

## 特集 「快適な都市環境をめざして」

## 地盤を伝える環境振動の予測技術

—地盤を伝える環境振動予測システム「ゆれみる®」—



高野 真一郎



若松 邦夫

## Technology for Predicting Environmental Vibration Propagating through Ground

— Analysis System for Environmental Vibration through Ground ‘YUREMIRU’ —

Shinichiro Takano Kunio Wakamatsu

## Abstract

Vibrations caused by manufacturing machines or traffic propagate through foundations and ground. These vibrations can be disastrous to precision machines and neighboring residences. Therefore, it is necessary to estimate these vibrations when we design the foundations of machines or structures. Where vibration hazard or pollution are predicted, it is necessary to consider remedial measures. By integrating technologies for analyzing environmental vibrations, we have developed a numerical analysis system ‘YUREMIRU’, and used it in practice. This paper roughly outlines functions and features of ‘YUREMIRU’, and describes examples that confirm its efficiency.

## 概 要

製造機械で発生する振動や交通振動は、基礎や地盤を伝播して、基礎上の精密機器の振動障害や周辺の建物の振動公害になることがある。そのため、機械や建物の基礎を設計する場合には、基礎あるいは周辺地盤の振動を事前に予測する必要がある。そこで振動障害が予想される場合には、あらかじめ振動対策を施しておくことが重要である。著者等は、このような地盤を伝える環境振動を予測する技術をシステム化することにより、数値解析システム「ゆれみる」を開発し、実務に適用している。本論文では、地盤を伝える環境振動予測システム「ゆれみる」の機能と特徴の概要を紹介するとともに、適用事例を示すことによりその有効性を確認する。

## 1. まえがき

プレスやタービンなどの製造機械や杭打機などの工事機械で発生する振動は、基礎や地盤を伝播して隣接する精密機器の振動障害となったり、周辺の住宅の居住環境を悪化させ、いわゆる振動公害となることがある。近年、工場施設や建設現場と住宅の近接化や製造機械や工事機械の大型化によってこのような振動障害や振動公害が増加する傾向にある。

また、鉄道や車両から発生する振動は、地盤を伝播して、近隣の精密機器工場の振動障害の原因となったり、隣接する集合住宅やオフィスの振動公害になることがある。近年、交通量の増加や車両の重量化などにより、これらの振動障害や振動公害も増加する傾向にある。

上記のような、機械振動や交通振動が地盤を伝えることによって発生する振動の問題を「地盤を伝える環境振動」と呼ぶ。快適な都市環境を構築するためには、このような環境振動の問題を避けて通ることは出来ない。

地盤を伝える環境振動による振動障害や振動公害は、設置した機械の稼働後や建物の建設後に顕在化することが多く、この対策のために膨大なコストがかかることも少な

くない。また、場合によっては機械の操業を停止させなければならないこともある。このため、このような機械や建物の基礎を設計する場合には、基礎あるいは周辺地盤の振動を事前に予測し、振動障害が予想される場合にはあらかじめ振動対策を施しておく必要がある。

このように、振動障害や振動公害を防止するためには事前に地盤を伝える環境振動を予測することが重要である。ところが、地盤を伝える振動は地盤の構造によって大きく異なってくるため、これを精度良く予測するためには大きな労力を要していた。例えば、有限要素法や三次元薄層要素法などの地盤振動に対する最先端の数値解析技術を駆使し、複数のソフトウェアを組み合わせることで、このためには地盤振動の専門家と解析ソフトの専門家が長時間をかけて解析と評価を行う必要があった。

そこで、このような地盤を伝える環境振動を、専門家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組み合わせ、地盤を伝える環境振動を予測する数値解析システム「ゆれみる」を2000年4月に開発した<sup>1), 2)</sup>。これにより、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。その後、機能の追加<sup>3)</sup>や一部機能のインターネットへの公開<sup>4)</sup>を行うとともに、実務への適用実績を蓄積しつつある。

本論文では、地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる」の機能と特徴の概要を紹介するとともに、「ゆれみる」の適用事例を示すことによりその有効性を確認する。

