

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

Propagation of Elastic Waves Generated from a Source on Embankment

大保直人*・片山恒雄*
Naoto OHBO and Tsuneo KATAYAMA

1. ま え が き

盛土道路で発生した道路交通振動は、盛土道路の幾何学的な形状、盛土およびその周辺地盤の土質・地盤条件等に影響され複雑であり、周辺地盤への伝播および振幅特性にはまだ不明な点が多い。

ところで、盛土道路で法肩および法尻を部分的に取り上げてみると、いわゆる角(Corner)をなしている。角での波動伝播に関する理論¹⁾および室内実験²⁾の研究は数多くある。これらの研究結果をそのまま盛土道路の波動伝播問題には適用できないが、興味ある研究ではある。

本報では、盛土道路を単純化したモデルの数値実験結果をもとに、盛土道路を法肩の角度で分類したときの盛土周辺地盤の振幅特性、盛土道路で発生した振動の盛土内および周辺地盤への伝播特性を明らかにした。

2. 盛土道路モデルの概要

道路交通振動は路面に加えられた動的外力によって発生した振動が地盤を媒体として、周辺に拡がった振動現象であり、本質的には弾性波動の伝播現象である。つまり、実際の盛土道路では盛土および周辺地盤は成層構造をなし、その境界面で反射・屈折をくり返しながら波動が伝播するため、複雑な振動波形になると考えられる。そこで、盛土も地盤も同じ均一な弾性体と仮定し、盛土形状の違いによる弾性波の基本的な伝播・振幅特性を明らかにする。

対象とする盛土モデルと地盤の諸元を図1に示す。入力は単一自動車走行の後輪で発生する波形に近似させ、単位振幅で周波数15 Hzの正弦波1波とした。地盤は振動源に関し軸対称とし、1 m間隔の網目で細分化して数値計算を行った^{3),4)}。計算モデルは2次元で、線状の加振による波動の伝播を扱っているため発生した表面波の幾何減衰は考えなくてよい。なお地盤での内部減衰は考えていない。盛土斜面の取り扱いには重要な問題の一つであるが、本計算では単純な階段で近似させた。ところで、発生した弾性波の波長はそれぞれの波動で異なるが、地表面を伝播するレイリ波の波長はほぼ9 mである。

以下の検討では、盛土を考えた場合の計算結果を、地表面が水平な半無限弾性体の計算と比較して議論する。

3. 盛土周辺地盤の振幅特性

盛土周辺地盤に伝播した振動波形の振幅値の大きさを、定量的に評価することは、道路交通振動の予測では重要な問題である。しかし、実際の盛土道路で発生した振動は法肩部そして法尻部で複雑な伝播を示し、定量的に振幅特性を明らかにすることは困難であろう。ここでは、図1の盛土モデルについての数値計算の結果をもとに盛土周辺地盤の振幅特性を明らかにした。

