

## 特集 「品質の向上をめざして」

## 工事振動の予測・監視技術

高野 真一郎 中村 充

## Prediction and Monitoring Technology for Construction Site Vibrations

Shinichiro Takano Mitsuru Nakamura

## Abstract

Due to the recent awareness in offices or residences, vibrations from construction sites are becoming matters of weight. Meanwhile, the permissible vibration levels for the majority of the recent precision factories have decreased. With this background, the risk of grievances or difficulties caused by vibrations from construction sites is growing rapidly. Even “low-vibration” construction machines may not be good enough to resolve the problems in the case of a site with a low damping or dissipation rate or a building with vibration resonance. To avoid the risks and to ensure a satisfactory quality of construction, the technologies to predict and monitor the vibrations from construction sites are becoming more important. In this paper, two key technologies are illustrated, that is, “Yuremiru” which enables a precise numerical simulation of the vibration propagation from construction sites, and “Yureban-nin” which provides reliable monitoring measures for vibrations in real-time.

## 概 要

近年、環境に対する意識の向上に伴い、工事振動による居住性の悪化に対しても住宅の居住者やオフィスの執務者の意識が高くなっている。また、半導体製造工場などの精密施設では、製品の高精度化・微細化により振動に対する許容値が厳しくなりつつある。このため、低振動の工事機械や施工法を用いても、地盤による振動の減衰が不十分な場合や、近接建物の躯体や床の共振により振動が増幅する場合には、体感振動による苦情が発生したり、精密機械や検査機器などの嫌振機器に振動障害をもたらす可能性がある。このような苦情や障害を未然に防ぎ、施工を含めた工事全体の品質を確保するためには、工事機械から現場周辺に伝播する振動を予測する技術、さらに、発生する振動をリアルタイムに計測して監視する技術が重要となる。本報では、工事振動の予測技術「地盤を伝わる環境振動予測システム ゆれみる<sup>®</sup>」と、工事振動の監視技術「工事振動監視システム ゆれ番人<sup>®</sup>」について紹介する。

## 1. はじめに

工事現場ではさまざまな建設工事機械が稼動しており、これらの機械が発生する振動は地盤を介して現場周辺の建物に伝わっている。近年、環境に対する意識の向上に伴い、工事振動による居住性の悪化に対しても住宅の居住者やオフィスの執務者の意識が高くなっている。また、半導体製造工場などの精密施設では、製品の高精度化・微細化により振動に対する許容値が厳しくなりつつある。このため、住宅、オフィスや精密施設に近接している工事現場では、低振動の工事機械や施工法が用いられ、振動障害が発生しないよう配慮されている。

ところが、地盤による振動の減衰が不十分な場合や、近接建物の躯体や床の共振により振動が増幅する場合には、体感振動が発生して苦情となる場合がある。あるいは、精密機械や検査機器などの嫌振機器では、体感できないような微振動でも振動障害をもたらす可能性がある。このような苦情や障害が発生すると、工事がストップし、対策のための新たな費用が発生する恐れがある。

このため、工事機械から現場周辺に伝播する振動を予測する技術、あるいは発生する振動をリアルタイムに計

測して監視する技術は、建設工事の「品質」の向上に欠かせない技術となる。

工事振動など環境振動の予測技術として開発された「地盤を伝わる環境振動予測システム ゆれみる」は、三次元薄層要素法を中心とした数値手法を用いた解析システムである。成層地盤による波動の反射や屈折を考慮して、工事機械による地盤の振動を高い精度で予測し、対策の検討を可能とすることで工事品質の確保に貢献している。また、工事振動の監視技術として開発された「振動監視システム ゆれ番人」は、稼動中の工場内等において工事振動を連続的に監視し、工事振動が許容条件を越えそうな場合には工事現場に警報をフィードバックすることで、工事による製造現場への影響を未然に防ぎ、工事品質の保証を可能にするものである。