## 2. 「ゆれみる」の解析機能

地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる」の解析機能は次の4つに分類できる。

- 1) 加振点(振動源)と振動評価点が基礎にある場合  
基礎の任意の方向に定常あるいは非定常の加振力を与えたときの基礎の任意の点の振動を算定する。同じ基礎上に振動する機械と嫌振機器がある場合がこれに相当する。
- 2) 加振点(振動源)が基礎上にあり振動評価点が地盤上にある場合  
基礎の任意の方向に定常あるいは非定常の加振力を与えたときの周辺地盤の任意の点の振動を算定する。基礎上に振動する機械があり、周辺の振動公害を評価する場合がこれに相当する。
- 3) 加振点(振動源)が地盤上にあり振動評価点が基礎にある場合  
周辺地盤の任意の点の任意の方向に定常あるいは非定常の加振力を与えたときの基礎の任意の点の振動を算定する。交通振動に対する嫌振機器の基礎の振動障害を評価する場合がこれに相当する。
- 4) 加振点(振動源)と振動評価点が地盤上にある場合  
周辺地盤の任意の点の任意の方向に定常あるいは非定常の加振力を与えたときの地盤の任意の点の振動を算定する。交通振動に対する周辺地盤上の振動公害を評価する場合がこれに相当する。

交通振動や工事振動などでは加振力が特定できない場合が多い。このため、上記解析機能の3)と4)では、加振点(振動源)の近くで実施した振動測定の結果から加振力を逆算する機能が用意されている。

## 3. 「ゆれみる」の入出力

「ゆれみる」は、データの入出力や解析処理をパソコンで行う。解析モデルの作成から解析の実行、結果のグラフ出力までの操作をシステム化し、対話形式で処理することができる(Fig. 1)。「ゆれみる」の解析処理は複数のプログラムを組み合わせで行っているが、プログラム間のデータのやり取りを自動化しているため、使用者は解析モデルの作成と解析結果の評価のみに集中することができる。

「ゆれみる」の主な入力項目は以下のとおりである。

- 1) 地盤の成層構造  
地盤の各層の層厚、単位体積質量、S波速度、P波速度またはポアソン比を入力する。S波速度、P波速度のデータがない場合は、ボーリングデータからN値を入力する。「ゆれみる」はN値からS波速度を推定する機能を有する。
- 2) 基礎地業  
基礎の埋込み深さや杭配置などを入力する。杭基礎の場合、杭の種類や杭径、杭長などを入力する。
- 3) 基礎形状  
基礎の寸法や重量を入力する。防振基礎を有する場合はその重量と防振装置の剛性・減衰などを入力する。
- 4) 加振力の情報  
加振点の位置や加振力の大きさを入力する。定常加振力の場合はその周波数と振幅を、非定常加振力の場合は加振力波形を指定する。加振力が不明で加振点付近の振動測定波形がある場合はその情報を入力する。
- 5) 振動評価点の情報  
振動評価点の位置を入力する。

また、以下に示す解析結果を出力し、これをパソコンの表計算ソフトを用いて自動的にグラフ化する。出力されたデータの加工やグラフの修正は使い慣れた表計算ソフトを用いて容易に行うことができる。