図2、3は振動源の上下動波形の最大振幅値を単位とし、振動源から10 m間隔の水平距離で求めた上下動・水平動成分の振幅の距離変化のようすを示す。これらの

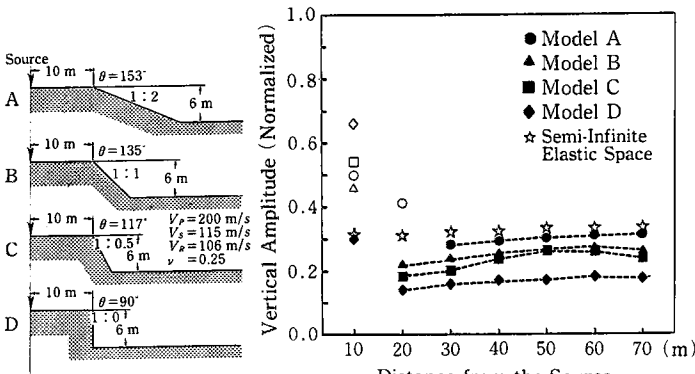


図1 盛土道路地盤モデル

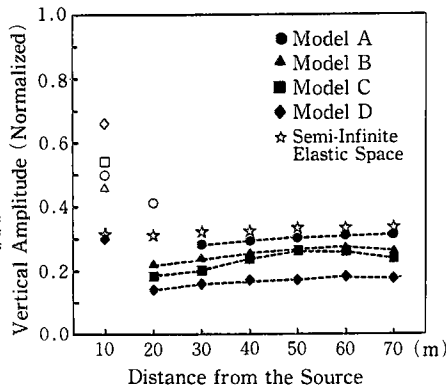


図2 上下動振幅特性

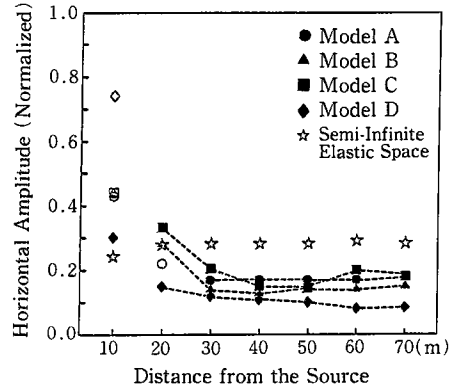


図3 水平動振幅特性

*東京大学生産技術研究所 第5部

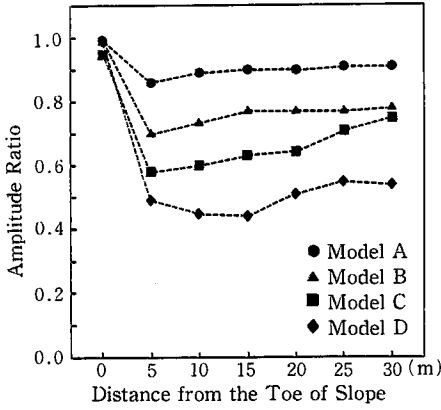


図4 法尻以遠の上下動振幅特性

図で盛土モデルごとに記号が異なるが、白ヌキは盛土道路の盛土部に相当する場所での振幅値を、星印は半無限弾性体の平面地盤で得られた振幅値を示す。上下動成分の盛土周辺地盤の振幅は水平距離が20mより大きな地点ではモデルごとにほぼ一定の値を示し、盛土別の振動特性がみられる。一方、水平動成分では、特にモデルCの振幅は距離によってかなり変化し上下動とは異なった振動特性がみられる。図4は法尻部を基準にし、そこから5m間隔で30mまでの上下動成分の振幅値を半無限弾性体の振幅値で割った値を示す。法尻部では盛土モデルによる違いは小さいが、法尻から離れるとモデルごとにほぼ一定の値となる。これは盛土モデルの振幅特性を示すものと考えられる。

ところで、盛土道路を分類する場合、その代表値とする変数は盛土形状を十分に表現する量でなければならない。レイリ波入射の角の問題ではふつう角の角度を変数に用いて整理されている。そこで、法肩部の角度(θ)を用い、これと図4での法尻から5~30mまでの振幅値の

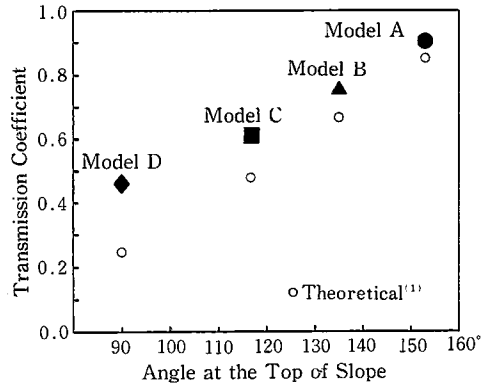


図5 法尻の角度と振幅比の関係

平均値との関係を図5に示した。この図で白マルは、角の問題での透過係数の近似計算での理論値を示している。これと盛土の振幅値にひらきはあがるが、振幅値の変化の傾向は似ている。つまり、法尻の角度で盛土形状を分類し、これに、たとえば表面波の波長と盛土の高さ、あるいは幅等の変数を用いて整理すれば、より有効な振幅特性が求められよう。