本報では、これら二つの技術について、具体的な適用事例を交えて紹介する。

## 2. 工事振動の予測技術「ゆれみる」

## 2.1 工事振動の予測手法

工事振動の予測手法としては、距離減衰式に基づく振

動レベルの予測式が提案されており<sup>1)</sup>、比較的簡単に予測が行えるため振動の環境アセスメントなどに利用されている。ところが、基準となる距離の振動レベルの設定値に幅があることや、幾何減衰係数や内部粘性減衰係数の設定値に任意性があること、振動伝播特性に影響を及ぼす地盤の成層構造が考慮できないことなどから、予測値にはある程度のばらつきがあるものと考えなければならない。また、周波数に関する情報が含まれていないため、共振による振動の増幅のような構造物へ及ぼす影響に関する検討は難しい。

地盤を伝わる振動を、地層構造などの振動の伝播特性を考慮して、精度良く予測するためには、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必要がある。そのためには、地盤振動と解析ソフトの専門家が長い時間をかけて解析と評価を行う必要がある。

そこで著者等は、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システム化することにより、専門家でなくても短時間で地盤環境振動を予測することのできる数値解析システム「ゆれみる」を開発した<sup>2),3)</sup>。以下では、「ゆれみる」を用いた工事振動の予測について述べる。

## 2.2 予測の手順

工事振動の予測の手順をFig. 1 に示す。まず、(a)現場において工事機械から発生する振動を計測し、その結果と数値解析手法により、工事機械から地盤に加わる動的な加振力を算定する。次に、(b)算定した動的な加振力から任意地点の振動を数値解析手法により算定する。ここで、該当現場における振動測定の結果がない場合は、他の現場で算定した加振力を用いることができる。「ゆれみる」では、これらの手順をシステム化して、振動の予測を簡易に実行できるようになっている。

## 2.3 解析精度の確認

関西地区の軟弱地盤上の現場でバックホウの走行実験を行い、現場敷地内の複数の測点で振動を測定した。加

振源であるバックホウから距離5mの測点で計測した3方向の振動波形から他の測点の振動を「ゆれみる」により算定し、計測結果と比較した。

Fig. 2 に、加振源から40m離れた測点における実測波形の1/3オクターブバンド周波数分析 (JIS C1513) の結果 (青色の実線) と「ゆれみる」による数値解析の結果 (赤色の破線) を比較して示す。グラフには、常時微動の結果と建築学会の居住性能評価指針<sup>4)</sup>の性能評価曲線を併記している。これらの結果より、数値解析結果が、いずれの方向成分に対しても、体感上重要な低周波数域において実測の結果を高い精度で予測していたことが分かる。

## 2.4 予測事例

### 2.4.1 バックホウの振動の予測

東京湾岸の工事現場において、バックホウの各種作業によって生じる3方向の振動を、バックホウから10m離れた地点で測定した。ここで各種作業とは、高速走行、低速走行、方向転換、ふるい動作 (バケットを前後に激しくゆする)、ゆすり動作 (バケットで支えてを本体をゆする) および本体落下 (バケットで支えて本体を持ち上げてから落下させる) などのバックホウの動作のことを指す。これらの動作のうち、特に加速度波形の振幅が大きかったのは、高速走行と本体落下であった。

そこで、バックホウの高速走行による周辺住宅の振動障害について検討するため、10m地点の実測の結果から、20m地点、40m地点、80m地点の振動を予測した。予測振動波形の1/3オクターブバンド周波数分析の結果を10m地点の実測の結果と共にFig. 3 に示す。グラフには、建築学会の居住性能評価指針の性能評価曲線を併記している。

この結果より、上下方向の振動は40m離れた地点でも性能評価曲線のV-70 (70%の人が振動を感じるレベル) に達していることが分かり、この現場でバックホウを高速走行させると、発生する振動に対し苦情を招く可能性があるものと予想された。また、水平y方向の振動は上下方向の振動ほど大きくはないものの、6.3Hzで卓越し40m地点でもあまり減衰しないことから、この振動数付近に固有振動数がある建物は、共振によって体感振動に至る可能性が高いことが分かった。

