

都市域のトンネル建設工事に伴う環境振動の発生・伝播および周辺建物への影響

名古屋大学大学院工学研究科
 建築学専攻博士課程前期課程2年
 構造設計工学講座 飛田研究室 若山 武彦

1. はじめに

近年、都市域において建設工事などに起因する環境振動の影響は避けがたく、不快感といった人体への影響だけでなく、各種機器類の機能障害も重要な問題となっている。問題の本質的解決策として、静寂な立地を求めることが望まれるがそれは近年ますます困難となっている。半導体工場・電子顕微鏡等に代表される精密機器を内在する建物は急増しているが、その精度から見て人間が感知し得るレベル以下の振動でも障害が発生する可能性は大きく、人体への影響以上に敏感な問題となり得る。これらの環境振動の影響を的確に予測し有効な対策を講じるためには、従来の主に人間の体感を対象とした環境工学的な研究のみでは不十分であると考えられる。本論では、建設工事に伴う環境振動の発生から精密機器類への障害に至るまでのメカニズムを、(1)振動源の特性、(2)地盤内の伝播特性、(3)建物への入力特性、(4)精密機器への影響、と分離して現象を把握する。さらに本論で得られた特性を基に精密機器への振動予測を行い、実測値との対応を計ると共に、個々の結果の汎用性を検討する。

2. 対象としたトンネル工事および計測の概要

計測対象は都市高速道路の東山トンネル建設工事であり、上り線及び下り線をNATM工法で建設中である。施工は1本のトンネルにつき2本の側壁導坑を先行して掘削し、その後、本坑を上半、下半に分けて掘削を行う。本論では上り線（南側トンネル）掘削工事を対象とし、工事の進展に伴って図3及び4に示すA～Cの測線を用い、それぞれの

測線の最も近くで掘削された時に各工事種別の振動計測を行った。測線A及び測線Cでの計測（以下それぞれA計測、C計測とする）ではサーボ型加速度計を用いてサンプリング振動数100Hzで収録し、測線B（以下B計測）では動コイル型微動計を用いて速度成分をサンプリング振動数500Hzで速度記録を収録した。各計測は午後7時～深夜の掘削作業時に行い、工事振動の影響を明確にするため深夜の工事休止時の常時微動記録も収録している。また、C計測の本坑上半掘削作業時には、図6に示した計測システムにより、現場坑内に赤外線カメラを設置し、坑内の掘削状況を地上でリアルタイムに観測できるシステムを構築した。これによって、実際の作業状況と振動の発生状況を明確に関連付けることができ、精密機器類に障害を与える作業の特定が可能になる。さらに建物Cに内在する電子顕微鏡への振動障害の影響範囲を予測するため、下り線トンネル内の(A)地点において、電子顕微鏡本体まで伝達する様に通常の工事時より大きい振動を発生させる振動実験も行った。

3. 掘削位置近傍での振動特性

トンネル工事の1工程の内、図4及び5に示したような機械による掘削作業時に問題となる振動が確認された。図7にA計測及びC計測で記録した典型的な工事振動の加速度波形例を、作業・工事機械別に示す。側壁導坑の掘削時には振幅の大きいパルス状の波形がくり返し発生する。この振動はシャフローダーの稼動時間と対応が良く、ショベル

