

(128) 成層地盤の波動伝播特性に基づいた 防振対策法に関する数値解析

立命館大学 ○早川 清
近畿日本鉄道(株) 難波丈久
近畿日本鉄道(株) 菊田哲夫
大日本土木(株) 江黒充和

1. まえがき

列車走行にともなう沿道への振動問題は、列車の高速化、運行回数の増加、人口密度の上昇、民家の軌道への接近などにより、近年大きな問題となっている。その対策のための研究開発や工事が精力的に行われている。しかし、振動対策法の防振効果は、周辺的环境、地盤状況、対策工の形状・規模、対象とする周波数などにより大きく異なり、効果を定量的に予測する手法は確立されていない。

本報告は、有限要素法を用いた数値解析により成層地盤の振動伝播の特性を明らかにすると共に、振動源近傍の地盤を強化する対策法の効果推定について検討を行っている。

2. 解析概要

解析には複素応答解析による有限要素法を用いた。解析モデルは、図-1に示す平面2次元の加振点を中心にしたハーフモデルで、右端の横方向境界および下部境界は粘性境界とした。モデルの節点数は2132、要素数は2040である。数値解析は、単層地盤、二層地盤の振動伝播特性、および振動源直下の地盤強化のケースについて行った。

2. 1 単層地盤における振動伝播

(1) 解析条件

解析で用いたせん断剛性率は、173, 694, 1561kgf/cm²の3種類、加振波は正弦波の繰り返し荷重で、その周波数は10, 20, 40Hzの3種類である。その他の地盤条件として、単位体積重量=1.7t/m³、ポアソン比=0.3、履歴減衰率=0.03を用いた。

(2) 解析結果

図-2は地表面の最大加速度に着目して、単層地盤のせん断剛性率および入力周波数の影響を示したものである。10Hzの場合には地盤が硬くなる(せん断剛性率が大きくなる)につれて地表面の加速度は小さくなるが、20, 40Hzでは、地盤が軟らかい程、加速度は小さくなる。従って、振動伝播の状況は、地盤のせん断剛性率だけでなく周波数の影響も受けているものと考えられる。

そこで、伝播する波動の性質を調べるため、地盤の変位状況を調査した。せん断剛性率が173, 1561kg

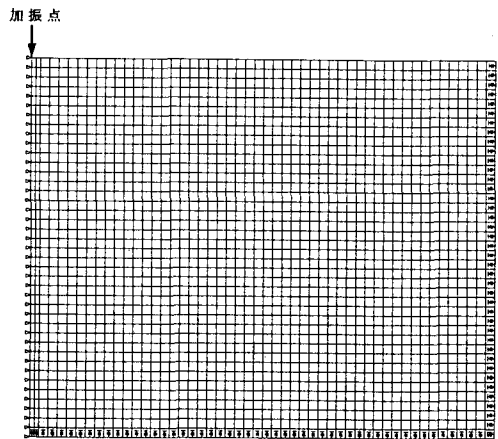


図-1 要素分割図

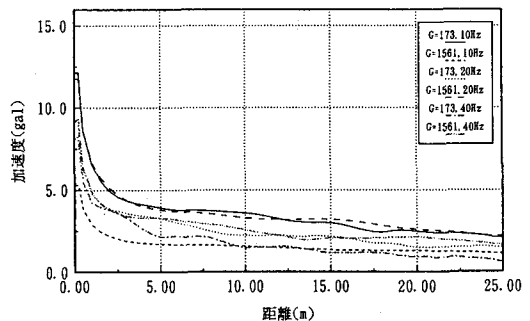


図-2 地表面加速度分布

f/cm² の地盤について、加振点から5m離れた地表の変位軌跡を、10、40Hzの周波数について描いたものを図-3に示す。10Hzでは、G=173, 1561kgf/cm² のいずれの場合も軌跡が鉛直方向に長い楕円形を描いており、さらに波動の進行方向に対して逆回転しているなど、表面波、特にレーリー波的な性質が顕著である。40Hzの場合、軌跡が円を描いていることから、S波的な特徴が比較的強く現れている。図では示さなかったものの20Hzの場合も40Hzと同様の傾向である。