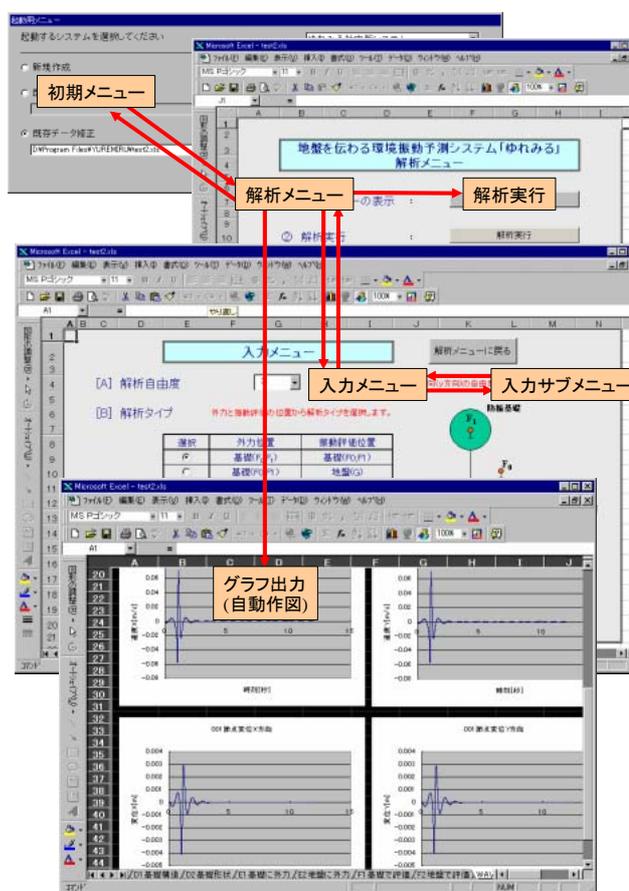


Fig. 1 「ゆれみる」のメニュー画面  
Menu Panel of 'YUREMIRU'

1) 振動の時刻歴波形

入力として時刻歴加振力あるいは時刻歴の振動測定波形が与えられた場合、振動評価点の加速度波形、速度波形、変位波形を出力する。

2) 振動数の関数としての各評価点の振動

入力として振動数ごとに加振力あるいは振動測定の結果が与えられている場合、振動評価点ごとに加速度、速度、変位の結果を振動数の関数として出力する。

3) 距離の関数としての各振動数の振動

入力として振動数ごとに加振力あるいは振動測定の結果が与えられている場合、振動数ごとに加速度、速度、変位の結果を加振点からの距離の関数、すなわち距離減衰として出力する。

4. 「ゆれみる」の特徴

「ゆれみる」は、以下の特徴を持つ。

1) 高精度な予測が可能

地盤の成層性や三次元性をモデル化して解析できる三

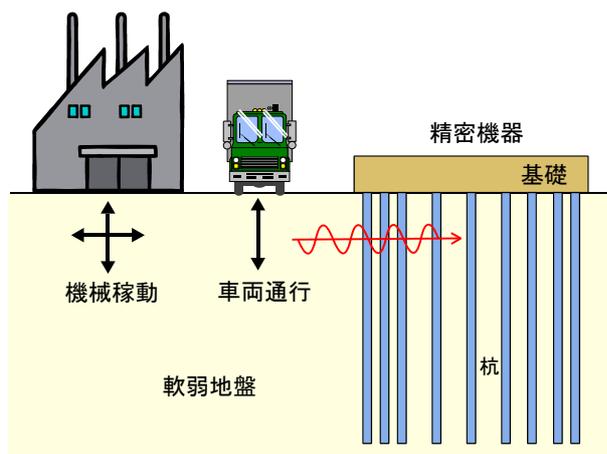


Fig. 2 精密機械基礎の振動予測事例  
Example of Vibration Prediction for Precision Machine Foundation

次元薄層要素法を用いているため、地盤を伝わる振動を高精度に予測することができる。このため、必要十分で経済的な振動対策を検討することが出来る。

2) 地盤や振動の専門家でなくても使用可能

対話形式でデータの入出力や解析処理を行うため、専門家でなくても操作が可能である。

3) 高速に解析処理が可能

入力データの自動生成などにより、入力データを最小限に絞っているため、迅速にデータ作成が可能である。また、三次元解析としては計算時間が短い。これにより、振動対策の検討を迅速に行うことが可能である。