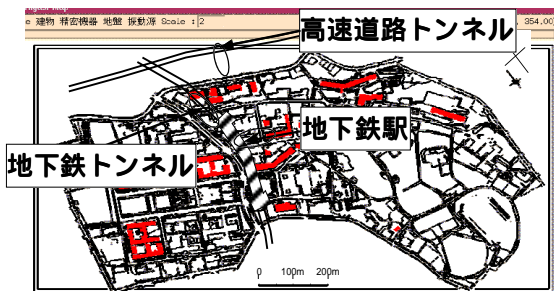


図1 近年東山キャンパス周辺で行われている建設工事

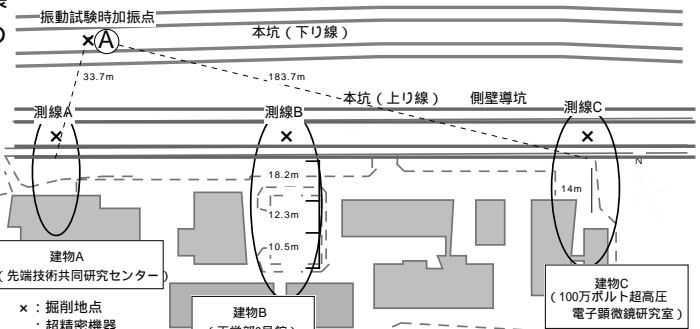


図2 計測測線及びセンサーの配置図（上り線平面図）

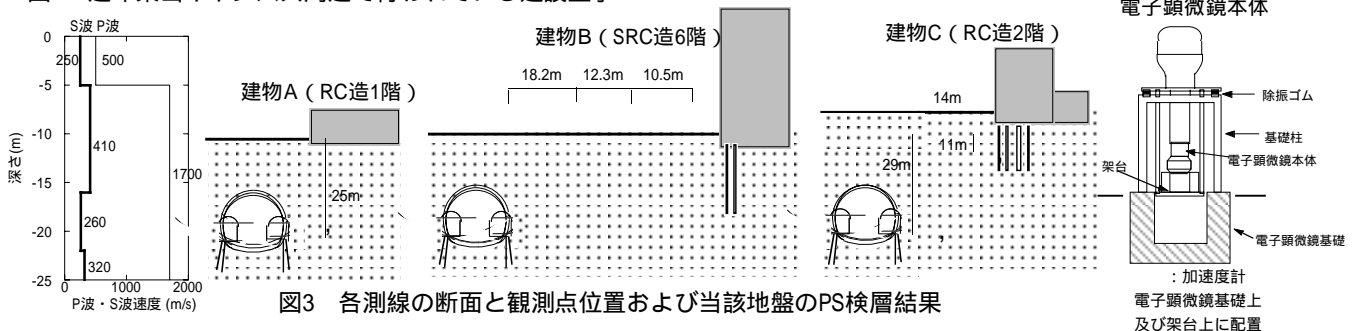


図3 各測線の断面と観測点位置および当該地盤のPS検層結果

電子顕微鏡本体
 除振ゴム
 基礎柱
 電子顕微鏡本体
 電子顕微鏡基礎
 加速度計
 電子顕微鏡基礎上
 及び架台上に配置

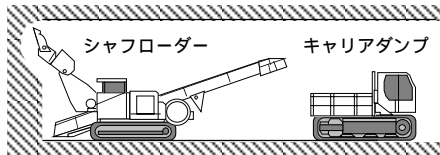


図4 側壁導坑掘削に用いられる工事機械の例

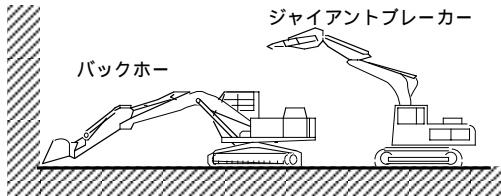


図5 本坑掘削に用いられる工事機械の例

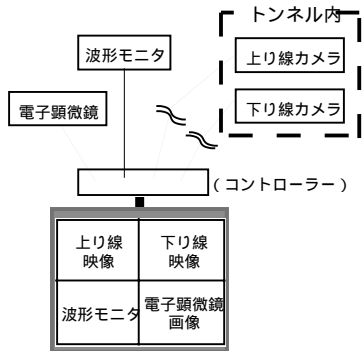


図6 計測システムのイメージ図

による地山の切り崩しに伴う振動であると判断される。他の時間区間でも再現性があり、掘削作業中には、支保工の建込など他の作業時と比較してより大きな振動が発生する。この特徴は各測線での計測について共通して見られた。本坑上半掘削時においては、側壁導坑掘削時と同様に、パルス状の振動が断続的に発生する。特にC計測時においては現場内のビデオ画像と発生した振動とを詳細に対応付けることが可能となったため、各作業・工事機械毎に特徴的な波形例を示す。(c)はニブラーによる側壁導坑の支保工を引き抜く作業時の振動で、振幅の大きいパルス状の振動が見られる。(d)はバックホー及びブレイカーにより土砂を引っ掻き落とす際に発生した振動である。なお、バックホーのショベルが導坑の支保工の近辺を掘削する際、誤って支保工に接触する場面が見られ、この時もパルス状の振動が発生する。この振動はニブラーの作業時と比較して振動の継続時間が長めであることが特徴である。掘削された土砂はキャリアダンプによって排出される。(e)はトンネル坑内をキャリアダンプが通過した際の振動である。上記の振動とは異なり継続時間が長く、波形は紡錘形の形状を示す。キャリアダンプは導坑掘削の際も用いられているが、導坑内が狭いため速度が比較的遅く、振動が小さかったと考えられる。このような特徴は他の時間、方向成分でも確認され、再現性を有していると言える。