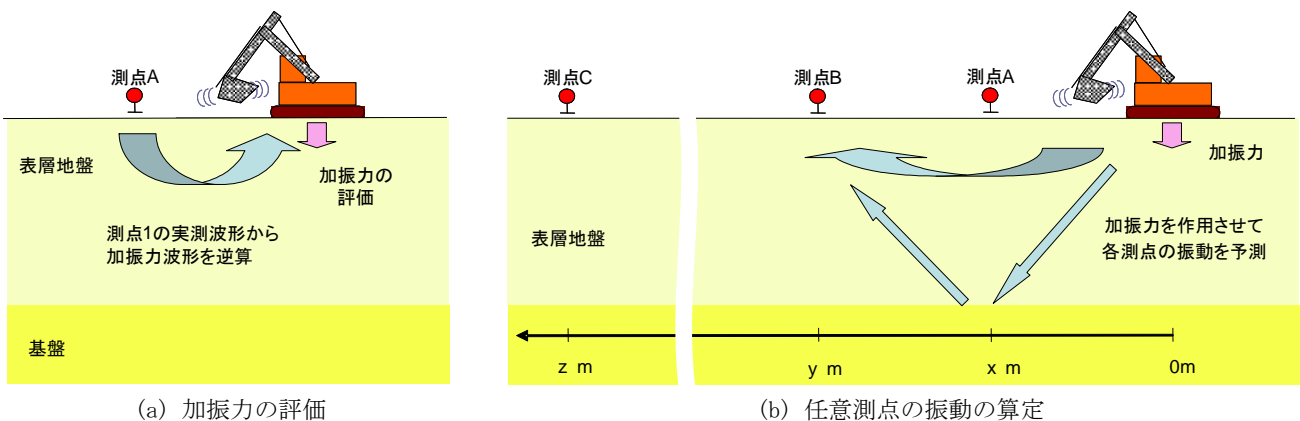


Fig. 1 工事振動の予測手法  
Prediction Method of Construction Vibration

このように、工事振動が近隣に及ぼす影響を詳細に予測し、振動障害となりそうな要因をあらかじめ特定して対策を検討することにより、振動に対する苦情の発生を避けて施工することができる。

**2.4.2 クローラクレーンの振動の予測** 東京都内の工事現場において、クローラクレーンの走行および方向転換によって生じる3方向の振動を、クローラクレーンから5m離れた地点で測定した。特に加速度波形の振幅が大きかったのは、急速に方向転換を行ったときの振動であった。

そこで、クローラクレーンの急速な方向転換による周辺住宅の振動障害を検討するため、5m地点の実測の結果から、10m地点、20m地点、40m地点、80m地点の振動を予測した。予測振動波形を前節と同様に分析してFig. 4に

示す。

この結果より、上下方向の振動は周波数10Hz付近が卓越し、20m地点では性能評価曲線のV-70 (70%の人が振動を感じるレベル) に達することが分かった。ところが、40m離れると急激に振動が減衰し、性能評価曲線のV-30 (30%の人が振動を感じるレベル) 程度に下がることが予測できる。これらの結果から、この現場において工事振動に対する苦情を避けるためには、クローラクレーンの急速な方向転換は、住宅から40m程度離れた場所で行う必要があるものと判断された。

