

地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる[®]」の新機能

— 防振地中壁による振動抑制効果の検討 —

高野 真一郎 若松 邦夫

New Functions of Analysis System for Environmental Vibration in/on Ground ‘YUREMIRU[®]’,

— Effects of Vibration Reduction with Underground Walls —

Shin'ichiro Takano Kunio Wakamatsu

Abstract

Vibrations caused by machines, traffic and railroads propagate in foundations and ground. These vibrations can be disastrous to machines and neighboring residences. We had already developed a numerical analysis system ‘YUREMIRU’ to predict these environmental vibrations, and used it in practice. In this study, we developed an analysis method for evaluating the vibration reduction effects of underground walls, and built it into ‘YUREMIRU’. This paper roughly outlines this method and verifies that ‘YUREMIRU’ can predict the observed data practically by applying the method to ground vibrations from a sand collector worked in construction of underground walls.

概要

機械や鉄道・車両等から発生する振動は、基礎や地盤を伝播して、基礎上の機器や周辺の建物に障害を及ぼすことがある。このような地盤を伝わる環境振動を予測するために、三次元薄層要素法を中心とした数値解析システム「ゆれみる」が開発され、既に業務に活用されている。このたび、振動対策としての防振地中壁の効果の評価する解析手法を開発し「ゆれみる」に導入した。本論文は、開発した解析手法の概略を示すと同時に、地中連続壁の工事に伴う土砂分離装置による地盤振動の予測を行い、工事現場の振動測定の結果と比較することにより、「ゆれみる」が実用的な精度で実測値を予測することを示した。

1. まえがき

機械や鉄道・車両等から発生する振動は、基礎や地盤を伝播して、基礎上の機器や周辺の建物に障害を及ぼすことがある。近年、工場施設と住宅との近接化や機械の大型化などによりこれらの振動公害が増加し、振動の予測および対策の重要性が高まっている。

このような地盤を伝わる環境振動を、専門家でなくても迅速に行えるよう、著者等は三次元薄層要素法を中心とした数値解析手法を用いて、地盤を伝わる環境振動を予測する解析システム「ゆれみる」を開発した¹⁾。このシステムにより、振動を発生する構造物や、周辺の振動の影響を受ける構造物を建設する際に、発生する振動や受信する振動の大きさを事前に、しかも詳細に予測することが可能となった。

ただし、対応可能な構造物は、埋設基礎を含む直接基礎構造物と簡略化した杭基礎構造物のみであったため、防振地中壁や地中連続壁を有する構造物、あるいは地中構造物の振動予測には対応できなかった。

そこで、このたび地中連続壁を有する構造物や地中構造物に対しても環境振動を予測する機能を開発するとともに、振動対策としての防振地中壁やSMW(Soil Mixing Wall)の効果の評価することができる解析手法を開発し、

「ゆれみる」に導入した。

本論文では新たに開発した解析手法の概略を示し、さらにこの機能を用いて環境振動を予測した適用例を紹介する。これにより、本手法の有効性を示すと同時に、環境振動に対する防振地中壁の効果について考察した。

2. 解析手法の概略

2.1 地盤および構造物の動的応答解析手法

振動に対する地盤および構造物の動的応答を算定する主要な解析手法として、有限要素法と境界要素法を挙げることができる。

有限要素法は、地盤および構造物を含む有限な領域を細かい要素に分割して、各要素の加振力と応答の関係を算定し、これらを集めることにより有限領域の加振力と応答の関係(剛性マトリクス)を求め、これを用いてある点(あるいは領域)に加振力を与えたときの全領域の応答を算定するものである。一方、境界要素法は、地盤上の任意の点(あるいは線分、面など)に単位の加振力を加えたときの任意の点の応答(Green関数あるいは基本解)を算定し、これを用いて構造物の加振力と地盤の応答の関係(剛性マトリクス)を求めるものである。

有限要素法は、各要素毎にその材料定数を定めること

ができるため、不整形な地盤や非一様な地盤をモデル化することができるなど、モデル化の自由度が高いという長所がある。その反面、三次元の解析モデルになると入力データの作成や数値計算に多大な時間を要するなどの欠点がある。また、有限の領域を取り出すため、境界から外部領域へ逸散する波動を処理する必要がある。薄層要素法は、当初この波動の逸散に伴う境界処理のために開発された手法であった²⁾。