4. 伝播特性

盛土上の振動源で発生した弾性波動の伝播特性を、盛土内と法尻から周辺地盤に分け、それぞれの部分について検討してみた。解析の対象は盛土内ではモデルAとC、法尻から周辺地盤ではモデルBとした。

4-1 盛土内での伝播 盛土内での伝播は斜面へ入射する波動の種類と入射角に大きく支配される。斜面は地表面境界であり、これに入射するP波・SV波に対する反射エネルギーの大きさは理論的に求められている⁵⁾ その結果を図6, 7に示す。また、入射P波に対する反射SV波、そして入射SV波に対する反射P波の反射角はそれぞれ

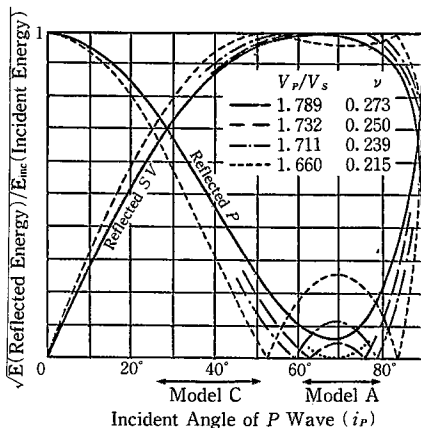


図6 入射P波に対する反射特性⁵⁾

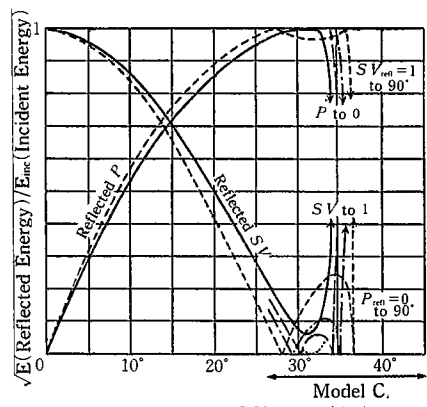


図7 入射SV波に対する反射特性⁵⁾

研究速報

$$i_{SV}' = \sin^{-1}(\sin i_P / \sqrt{3}) \quad (1)$$

$$i_P' = \sin^{-1}(\sqrt{3} \cdot \sin i_{SV}) \quad (2)$$

で求まる。ここで、 i_P 、 i_{SV} および i_P' 、 i_{SV}' はそれぞれ P 波・ SV 波の入射角および反射角、 E_{inc} は入射エネルギー、 E は反射エネルギーを示す。モデル A と C の斜面への入射角はそれぞれ $63 \sim 79$ 度、 $27 \sim 51$ 度であり、図 6、7 にはその範囲を合わせて示してある。

P 波入射の場合 (図 6 参照)；モデル A の斜面からは反射 P 波・ SV 波が発生し、反射 P 波のエネルギーは入射エネルギーの 1 割以下で大部分が反射 SV 波の成分であり、その反射角は式 (1) によれば $31 \sim 35$ 度となる。一方、モデル C では、反射 P 波、 SV 波は入射角によって反射エネルギーの大きさが変化するが、この範囲内でも反射 SV 波が優勢であり、その反射角は式 (1) によれば $15 \sim 27$ 度となる。しかし、半無限弾性体の地表面の円形フーティング上下加振で発生する弾性波の中で P 波に分配されるエネルギーは全体の 7% であることが知られている。⁹⁾ したがって、直接 P 波のエネルギーは考慮するとしても、斜面からの反射は無視してもよいと考えられる。

SV 波入射の場合 (図 7 参照)；モデル A の斜面への入射角は $63 \sim 79$ 度で図 7 に示される入射角の範囲より大きく、斜面で全反射をおこす。一方、モデル C では入射角の範囲内に臨界角 (35.26 度) が存在するため、この角度を境に反射の性状が異なる。つまり、入射角が 27 度～臨界角付近 (34 度) までは 9 割以上のエネルギーを持つ反射 P 波が発生し、その反射角は式 (2) によれば $63 \sim 83$ 度となる。入射角が臨界角になる斜面の位置は法尻から約 4 m 強の場所である。すなわち、図 9 で斜面 OC からは反射 P 波が主に反射され、斜面 CT 部では全反射をおこし反射 SV 波のみが現れる。