このように、工事振動が近隣に及ぼす影響範囲を予測し、工事振動に対する障害を避けることにより、工事を円滑に実施することができる。

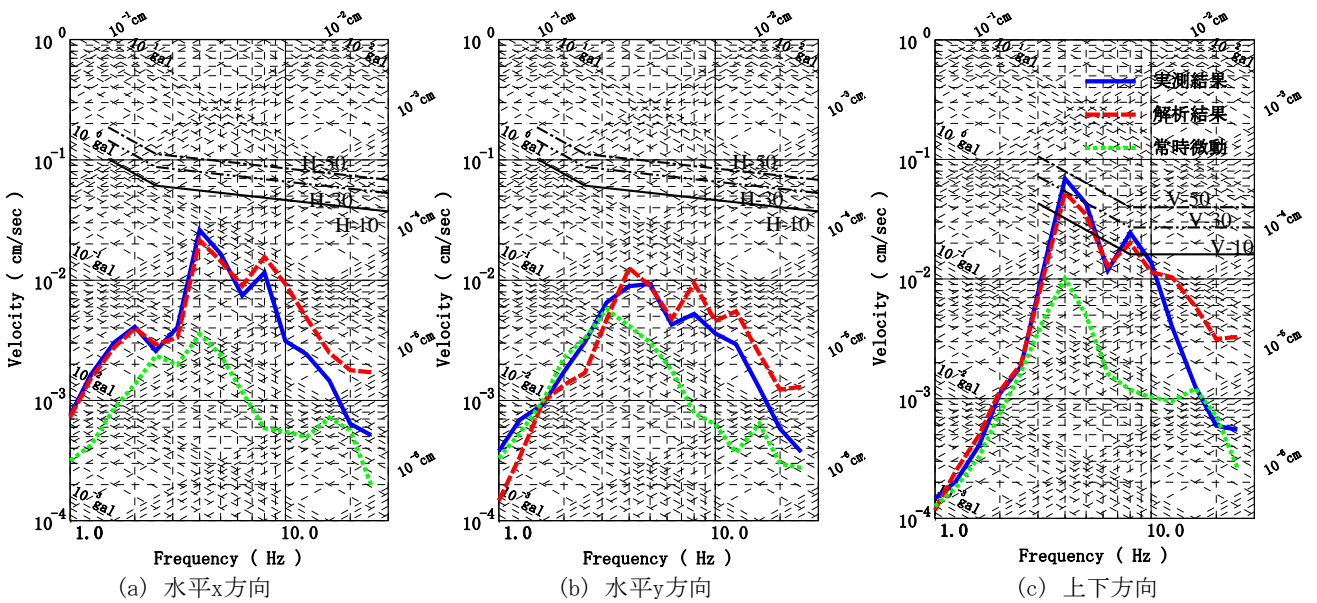


Fig. 2 バックホウの走行による地盤の振動 (解析と実測の比較, 距離40m地点)  
Ground Vibration by Back-hoe Driving (Prediction in relation to Measurement, distance 40m)

