の距離減衰の性状を示す。溝から6m地点で振幅が小さいのは、レイリ波位相との重なり(図8参照)が原因であり、この影響が11mまで及んでいると考えられる。

図11は二つのモデルの上下動・水平動成分の最大振幅から求めた透過率(溝がある場合の振幅とない場合の振幅の比)の距離変化を示す。

モデルT1は両成分ともほぼ一定値を示し、溝での遮断効果が認められ、さらに成分ごとの違いもあまりない。モデルT2の上下動成分の透過率は距離により変動はあるが常に1より小さいが、水平動成分は特に溝より21mまでは透過率が1より大きく、溝での遮断効果が期待できそうもないことを示している。

5. あとがき

空溝がある場合の転化・透過波動の位相特性と遮断効果に対する振動源と溝の距離の影響を数値実験から明らかにした。

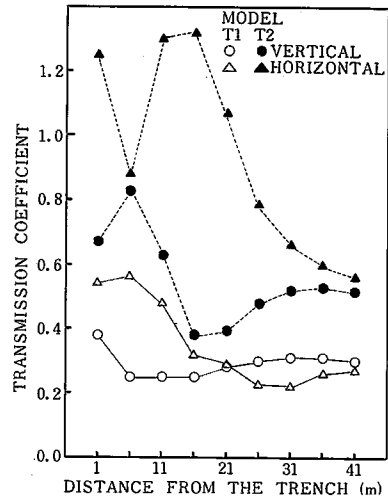


図11 透過率

得られた結果をまとめると以下ようになる。

- i) 溝が振動源から離れて存在する場合($x/\lambda = 3.5$), 上下動・水平動成分の透過特性はともに室内実験結果と矛盾しない。
- ii) 溝が振動源の近くに存在する場合($x/\lambda = 0.5$), 上下動成分には遮断効果は期待できるが、水平動成分は溝から十分に離れないと遮断効果は期待できない。
- iii) i), ii)の基本的な相違は溝に入射する波動成分にあり、詳細についてははまだ十分に検討する必要がある。今後、溝の深さ、入射波の波長等を変化させた各種の数値実験を行い、遮断効果の定式化を考えている。

(1980年12月26日受理)

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, 9~20
- 3) 例えば、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, Vol. 11, 1959, 130~156
- 4) 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, Vol. 32, No. 12, 1980, 598~601
- 5) 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, Vol. 34, No. 12, 1980, 1224~1230
- 6) Suzuki, Z. and A. Ishigaki, On Converted Waves by a Narrow Canal on the Surface of a Semi-Infinite Elastic Medium, Sci. Rep., Tohoku Univ., Ser. 5, Vol. 10, 1958, 71~79
- 7) 佐藤泰夫, 弾性波動論, 岩波書店, 1978