4) あらゆる方向の予測が可能

三次元解析であるため、あらゆる方向の予測を一度の解析処理で行うことが出来る。これにより振動源の周囲の総合的な振動予測と対策を検討することが出来る。

5. 「ゆれみる」による環境振動予測事例

地盤を伝わる環境振動を「ゆれみる」により予測した事例を示し、「ゆれみる」の有効性を確認する。

5.1 精密機械基礎の振動予測事例

軟弱地盤に精密機器の基礎を建設するに当たり、隣接する工場の機械と敷地内道路の大型車両から発生する振動が基礎に及ぼす影響を「ゆれみる」により予測し、基礎の振動が精密機器に対する振動許容値を満足するための基礎形式を検討した(Fig. 2)。その結果、当初の基礎の設計案では振動許容値を満足しないことが予想されたため、基礎の拡幅と増杭を行うことにより許容値を満足させた。

基礎計画時の地盤上の加速度波形と、これから「ゆれみる」により予測した基礎上の加速度波形、さらに基礎完成時の地盤上と基礎上の加速度波形をFig. 3に示す。隣接工場の機械の稼動状況が異なっているため、計画時と完成時の地盤振動の周波数特性が異なるものの、「ゆれみる」を用いて予測した基礎上の加速度波形は、基礎完成時に測定した加速度波形を高い精度で予測しており、「ゆれみる」

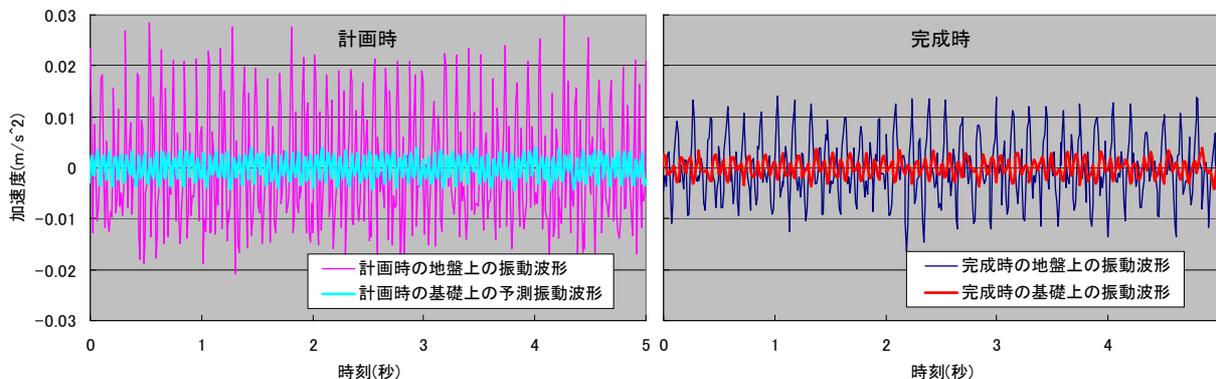


Fig. 3 加速度波形 (予測と実測の比較)  
Acceleration Wave (Predicted and Measured Waves)

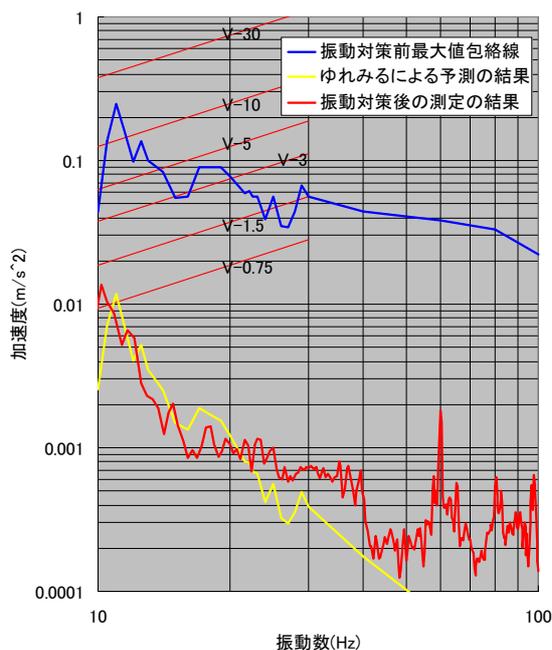


Fig. 4 周波数分析 (予測と実測の比較)  
Frequency Characteristics  
(Predicted and Measured Results)