一方、境界要素法は有限要素法に比べると三次元解析モデルの入力データの作成が容易であることや、境界処理の必要がないなどの長所がある反面、Green関数(あるいは基本解)が一様地盤やせいぜい二層地盤でしか求められないため、解析できる地盤に制限があるなどの欠点がある。近年になり、薄層要素法を用いて成層地盤における三次元のGreen関数が導かれており、これを用いた境界要素法(あるいはそれに準ずる手法)により、成層地盤上の構造物の応答を算定することが可能となっている³⁾。

「ゆれみる」は最後に述べた三次元薄層要素法によるGreen関数を中心とした解析手法により地盤および構造物の振動を予測するシステムである。このため、成層地盤を扱うことが可能であり、三次元解析であるにも関わらず、入力データが簡単で計算時間も短い。

2.2 三次元薄層要素法の概要と特徴

三次元薄層要素法は、地盤を多数の薄い層に分割し、薄層間の境界における荷重と変位の関係を剛性マトリクスで表し、これを全ての薄層に対して重ねあわせて地盤の剛性マトリクスを作成する手法であり、この剛性マトリクスに対し境界条件として加振力を与えることによりGreen関数が導かれる。加振力としては、点加振だけでなく、線加振、円盤加振、リング加振などが考慮されており、線加振に対するGreen関数は地中壁や防振壁に、リング加振に対するGreen関数は杭などに適用することができる。

また先に述べたように、三次元薄層要素法は成層地盤を扱うことができるという機能的な特徴がある。さらに、通常のGreen関数の算定で必要となる特異点を含む数値積分が不要となるため、計算時間が短いことも実用的な解析で用いられる要因となっている。

2.3 数値解析の手順

「ゆれみる」の解析は周波数応答解析を基本とする。入力時刻歴の場合は、FFTにより周波数依存の入力に変換し、最終的な周波数応答の結果を逆FFTにより時刻歴に戻す。以下に、周波数応答解析の手順を示す。

- 1) 薄層と薄層の境界で切断される埋込み、杭、地中連続壁、防振地中壁、地下構造物壁面の各要素上に、節点あるいは節リングを設ける。
- 2) 半無限自由地盤上の各節点に単位の点加振力(あるいは線加振力、円盤加振力)、あるいは節リングに単位のリング加振力を与えたときの、各節点および節リン

グにおける応答を、薄層要素法を用いて算定する。ここで、要素の種類(杭、防振壁など)によって適切な加振力のタイプを選択する。これらの応答を要素とする柔性マトリクス $[D]$ を構築する。

- 3) 柔性マトリクス $[D]$ の逆行列をとって剛性マトリクスとし、これから埋込み内部地盤(地下構造物内部地盤)の剛性マトリクスと、杭と置き換わる地盤の剛性マトリクスを差し引く。さらに、これに杭の剛性マトリクス、地中連続壁の剛性マトリクス、防振地中壁の剛性マトリクスを加えることにより地盤－杭－地中連続壁－防振地中壁系の剛性マトリクス $[K]$ を作成する。ここで、埋込み内部地盤の剛性マトリクスは有限要素法ソリッド要素により、また杭に置き換わる地盤および杭の剛性マトリクスは有限要素法ビーム要素により、地中連続壁と防振地中壁の剛性マトリクスは有限要素法シェル要素により算定する。
- 4) 作成された剛性マトリクス $[K]$ のうち、埋込み部や杭頭部、地中連続壁の頂部など剛体運動をする部分の節点をまとめる。自立する防振地中壁の節点はこれに含まれない。まとめた節点を剛体部分と呼ぶ。
- 5) 剛性マトリクス $[K]$ を操作することにより、剛体部分の単位振幅定常振動に対する剛体部分の反力として、インピーダンス(地盤ばね)マトリクスを算定する。一方、外部からの入力波に対する剛体部分の応答として、基礎に対する入力すなわち基礎入力動を算定する。
- 6) 基礎、防振基礎、防振装置などを質点とばねおよびダッシュポットでモデル化し、インピーダンス(地盤ばね)マトリクスを接続して基礎の応答解析モデルを作成する。このモデルの基礎あるいは防振基礎に加振力を与えて基礎の応答を算定する。地盤からの振動が基礎に入力する場合は、基礎入力動をインピーダンスの下端に与えて基礎の応答を算定する。
- 7) 周辺地盤の応答を算定する場合には、基礎の応答から杭、地中連続壁、防振地中壁の応答を算定し、さらにこの結果と地盤のみの剛性マトリクスから地盤反力を算定する。最後に、自由地盤にこの地盤反力を加えたときの周辺地盤の応答を算定する。