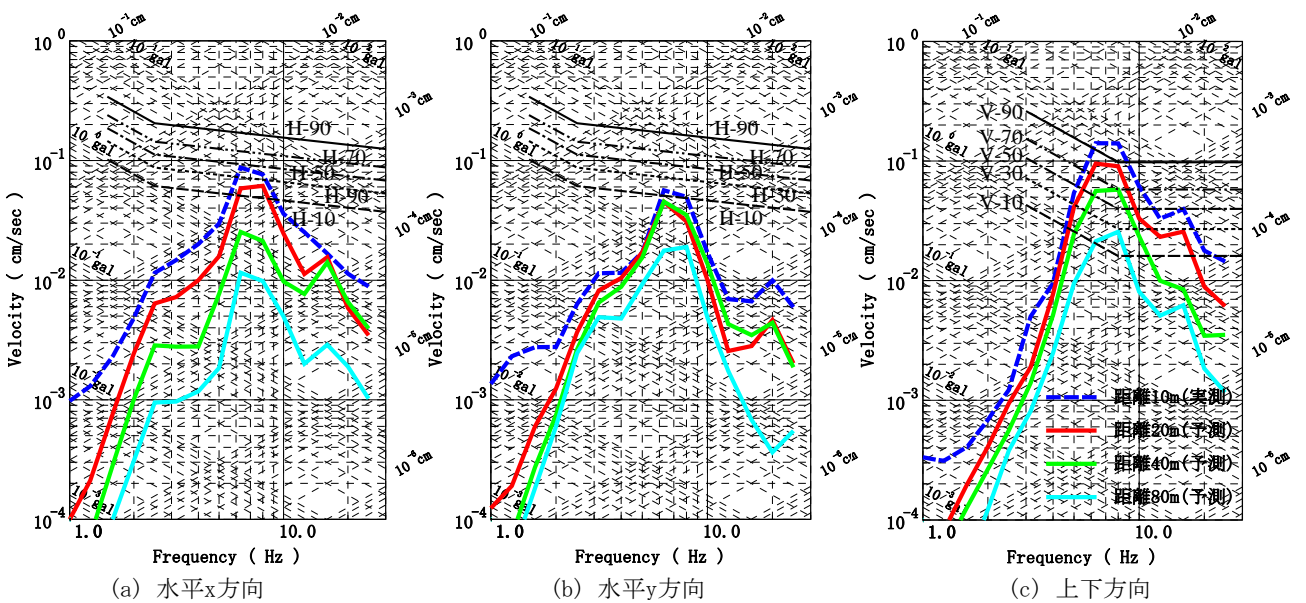


Fig. 3 バックホウの高速走行による地盤の振動の予測  
Prediction of Ground Vibration by Back-hoe Driving (High Speed)

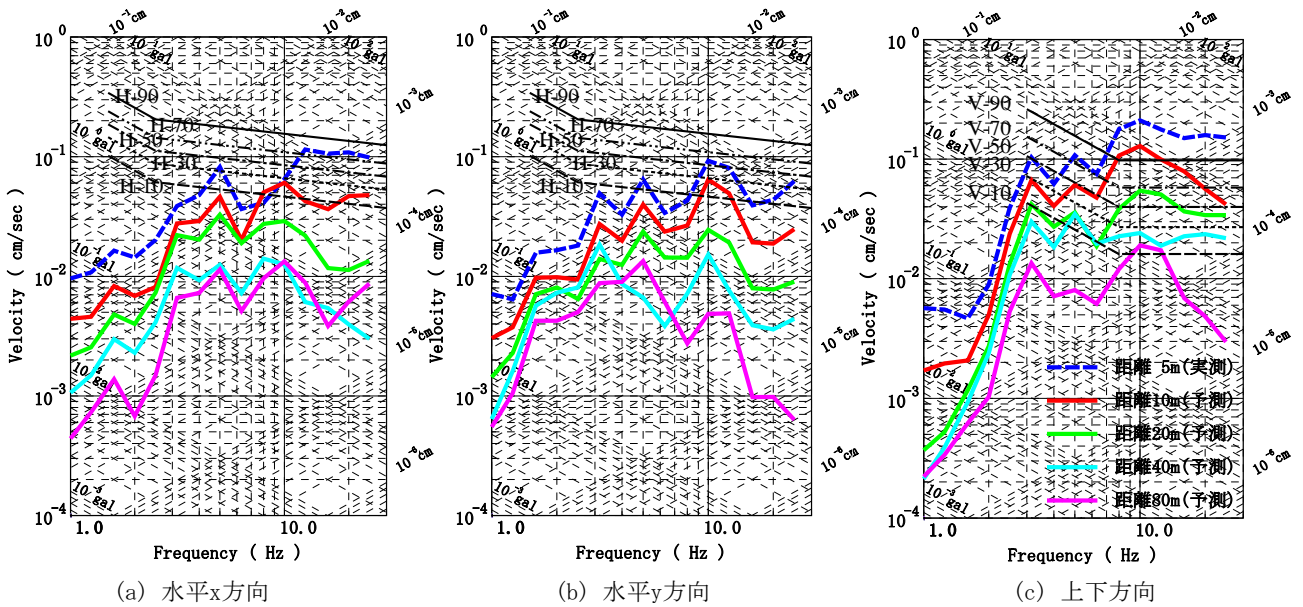


Fig. 4 クローラクレーンの方向転換による地盤の振動の予測  
Prediction of Ground Vibration by Crawler Crane Turning