図8に工事種別毎の特徴が見られた時間区間をアンサンブルして求めた平均フーリエスペクトルを示す。バックホーによる支保工への接触時や土砂の掘削時のスペクトル

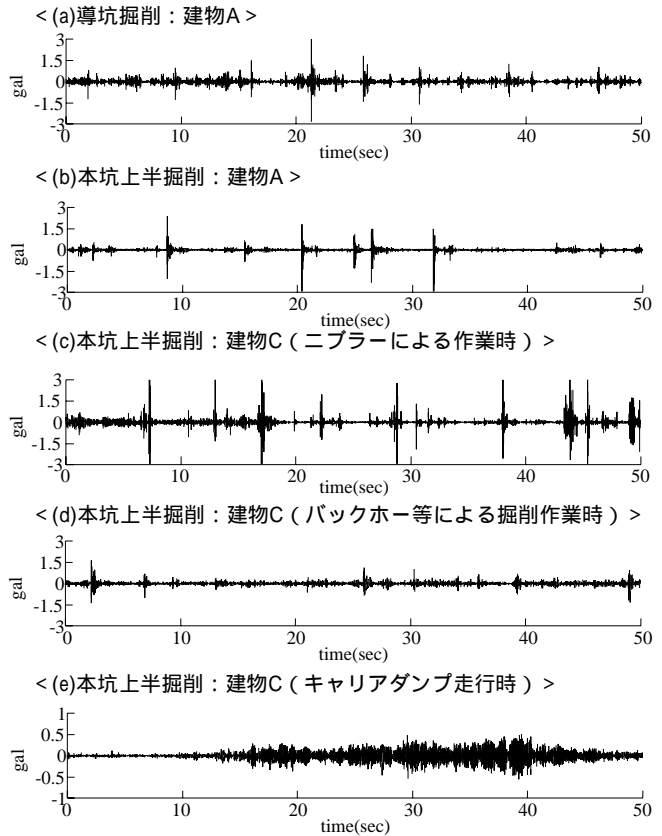


図7 工事機械・作業種別毎の加速度波形例(上下成分)

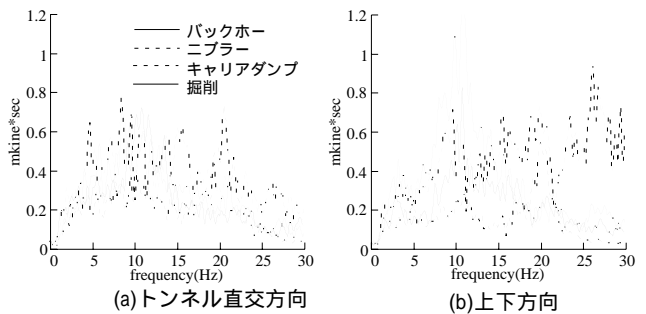


図8 工事種別毎のスペクトル特性の比較 (測線C: 地中観測点)

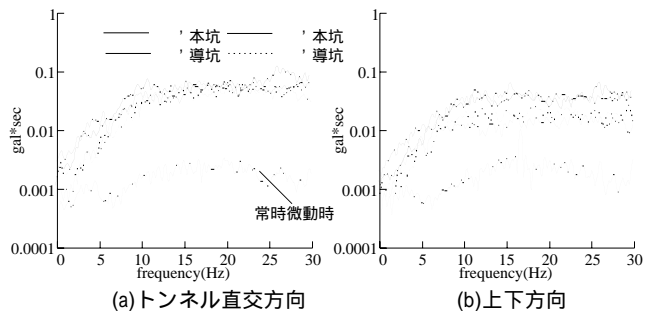


図9 測線A及びCでのスペクトル形状の比較 (本坑・導坑掘削時: 地中観測点)

形状は類似しているが、ニブラーの作業時は高振動数が卓越し、キャリアダンプ通過時には20Hz付近でピークが見られることから、工事機械により、振動数特性が異なることが分かる。図9に測線A及び測線Cでの振動源近傍の地中観測点での平均フーリエスペクトルを、本坑・導坑掘削時

を重ねて示す。測線A及びCで、同じ作業時でのスペクトル形状は掘削位置が異なっても対応がよく、平均して導坑掘削時よりも本坑掘削時の方が振幅が大きい。

以上から、主要な振動の発生原因、振幅特性、振動数特性は各計測につき共通で再現性を持つことが確認された。

4. 地盤伝播特性および距離減衰特性

導坑掘削中に ~ 地点で、特徴的なパルス状の振動がみられた時間区間について、10Hz以下のローパスフィルターをかけた速度波形及びそれらから求めた軌跡を図10に示す。各地点で主要な振動方向が異なっており、X(トン