3. 適用例(土砂分離装置の周辺地盤の振動)

近年、大規模再開発プロジェクトの増加により、住宅やオフィスに近接する建設現場においてOWS・SOLETANCHE工法を用いた地中連続壁基礎を敷設する工事が増加しつつある。OWS・SOLETANCHE工法では、振動ふるい機を用いた土砂分離装置により、掘削した土砂混じりの泥水を、土砂と泥水とに分離する。この振動ふるい機の振動が地盤を伝わり周辺の建物に障害を及ぼす可能性がある。そこで、土砂分離装置の振動が周辺建物に与える影響と、SMWによる振動の遮断効果、敷設された連続地中壁を防振地中壁とみなしたときの防振効果について検討するため、建設工事現場において振動測定

を行うとともに、「ゆれみる」によるシミュレーション解析を行った。

3.1 小型土砂分離装置による地盤振動の予測

住宅に近接した市街地の工事現場における土砂分離装置の振動について調査した。振動を極力抑えるため、土砂分離装置は小型(泥水処理量4.5m³/分)のものであり、3台を並列して使用している。これらの土砂分離装置は下部の3台の水槽をまたぐように設置されており、振動ふるい機の振動が防振ばねを介して土砂分離装置本体に伝達し、さらに水槽から地盤へと伝達される。

振動ふるい機1台当たりの質量は $M_1=2.1\text{ton}$ 、これを支える防振ばねの剛性は $K_1=75.0\times 9.8\text{kN/m}$ である。したがってこの振動系の固有振動数 f_1 は、次の式より約3Hzとなる。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_1}{M_1}} \quad (1)$$

土砂分離装置1台当たりの振動ふるい機の加振力は $F_1=6.8\times 9.8\text{kN}$ 、加振周波数は $f=16.7\text{Hz}$ である。防振ばねをとおして水槽に伝達される加振力 F は、ばねの減衰を無視すると次の式で表される。

$$\frac{F}{F_1} = \frac{1}{\left| 1 - \left(\frac{f}{f_1} \right)^2 \right|} \quad (2)$$

これより、土砂分離装置1台から水槽に伝達される加振力は $F=2.22\text{kN}$ となる。

土砂分離装置3台が同時に稼動している場合、加振の位相差を考慮すると加振力は $\sqrt{3}$ 倍すなわち、 $F=3.85\text{kN}$ と

みなすことができる。ただし、土砂分離装置の加振力は45度斜め方向に作用するため、解析では水平方向と上下方向に同時に $F/\sqrt{2}=2.72\text{ kN}$ が16.7Hzの定常加振力として作用するものとする。

水槽の下には特に基礎は設置されておらず、地盤改良のみ施されている。解析の際には、3つの水槽の占める面積を直接基礎と定義する。3つの水槽の質量は内部の泥水の質量も含め合計で約83.5tonとなる。

地盤の成層構造はボーリング調査およびPS検層の結果からTable 1のように仮定した。

Fig. 1に現場の平面図と振動測定の測点の位置を示す。水槽の中心を原点としてx軸とy軸を図のようにとる。加振方向はx方向とz方向となる。加振力が加わる水槽は深さ約11mのSMWで囲まれている。SMWは径約30cmのソイルセメント柱とH形鋼から構成されており、解析では30cm厚のRC製の地中壁としてモデル化した。

振動測定の測点はSMWの内側に4点、外側に6点設置した。測定した加速度波形は、時定数125msの実効値として1/3オクターブバンド周波数分析を行ったのち、振動ふるい機の加振振動数を含む中心周波数16Hzの成分を取り出して解析結果と比較する。実測値と整合させるため、解析結果の振幅は $\sqrt{2}$ で割って実効値に相当する値とする。