以上のことから、加振周波数により伝播波動の性質が異なっていると推定され、地盤中の振動伝播問題や防振対策工を考える場合、周波数に十分配慮した検討が重要であることが分かる。

2. 2 二層地盤における振動伝播

(1) 解析条件

本項では、異なるせん断剛性を持つ二層地盤における振動伝播問題を検討した。せん断剛性を変化させることによって数種の異なる地盤の組み合わせを考えている。解析に使用した地盤のせん断剛性率の値は、G=173, 694, 1561kg/cm²の三種類である。また、上層地盤の層厚は、2, 4, 8mの3パターンとした。解析モデル、他の条件については、2. 1と同様である。

(2) 解析結果

解析結果を基に、二層地盤における地表面の振動伝播を、上・下層のインピーダンス比と振動振幅比に着目してまとめた。上層と下層のインピーダンス比は次式で求める。

$$\alpha = (\rho_1 \cdot V_1) / (\rho_2 \cdot V_2) \quad (1)$$

ρ_1 : 上層地盤の密度(t/m³)

V_1 : 上層地盤の表面波速度(m/sec)

ρ_2 : 下層地盤の密度(t/m³)

V_2 : 下層地盤の表面波速度(m/sec)

また、加速度比の算出は次式による。

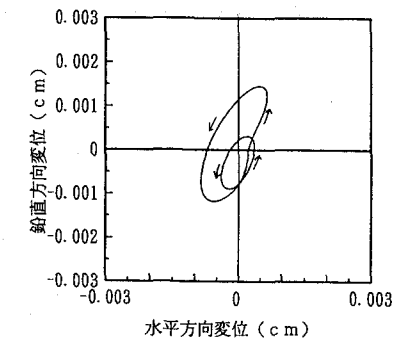
$$A = A_1 / A_2 \quad (2)$$

A: 加速度比

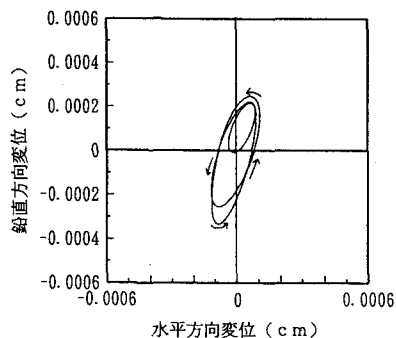
A₁: 各ケース、各地点における鉛直方向加速度

A₂: 単層地盤の各地点における鉛直方向加速度

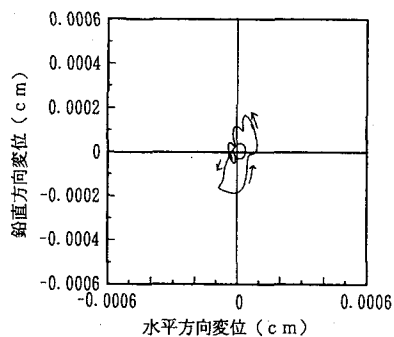
図-4にインピーダンス比と加速度比の関係を示す。図示したのは振動源直下の加速度である。これ



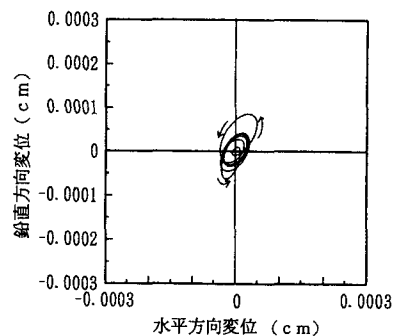
(a) G=173kgf/cm², 10Hz



(b) G=1561kgf/cm², 10Hz



(c) G=173kgf/cm², 40Hz



(d) G=1561kgf/cm², 40Hz

図-3 変位軌跡

らの図より次の事項を指摘できる。

- ①周波数10Hzでは、インピーダンス比が増加するに従って、加速度比が小さくなっている。この傾向が層厚に無関係である。
- ②周波数10Hzにおいては、全ての層厚についてインピーダンス比1以上で振動低減が認められ、層厚が大きくなるに従い低減量も大きくなる。ただし、層厚4mと8mとは大差はない。インピーダンス比1以下では、振動は逆に増大している。
- ③周波数20Hz, 40Hz, では、加速度比－インピーダンス比図からは特別な傾向は見られない。
- ④周波数20Hz, 40Hzにおいては全ての層厚について振動低減は、殆ど認められず、設定したインピーダンス比の最小値0.33についてのみ、若干の低減が認められる。また、周波数40Hz, 上層厚2mのケースでは、設定したインピーダンス比の全域において低減が殆ど無いが、振動の増幅が起こるという結果になっている。