### 3. 工事振動の監視技術「ゆれ番人」

#### 3.1 精密工場における工事振動監視の必要性和特殊性

半導体や液晶パネルに代表される、いわゆる精密工場で行なわれている加工精度は、近年では $1\mu\text{m}$ をさらに数桁下回っている。これに伴い製造現場の振動環境は、通常のオフィスなどと比較して桁違いの厳しさを要求されるようになってきている。

一般の建設工事に伴う工事振動については、振動規制法により建設現場の隣地境界地盤上における管理値が定められている。しかしながら、地盤上における振動を監視しても製造工場内の振動の大きさを保証することはできない。製造に影響を与えていないことを証明するためには、工場内における製造装置近傍において振動を監視する必要がある。これが、通常の振動公害に対する振動監視と大きく異なる点である。

また、振動規制法では振動レベルの時刻歴最大値を管理値としているのに対し、精密工場における製造装置の振動許容値は振動数ごとに細かく規定されており、工事振動の影響を評価するためには、測定した振動波形をリアルタイムで分析する技術が要求される。さらに、これらの精密工場は通常、クリーンルームと呼ばれる、塵や特殊な揮発成分を持ち込むことが厳しく制限される空間であるため、測定器の設置に際してさまざまな制約がある。このように、精密工場における工事振動監視は、一般現場の工事振動監視とは全く異なる特殊な条件を課せられている。

前述の「工事振動予測技術」は、振動の影響の少ない工事計画を立案するうえで効果的であるが、工事振動などの影響が製造品質に直結する精密工場では、実際の工事で計画どおり振動を一定条件以下に抑えていること、

すなわち建設工事の「品質」を保証することを求められる場合が多くなっている。

#### 3.2 監視装置概要

このような厳しい諸条件に対応し、製造に与える工事振動の影響を未然に防ぐために、精密工場を対象とした工事振動監視システム「ゆれ番人」を開発した。

システムの概要図をFig. 5に示す。システムは大きく3つの部分から構成される。まず、稼動中の工場内における振動監視の対象となる製造装置の近傍に加速度センサを設置する。クリーンルーム内にセンサを設置する際には、クリーンルームにおける振動測定業務の実績を通じて蓄積したノウハウが活用されている。

加速度センサで捉えた信号は、センサケーブルを通じて監視装置本体に伝えられる。監視装置本体は、アンプ、PC、警報灯コントローラ、無停電電源などから構成される。これらは、監視期間中のメンテナンスの利便性を考慮して、通常、クリーンルーム内外の空きスペースや場合によっては屋外の仮設小屋等に設置される。Photo 1