Fig. 2にx軸方向の距離減衰の解析結果を示す。図にはSMWをモデル化した場合の解析結果と無視した場合の解

Table 1 地盤の層構造
Structure of Layered Soil

G.L. (m)	層厚 (m)	密度 (ton/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
0.0	2.3	1.35	110	320
2.3	2.3	1.50	150	1270
4.6	6.6	2.00	400	1930
11.2	∞	2.00	540	1760

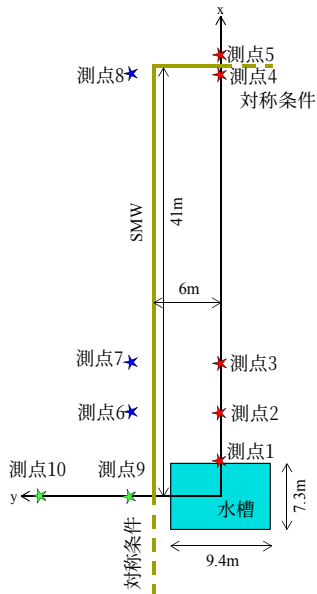
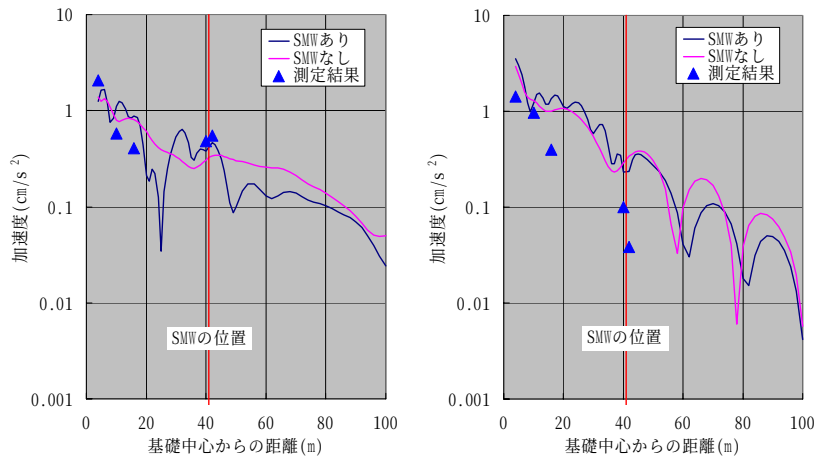


Fig. 1 振動測点と解析モデル
Analytical Model and Observation Points
of Vibration



水平x方向
上下z方向
Fig. 2 x軸方向の距離減衰(測点1～5)
Attenuation of Vibration by Distance in x axis Direction

析結果を併記し、さらに青色のシンボルで測点1～5の振動測定の結果を示す。上下振動成分、水平振動成分とも、解析値は実測値の定性的な傾向を良く捉えている。上下成分の実測値が解析値より小さくなるが、これは現場敷地の地盤改良、あるいは土砂を一時蓄積するために土砂分離装置横に掘られた空溝(土砂ビット)の影響と考えられる。解析結果によるSMWの有無で比較すると、上下方向振動成分はSMWの背後でSMWをモデル化した場合の方が振動は若干小さくなり、わずかではあるがSMWによる振動遮断効果が確認できる。水平方向振動成分はSMWの前後の実測値がほぼ同じであり、SMWによる振動の低減はほとんどないものと考えられる。

次に、座標原点から10mほどy方向に離れ、x軸に平行な方向の距離減衰の解析結果をFig. 3に示す。図には測点6～8の振動測定の結果を併記する。この場合もSMWをモデル化した解析結果は実測値の傾向を良く捉えている。

解析結果より、水平x方向振動成分と上下方向振動成分に対しSMWによる振動低減効果が確認できるが、水平y方向振動成分に対してはほとんど効果が見られない。

最後に、y軸方向の距離減衰の解析結果を測点9と測点10の振動測定の結果とともにFig. 4に示す。この場合も、SMWをモデル化した解析結果は実測値の傾向を良く捉えている。この方向にはSMWによる低減効果はなく、水平y方向振動成分はむしろ増幅している。これはSMWで囲まれた内部地盤が共振しているためと予想される。