モデル A、C の斜面に SV 波が入射した時発生する反射

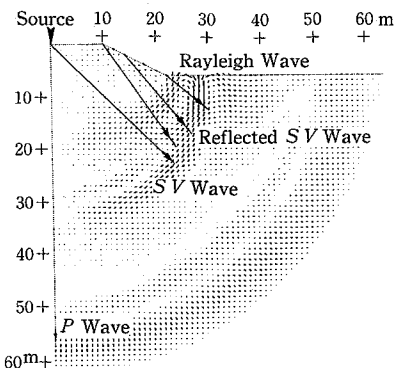


図 8 盛土モデル A の伝播パターン図 ($\nu = 0.25$)

P 波・ SV 波の伝播経路の例を数値計算で求めた伝播パターン図に記入してある (図 8、9)。これらの図で振動源から下方に引いてある点線は直接 P 波、実線は直接 SV 波と斜面からの反射 P 波・ SV 波の伝播経路を示し、 P 波と SV 波では矢印の大きさを違えてある。なお、矢印の付近には各弾性波の種類を示してある。矢印の位置は各弾性波が同一時間に伝播したときの距離に相当している。モデル A (図 8 参照) では斜面から反射 SV 波が発生し、その方向は直接 SV 波の伝播の範囲内には含まれるため、明瞭には分離できない。また、他の波は伝播パターンからも明らかなように、もし存在しても無視し得るものである。一方、モデル C (図 9 参照) では斜面から二種類の反射波が発生するが、その範囲は斜面の C 点を境に完全に分離される。その伝播方向も理論的に求めた結果との一致がみられる。

4-2 法尻から周辺地盤への伝播 盛土モデルと半無限弾性体の地表面で水平距離が同じ地点で得られた上下動波形を用いて、盛土周辺地盤への伝播特性を検討す

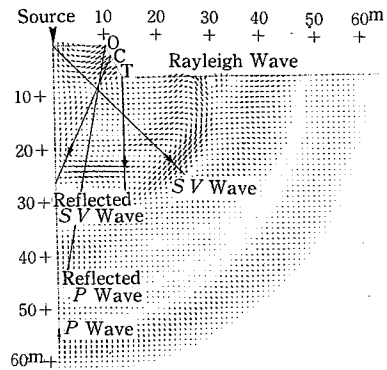


図 9 盛土モデル C の伝播パターン図 ($\nu = 0.25$)

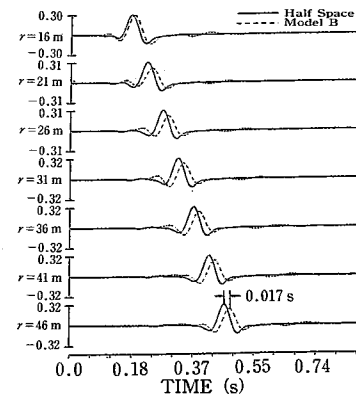


図 10 盛土モデル B と半無限弾性体の上下動波形

る。図10にはモデルBで法尻 ($r = 16$ m) から 30 m ($r = 16 + 30 = 46$ m) まで 5 m 間隔の波形を点線で、半無限弾性体の波形を実線で示してある。波形の縦軸は半無限弾性体の最大振幅値の大きさになっており、同時に振動源からの水平距離を示してある。それぞれの波形の卓越部分の位相速度は 105 m/s で、これはレイリ波の伝播速度に相当する。図中の法尻から 30 m の波形には卓越部分の時間ずれを示してある。

盛土上の振動源から周辺地盤への伝播経路を図11のように予想し、モデルBの上下動波形の位相を解明してみた。この図で伝播経路(a)は表面波、(b)はP波もしくはSV波が伝播し、法尻からは以上三つの転化波(Converted Waves)が発生するとした。図12はモデルBの法尻から10, 20, 30そして46mの各距離での波形の山の時間を読み取った走時図と図11の予想伝播経路から求めた走時曲線を示す。図中には、概略波形とその読み取り記号を示してある。走時曲線上に付してある文字で、最初の文字は振動源から法尻部までの伝播波動成分(R; レイリ波, P; P波, S; SV波)を、後の文字は法尻から周辺地盤への伝播波動成分を表している。なお、法尻から20mまでは山が二つしかないが、これは二番目の山がその前後の山の近くに位置し、分離できないためである。