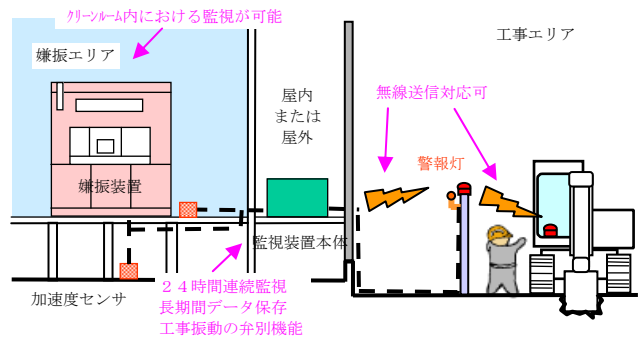


Fig. 5 振動監視システムの概要図  
Outline of the Vibration Monitoring System



Photo 1 振動監視システム設置例（設置小屋外観・内観）  
Setting Example in a Small Cabin

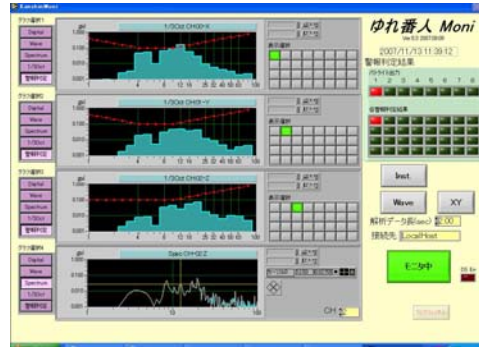


Photo 2 振動監視システム PC 画面例  
Example of the Monitoring PC Display

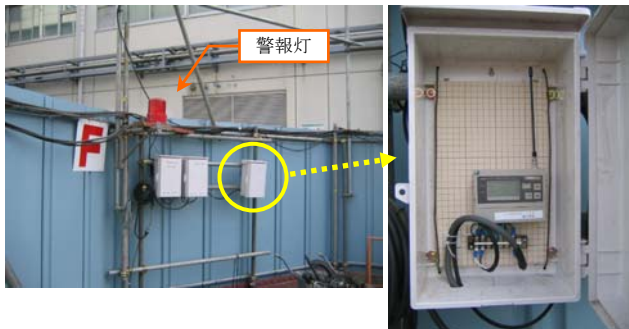


Photo 3 仮囲に設置した警報灯および無線ボックス  
Warning Light and Wireless System at a Construction Site



Photo 4 工事機械に設置した警報灯  
Warning Light on a Construction Machine

に屋外に設置した例を小屋の外観と内観で示す。

センサから伝えられた加速度波形は、PCに取り込まれ、リアルタイムで周波数分析を行ないながら、あらかじめ設定された振動監視目標値と逐次比較される。センサから来る信号が振動監視設定値を越えると、警報灯に信号が伝えられ警報が発令される。Photo 2 に監視 PC の画面例を示す。

監視システムの3番目の構成要素は、工事現場に設置される警報装置である。この警報装置としては通常警報灯（回転灯や信号灯）が用いられる。現場の状況や必要性に応じて、警報音付の警報灯が用いられることもある。工事現場が広い場合は複数台の警報灯を設置したり、場合によっては工事事務所の室内にも設置することがある。

監視装置本体と警報灯のあいだは、通常、ケーブルにより有線で接続されるが、現場の状況によっては無線を使用する場合もある。無線化することにより、警報灯を工事機械に設置することも可能となる。Photo 3 に、現場の仮囲に設置した回転灯と無線装置のボックス、Photo 4 に工事機械に設置した警報灯の例を示す。

### 3.3 システムの特徴

振動監視システムの特徴のひとつが、長期間の連続監視が可能で、かつ全監視期間のデータを保存可能なことである。警報が発令された場合に、発令時点のデータを事後に詳細に分析することで、警報が工事振動によるものであったのか、またその程度が軽微なものであったのか等の追加分析が可能となっている。これらの分析は、

警報発令時に顧客の信頼を維持するために重要な作業となる。

もうひとつの特徴は、製造工場内に設置したセンサ近傍で発生する作業振動と、建設工事振動とを区別する工夫を行っていることである。これは、複数のセンサを設置し、これらのセンサの情報から警報発令の判定を行なうものである。

### 3.4 監視レベルの設定

振動監視の設定値は、監視対象となる製造装置の許容値に基づくのが基本である。通常、監視の設定値は許容値より厳しく設定しておき、工事振動が許容値に至る前に警報が発令されるようにしておく。

具体的な許容値が示されない場合は、工事作業のない状態で「ゆれ番人」により監視対象建物内の振動を一定期間測定し、その結果に基づいて提案することも可能である。

### 3.5 設置事例

この工事振動監視システムは、過去5年のあいだに30件あまりの建設現場において設置され、最も長期のケースでは15ヶ月間にわたって振動監視を行った実績がある。いずれの現場においても、工事振動監視装置が有効に機能し、工事振動による障害が問題になったことは一度もなく、工事に対する高い評価を獲得した一助となった。