以上の考察から、本現場においては、土砂分離装置の振動に関して、SMWの面内方向の振動成分に対するSMWによる振動低減効果が期待できるものと考えられる。

3.2 大型土砂分離装置による地盤振動の予測

住宅からの距離が比較的遠い工事現場における、土砂分離装置による地盤振動について調査した。土砂分離装

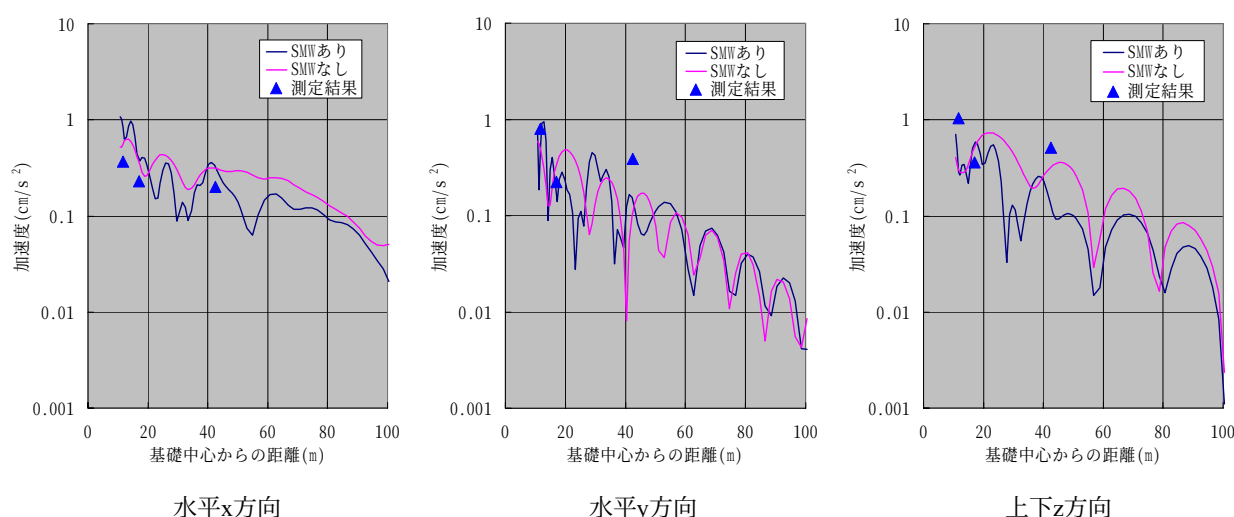


Fig. 3 x軸に平行な方向の距離減衰(測点6～8)