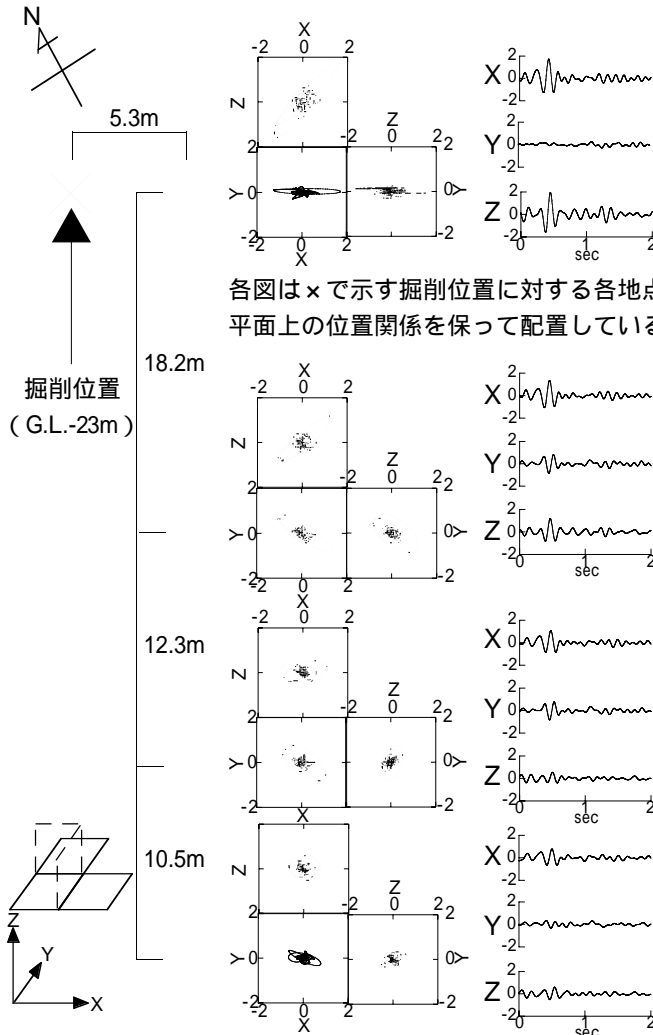


図10 パルス状の速度波形 (mkine) と軌跡 (B計測)

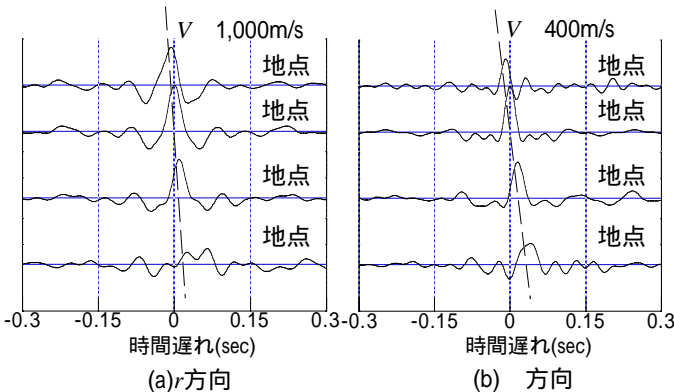


図11 B計測の 地点を基準とした相互相関関数

ネル平行) - Y (直交) 方向断面では、特に ~ 地点で概ね振動源を指向するような形状を示している。また、振動源から離れるに従い、軌跡は強い方向性を持った線的な形状から、方向性の小さい円的な形状に変化している。

次に、B計測の ~ 地点で記録されたパルス波形から求めた、 地点を基準とした相互相関係数を図11に示す。前述のような地盤振動の方向性を考慮し、各地点で振動源からの放射 (r) 方向と緯度 () 方向及び経度 () 方向に極座標変換を行っている。図11より、P波が優勢となるr方向では伝播速度が約1,000m/s、S波が優勢となる 方向では約400m/sとなっている。なお、図は省略するが 方向では 方向と同様の速度を示した。これらの伝播速度は、当該地盤周辺のPS検層結果と対応がよく、振動源から地表へ到達する振動は実体波成分が多く含まれると考えられる。

パルス波形 (30Hz以下) の最大速度の距離減衰を図12に示す。B計測では掘削停止時 (r方向) の値も同時に示す。C計測では地表及び地中の2地点を直線で結んでいる。また、実体波の理論距離減衰は、

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{r} \cdot \exp\left(-\frac{2\pi fh}{V} \cdot r\right) \quad (1)$$