ここでは、典型的な設置事例として半導体工場に隣接した工事での例と、工事振動が隣接オフィスの居住性能



Photo 5 既存半導体工場に隣接した新築工事への適用  
A Semiconductor Factory Adjacent to a Construction Site

に与える影響監視に活用した事例を紹介する。

### 3.5.1 既存工場建屋に隣接した新築工事への適用例

この事例は、既存の半導体工場建屋に隣接して、構内道路10mあまりを挟んで新棟を建設したものであり、SMW工法を伴う深さ12mに及ぶ地下掘削や、120tonクローラクレーンや250 t オールテレーンクレーンを用いた地上50m 9階建ての鉄骨建て方を伴う工事で、精密工場に隣接して実施するには厳しい施工条件であった。Photo 5 に、施工状況を示す。

この事例では、建物の耐火区画の関係から、監視装置本体を設置したクリーンルーム前室からケーブルを延ばすことができず、無線による警報信号の送信を実施した。さらに、無線化したメリットを最大限生かすために、工事機械への警報灯設置、ならびに、工事現場への見通しに効かない工事事務所への警報灯設置も実施した。

また、着工に先立って予備工事振動測定を実施し、その結果に基づき工事機械オペレータの操作に制限を設けるなど、振動低減対策に十分な注意が払われた。

このような工事振動が問題となる施工では、通常、振動の少ない工法が選ばれるが、実際に発生する振動は工事機械オペレータの操作如何によるところが大きい。この事例では、振動監視システムを設置することにより、体感ではわからない振動を具体的に把握することが可能となることで、作業員の意識改革につながり、結果的に振動障害を防ぐことに役立っている。

これらの結果、着工から外構工事の完了まで15ヶ月間の長期間にわたる振動監視期間を通じて、工事振動による障害を一度も起こすことなく竣工を迎えた。

**3.5.2 オフィスに隣接した工事への適用例** この事例は、精密工場ではなく一般のオフィスの居住性確保のため「ゆれ番人」を活用した例である。

某オフィス（鉄骨造12階建て）では、たまたま隣接地

における基礎工事が原因で、建物上層階の特定床（8階）で人体に感じる振動が発生することが、予備試験工事の結果判明した。これは、軟弱な地盤上で工事機械が作業する際に発生する振動が建物上層階の床固有振動数と共振し、建物の下層階では無感であったものが、上層階の特定床で有感となったものである。

このため、8階床に加速度センサを設置し、工事振動監視を行った。監視設定値としては建築学会居住性能評価指針のV-50を基準とし、工事振動によって励起される床固有振動数を中心とした5～6.3Hzのみを監視対象とすることで、監視精度の向上をはかった。監視装置から隣接地の工事現場への警報信号の送信は、供用中の建物上層階から下層に長距離の配線を行う手間を削減するため、無線による送信を実施した。

工事振動監視装置を設置した結果、振動障害を引き起こす限界を工事機械オペレータ自身が把握することが可能となり、オフィス居住者の大きなクレームを発生することもなく基礎工事を完了することが可能となった。

このように、「ゆれ番人」の適用範囲は精密工場のみならず一般オフィスの居住性への障害監視にも有効であった。

## 4. まとめ

建設工事現場から発生する振動による近隣住民からの苦情や近接工場内の嫌振機器の障害などを未然に防ぎ、建設工事の「品質」を確保するためには、工事振動の予測技術と監視技術が重要となる。

本報では、工事振動の予測技術として「地盤を伝わる環境振動予測システム ゆれみる」について、工事振動の監視技術として「振動監視システム ゆれ番人」について紹介し、これらの技術が工事施工の品質の向上や保証に大きく貢献していることを示した。

## 参考文献

- 1) 建設作業振動対策マニュアル, 日本建設機械化協会, (1994)
- 2) 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)
- 3) 高野真一郎, 若松邦夫: 地盤を伝わる環境振動技術—地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる<sup>®</sup>」, 大林組技術研究所報, No.69, (2005)
- 4) 建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説, 日本建築学会, (2004)