Attenuation of Vibration by Distance in Parallel Direction of x axis

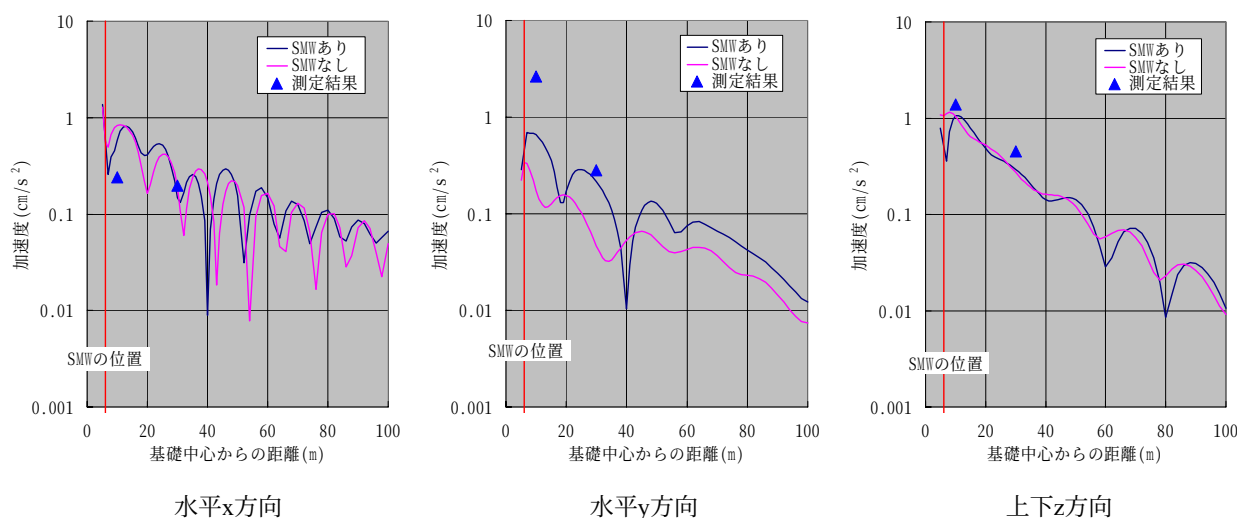


Fig. 4 y軸方向の距離減衰(測点9と10)

Attenuation of Vibration by Distance in y axis Direction

置は大型(泥水処理量10m³/分)のものが1台であり、土間基礎上の水槽の上に設置されている。

振動ふるい機の質量は7.2ton、これを支える防振ばねの剛性は283.2x9.8kN/mである。したがってこの系の固有振動数は式(1)より3.125Hzとなる。振動ふるい機の加振力は31.124x9.8kN、加振周波数は $f=15.8\text{Hz}$ であることから、式(2)より防振ばねをとおして水槽に伝達される加振力は、ばねの減衰を無視すると12.42kNと考えられる。土砂分離装置の加振力は45度斜め方向に作用するため、解析では水平方向と上下方向に同時に $F/\sqrt{2}=2.72\text{kN}$ が15.8Hzの定常加振力として作用するものとする。

Fig. 5に現場の平面図と振動測定の測点の位置を示す。土砂分離装置と水槽は約8m×4m厚さ30 cmの土間基礎の上に設置されており、基礎と水槽および土砂分離装置の質量は合計で約100tonとなる。このモデルでは、加振方向はy方向およびz方向となっている。

土砂分離装置から7.5m離れた位置の連続地中壁(以下、地中壁と略す)は既に施工済みであり、土砂分離装置に対し防振地中壁とみなすことができる。地中壁の厚さは70cmであり、解析に用いた材料定数はRCのものとした。対称条件を用い、y>0の部分のみをモデル化している。地中壁の深さは26mとし、比較的硬質な地盤に達しているものとする。

地盤の成層構造はPS検層の結果からTable 2のように仮定した。また、振動測定のデータおよび解析結果の取り扱いとは前節と同様、実効値に換算して示す。

Fig. 6にx軸方向の距離減衰の解析結果を示す。ここで、青い線、赤い線は、地中壁を考慮した解析のうち、それぞれ地中壁のある方向、地中壁のない方向の距離減衰の結果を表す。黄色い線は地中壁を無視した解析の結果である。また、青と赤のシンボルはそれぞれ地中壁のある方向と地中壁のない方向の距離減衰の実測結果を表している。

上下方向振動成分の解析結果は実測値の傾向を良く捉えている。特に地中壁の手前、すなわち基礎中心からの距離が5mの地点で、地中壁側の測点の方が大きな値となる傾向や、地中壁の背後、すなわち基礎中心からの距離が8m~10mで地中壁側の振動が減少する傾向が解析結果に表れている。ただし、基礎中心からの距離が20mでは、地中壁を考慮した解析結果には大きな谷が生じており、実測と一致しない。むしろ、地中壁を無視した解析結果