以上から、上層地盤と下層地盤とのインピーダンス比により振動を低減する方法は、低周波域においては効果的であるが、高周波域においては効果が期待できないことが分かった。これは、振動波長が短い場合、上層地盤と下層地盤との境界面における反射の影響に起因しているものと推定される。

2. 3 振動源近傍の地盤強化の効果

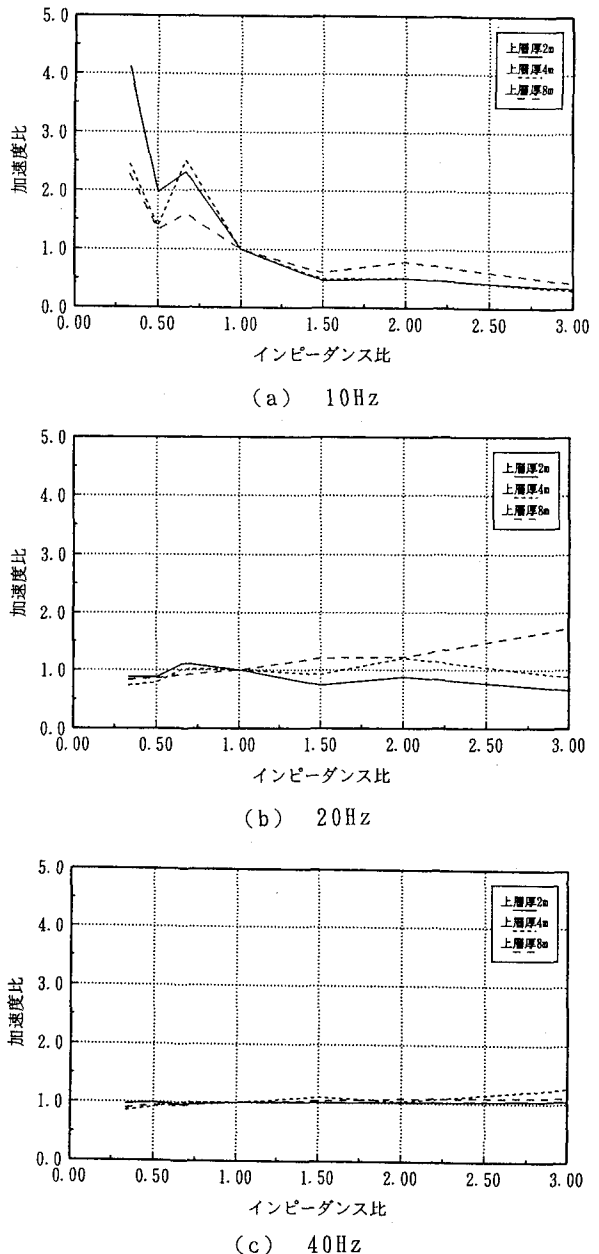
(1) 解析条件

2. 2の解析で、地盤上層の剛性を大きくした場合、伝播加速度の低減傾向が明確になった。従って、本項では振動源近傍の地盤強化による防振効果について検討を行った。解析モデルは2. 1で述べた通りで、対象とした地盤は上層厚が4mの二層地盤である。せん断剛性率は上層が694kgf/cm²、下層が1,561kgf/cm²である。ポアソン比、単位体積重量、履歴減衰率はこれまでと同様である。

地盤を強化する範囲は、幅3m、深さ2m、4mの2種類で、その強化剛性は1561kgf/cm²、2776kgf/cm²、 1×10^5 kgf/cm²の3種類、加振周波数は10, 20, 40Hzの3種類とした。

(2) 解析結果

地表面における振動低減効果を判定するため、無対策と対策後の振動レベルの差を効果量として解析結果



図－4 加速度－インピーダンス比関係

を整理し、図－5(a)～(c)に示した。算定式は以下の通りである。

$$\Delta R = R_1 - R_2 \quad (3)$$

ΔR : 効果量 (dB)