の有効性が確認できる。

## 5.2 機械基礎の振動障害に対する振動対策

研究施設建設工事の竣工後、建物1階に設置された加振装置を移動させたところ、加振装置の振動が建物に伝わって、上階のオフィスの床の共振を引き起こして振動障害となった。加振装置の基礎と建物の基礎とは分離されており、振動は地盤を伝わって基礎間を伝播していた。

そこで、振動を低減する対策として、加振装置の基礎を現状の直接基礎から杭基礎に変更する案と加振装置に空気ばねを設置する案を提示し、「ゆれみる」により両者の振動低減効果を算定した。

その結果、杭基礎にすると現状よりも振動が1/2~1/3に低減されるが、居室で振動を不快に感じないレベルにはならないことが判明した。一方、加振装置に空気ばねを設置した場合、建築学会の床振動性能評価指針(1991)のV-1.5を満足するレベルまで振動が低減し、オフィス環境として問題のないレベルになることが判明したため、この対策が採用されることになった。

Fig. 4に、対策前のオフィス床の振動とこれを用いて予測した対策後の振動、さらに対策後に測定した床の振動の周波数分析結果を比較して示す。予測と実測が良く一致していることが分かる。

## 5.3 ライブハウス周辺地盤の振動予測

ライブハウスの建て替え工事において、旧建物の振動測定の結果からライブハウスに作用する加振力を推定し、これを用いて新建物から発生する周辺地盤の振動を「ゆれみる」により予測した。

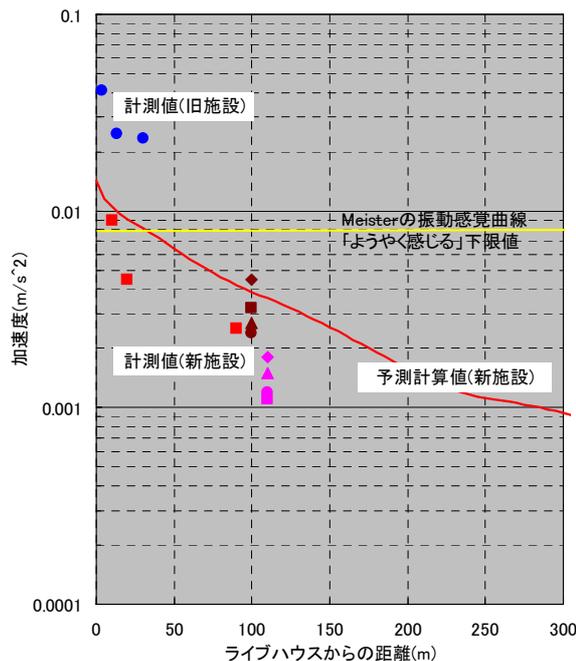


Fig. 5 距離減衰 (予測と実測の比較)  
Attenuation of Vibration by Distance  
(Predicted and Measured Results)

当該地盤は非常に軟弱であり、旧建物でコンサートを実施すると、観客のたてのり振動が地盤を伝わって周辺の建物に入力し振動障害を起こしていた。そこで、新建物では振動対策として場所打ちコンクリート杭を密に設置することとした。

「ゆれみる」に新施設の振動予測の結果(赤実線)と、新施設建設後に周辺地盤で行った振動測定の結果(シンボル)をFig. 5に示す。「ゆれみる」による予測値と計測の結果は概ね一致していることが分かる。

## 6. あとがき

地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる」の概要と適用例を紹介することにより、当社の環境振動予測技術を示した。今後も、業務への使用実績を蓄積して予測精度の向上を図ってゆくとともに、さまざまな防振対策を検討できるように解析機能を充実させてゆく予定である。

### 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) プレス発表, 2000年6月30日
- 3) 高野真一郎, 若松邦夫: 地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる<sup>®</sup>」の新機能—防振地中壁による振動抑制効果の検討—, 大林組技術研究所報, No.68 2004
- 4) プレス発表, 2003年5月12日  
(<http://www.obayashi.co.jp/technology/yuremiru/index.html>)