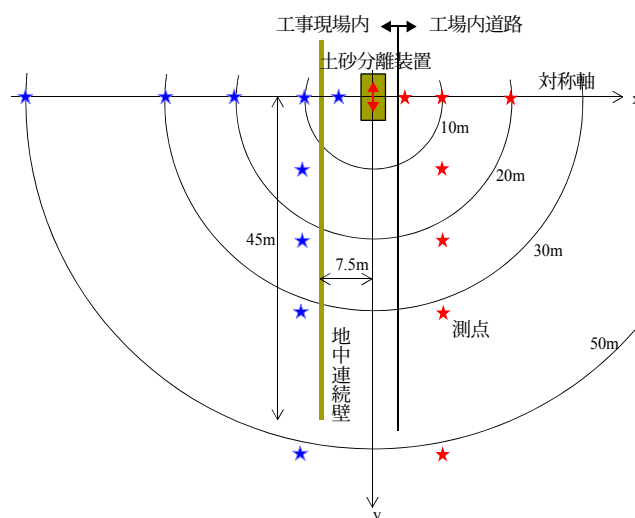


Fig. 5 振動測点と解析モデル

Analytical Model and Observation Points of Vibration

のほうが実測値の傾向を捉えている。

水平x方向振動成分は、実測値の方が全体的に解析結果よりも小さくなっている。これは、現場の土間コンクリート影響と考えられる。また、3種類の解析結果の差が大きくなり、水平x方向振動成分に対しては、地中壁の有無による振動の差が小さいことが分かる。

水平y方向振動成分は、解析結果の方が実測値よりも若干大きくなっている。解析結果は、地中壁の背後、すなわち基礎中心からの距離が8m~10mで地中壁側の振動が減少する傾向を捕らえているが、実測値ほど小さな値にはなっておらず、地中壁の効果を過小評価している。

Fig.7には、y軸と平行する方向の距離減衰の解析結果を示す。

上下方向振動成分は、地中壁のない側の実測値が解析結果よりも全体的に大きくなっている。地中壁のある側の解析結果は、距離が小さい場合に実測値を概ね捉えているが、距離が大きくなると解析結果に谷が現れ、実測値より大幅に小さくなる。この範囲では、むしろ地中壁を無視した解析結果のほうが実測値を良く捉えている。

水平x方向振動成分は、若干の大小の差はあるものの解析結果は実測値の傾向を概ね捉えている。やはり、基礎からの距離が大きくなると、地中壁がないものとして解析した結果の方が実測値の傾向を良く捉える。

水平y方向振動成分をみると、地中壁と反対側の距離減衰は、地中壁を考慮した計算結果が実測値を良く捉えている。ところが、地中壁側の距離減衰は、実測値の傾向は、地中壁を考慮した解析結果よりも地中壁を無視した解析結果に一致している。

以上の結果より、本現場においては、土砂分離装置の振動に関し、地中壁の面内方向の振動成分に対する地中壁による振動低減効果が期待できるものと考えられる。これは、前節のSMWの場合と同様である。ただし、本現場の場合、地中壁を考慮した数値解析による振動の結果

Table 2 地盤の層構造
Structure of Layered Soil

G.L. (m)	層厚 (m)	密度 (ton/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
0.0	16.0	1.6	150	1540
16.0	4.0	2.0	350	1700
20.0	6.0	2.0	600	1800
26.0	14.0	2.0	480	1800
40.0	∞	2.0	610	1870