R_1 : 無対策地盤の地表面振動
加速度レベル (dB)

R_2 : 強化地盤の地表面振動
加速度レベル (dB)

上式により求められた効果量は、プラスの場合に振動低減効果があることを表す。

図－5(a)は、加振周波数10Hzで、強化地盤の深さが2m, 4mの場合の強化地盤の剛性の影響を示したものである。強化深さが2m, 4mの場合とも、強化剛性が高いほど振動低減効果がある。また、強化深さが4mの場合の方が2mよりも効果が大きいことが分かる。同様に図－5(b)は加振周波数が20Hzの場合、図－5(c)は加振周波数が40Hzの場合である。これらの図から、効果が認められるのは地盤強化の程度をかなり大きくした場合のみであり、強化の程度によっては逆に振動を増幅する結果となっている。

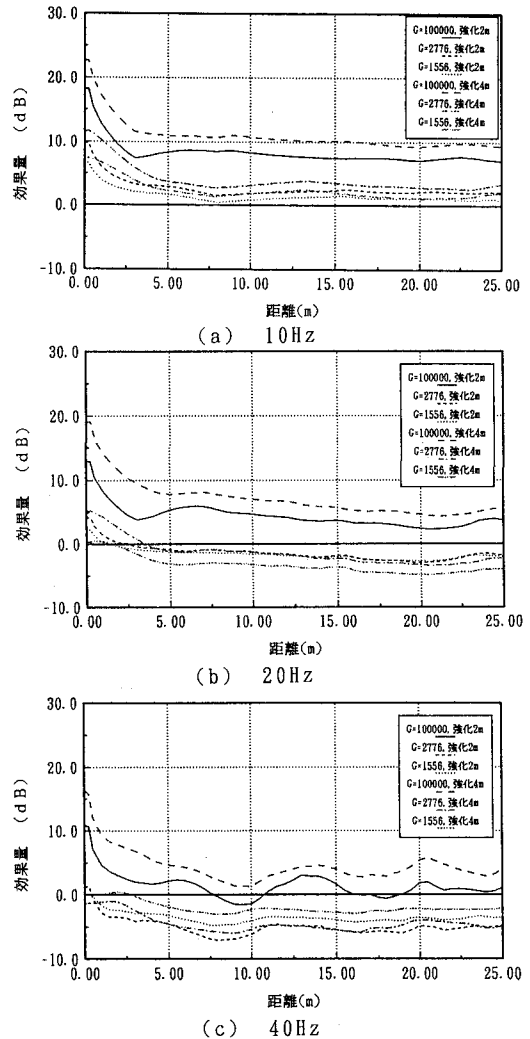
以上より、加振点直下の地盤強化対策工について次のことが言える。

低周波域(10Hz)では、地盤を強化することによりかなりの振動低減効果があるが、20Hz以上の周波数域では、かなり強化の剛性を大きくしなければ効果が無い。また、2.1でもふれたように地盤の剛性と周波数により振動伝播の状況が大きく変わるため、適用にあたっては注意を要する。

3. まとめ

本解析により明らかになった事項は、以下の通りである。

- ① 単層地盤においては、低周波領域(10Hz)では地盤剛性が高いほど地表面加速度は小さくなる。20Hz以上の周波数域では、地盤剛性が低いほど地表面加速度は小さくなる。
- ② 加振点から5m離れた地点における地表面変位の軌跡は、周波数により波の性質が異なることを示している。周波数が低い場合はレーリー波的な性質が、周波数が高い場合はS波的な性質が見受けられる。その境は概ね25Hz程度である。従って、対策工の検討においては、対象周波数を特定することが大切である。
- ③ 二層地盤における振動伝播の状況は、上・下層のせん断剛性率の組み合わせや周波数により傾向が異なる。上層と下層のインピーダンス比の差により、低周波域では振動を低減できるが、高周波域では期待できない。これは波長が短いために反射波の干渉により、振動が低減されないものと考えられる。
- ④ 振動発生源直下の地盤を強化した場合、低周波数では強化剛性の大きさに関わりなく、かなりの振動低減効果が見られた。しかし、20, 40Hzではコンクリートの程度まで剛性を大きくしなければ効果がないと思われる。



図－5 各ケースの効果量