ところで、半無限弾性体の地表面での水平距離 $r = 46$ m の地点、およびこれに相当する法尻から30mの地点へ、振動源から表面波が伝播する場合、後者の方が伝播距離が長いので波形は半無限弾性体の波形の後に現れる。この波形のずれを位相差と呼び、卓越部分の位相差は0.017秒である(図10参照)。この水平距離 $r = 46$ m まで表面波が地表に沿って伝播するとして求めた両者の位相差は、0.023秒となる。この値と計算波形からの値には0.006秒の差がある。これは数値計算での時間間隔 ($\Delta t = 0.00433$

秒) からして、計算過程で1~2ステップの違いに相当するが、許容される誤差範囲とみなしてよいであろう。つまり、卓越成分であるレイリ波は地表面に沿って伝播することが、定量的に明らかになった。他のP-RとS-Pの伝播は振幅が小さいため、特に問題にしなくてよいであろう。しかし、これらの波動の転化は法尻部での弾性波動の回折現象によるもので、未解決の問題であり、今後さらに詳細な検討が必要である。

5. あとがき

盛土道路を単純なモデルに置き換えて計算した結果、振幅・伝播に関する基本的な特性が明らかになった。以下に、その結果と今後検討が必要な問題点を整理した。

(1) 盛土周辺地盤の上下動成分の振動特性は、角の問題と同様に法尻の角度と密接な関係があることがわかった。しかし、この結果は波長9mのレイリ波のものであり、今後は波長と盛土高さおよび盛土幅の比と振幅の関係を系統的に検討することで、振幅特性がより定量的に明らかになると考えられる。一方、水平動成分の振幅特性は今後さらに検討を行っていく。

(2) 盛土斜面での反射特性が明確になった。実際の盛土では地盤を含め層構造をなすため、この反射特性は重要な問題である。

(3) 法尻部から周辺地盤への伝播で、位相に注目した場合、この部分でSV波からレイリ波への転化という現象もみられるが、特に重要な結果は主要成分のレイリ波の伝播は地表面に沿って伝播することが明らかになった。

数値計算からではあるが、盛土道路での振幅・伝播の基本的な特性が明らかになってきた。今後は実際の盛土道路に合わせた盛土モデルの計算を含め、振動軽減法の一つである溝の問題で、振幅・伝播特性の解明を考えている。

(1980年11月10日受理)

参考文献

- 1) たとえば, J.A. Hudson and L. Knopoff, Transmission and Reflection of Surface Waves at Corner 2. Rayleigh Waves (Theoretical), J.G.R., Vol. 69, 1964, 281~289
- 2) たとえば, W.L. Pilant, L. Knopoff and F. Schwab, Transmission and Reflection of Surface Waves at a Corner 3. Rayleigh Waves (Experimental), J.G.R., Vol. 69, 1964, 291~297 1224~1230
- 3) 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, 32巻, 12号, 1980年12月, 598~601
- 4) 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. 12, No. 12, 1980年, 1224~1230
- 5) B. Gutenberg, Energy Ratio of Reflected and Refracted Seismic Waves, B.S.S.A., Vol 34, 1944, 85~102
- 6) R.D. Woods, Screening of Surface Waves in Soils, J. Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE, Vol. 94, 1968, 951~979

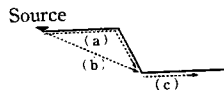


図11 盛土内の予想伝播経路図

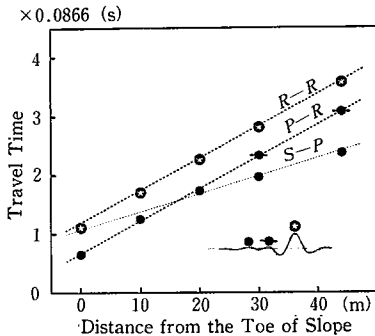


図12 盛土モデルBの走時曲線