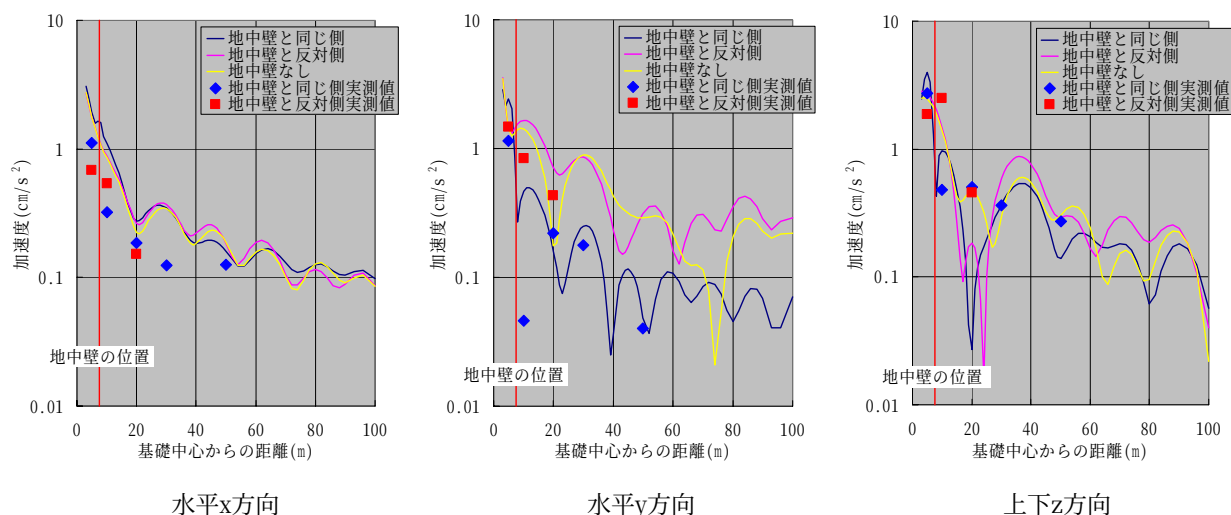


Fig. 6 x軸方向の距離減衰
Attenuation of Vibration by Distance in x axis Direction

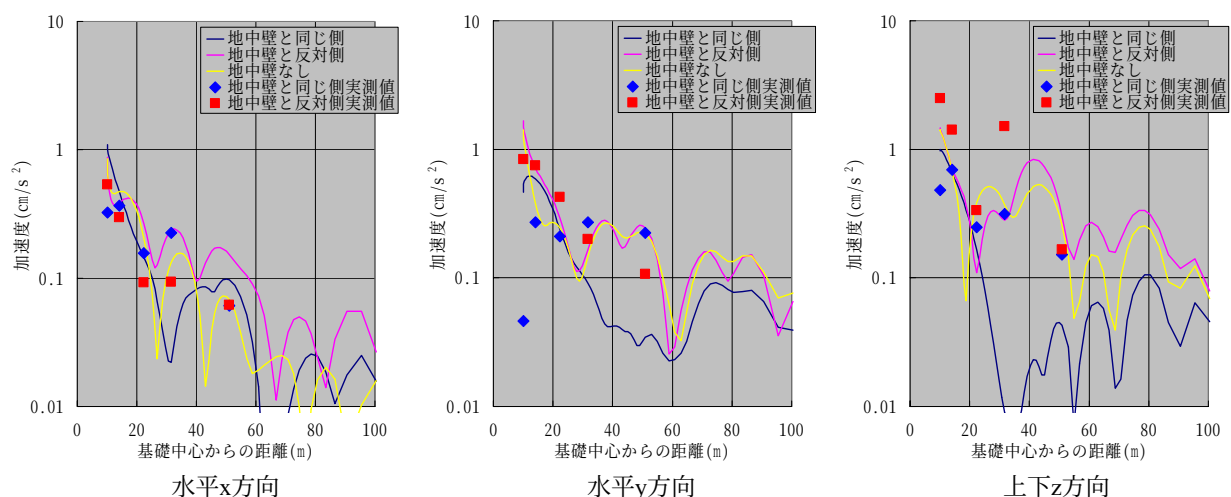


Fig. 7 y軸に平行な方向の距離減衰
Attenuation of Vibration by Distance in Parallel Direction of y axis

には距離に依存した谷が現れ、地中壁の防振効果を過大に評価する場合がある。この場合、むしろ地中壁を無視した解析を行ったほうが実測値の傾向を良く捉える。

4. 結語

地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる」に、地中連続壁を有する構造物や地中構造物に対する環境振動を予測する機能、振動対策としての防振地中壁の効果を評価する機能を導入した。

また、地中連続壁の工事に伴う土砂分離装置の振動による地盤振動の予測を行い、振動測定の結果と比較することにより、「ゆれみる」が実用的な精度で実測値を予測することを示した。

謝 辞

土砂分離装置による地盤振動の測定と「ゆれみる」によるシミュレーション解析は、研究開発テーマ「OWS工法における環境対応型施工システムの開発」の一環として実施したものであり、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木直子, 高野真一郎, 此上典文, 安井 譲: 地盤振動に関わる環境振動予測システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学 I), pp.343~344, (2000)
- 2) E. Kausel: Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media, Research Report R74-11, Dept. of Civil Eng., M.I.T., 1974
- 3) E. Kausel: An Explicit Solution for the Green Functions for Dynamic Loads in Layered Media, Research Report R81-13, Dept. of Civil Eng., M.I.T., 1981
- 4) W.F.研究グループ: 地盤震動の遮断効果に関する実験, 大林組技術研究所報, No.8, pp.52~56, 1974