と表される。ここで、 A_0 、 A は振源での振幅、振源から距離 r での振幅であり、 f 、 h 、 V は振動数、内部減衰定数、弾性波速度を表している。なお、 $h=0.02$ 、 $V=400\text{m/s}$ とした。図より、両計測、各方向とも概ね理論曲線の傾きに一致する場合が多いことがわかる。

以上から、土砂の掘削時に伴う地盤内を伝播する振動は、方向性が顕著な実体波が主要な成分であり、距離減衰特性は実体波の理論曲線で評価できると考えられる。

5. 建物への入力特性

建物A及び建物Cへの振動の入力特性について検討す

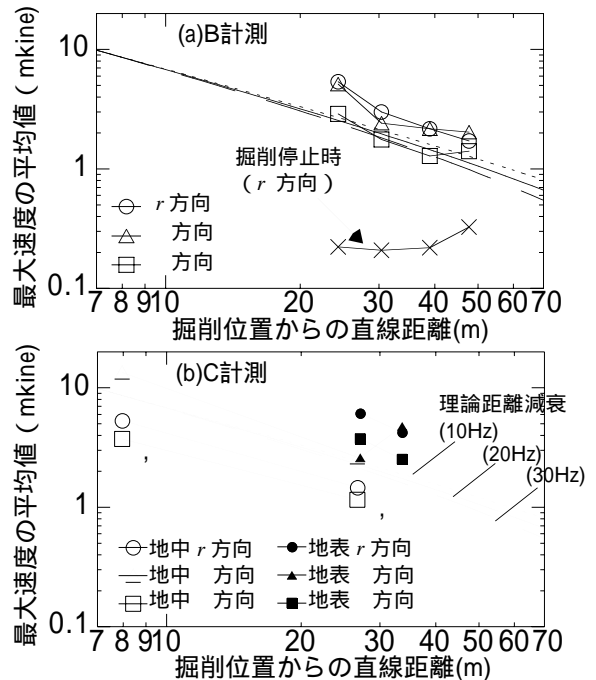


図12 30Hz以下のパルス波形の最大値距離減衰 (掘削時: 9波、掘削停止時: 30波の平均値)

る。図13に各建物について地表・地中地点に対する1階床の伝達関数を示す。水平成分について、地表に対する建物内の伝達関数から、両建物とも地盤-建物連整形の固有振動数のある数Hz~10Hz付近より高振動数側では建物内の価が減少している。地中を基準にした建物内との伝達関数を見ると、建物Aでは地表を基準とした場合より伝達関数の振幅が小さい。これは振動源に近い地中地点のほうが地表地点より振幅が大きいためであり、表層地盤での増幅よりも距離減衰が優勢であったためと考えられる。一方、建物Cでは逆に、高振動数までピークがいくつか見られ、地盤による増幅、または杭基礎が地中からの振動伝播に関連したこと等が考えられる。上下方向では高振動数域の入力損失は水平方向に比べて少なく、特に建物Aでは低下しない。以上の両建物の入力特性の相違は、掘削位置と建物の位置関係、基礎構造の違いにより波動伝播、入射状況が異なるためであると考えられる。次に、図14に電子顕微鏡の基礎-架台の伝達関数と、架台上で得られたデータから求めた各工事毎のフーリエスペクトルを示す。工事機械毎に異なったスペクトル形状を示しており、特に地盤を伝播する際に5Hz成分が大きかったバックホーの振動が増幅されていることが分かる。

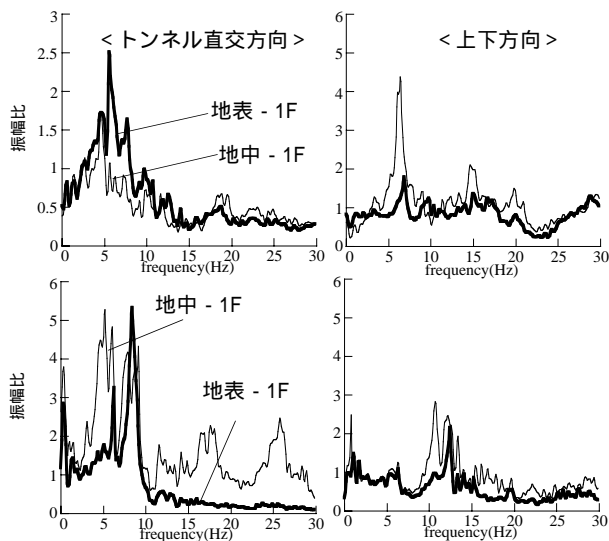


図13 地中・地表 - 建物1階床の伝達関数
(上段：建物A、下段：建物C)

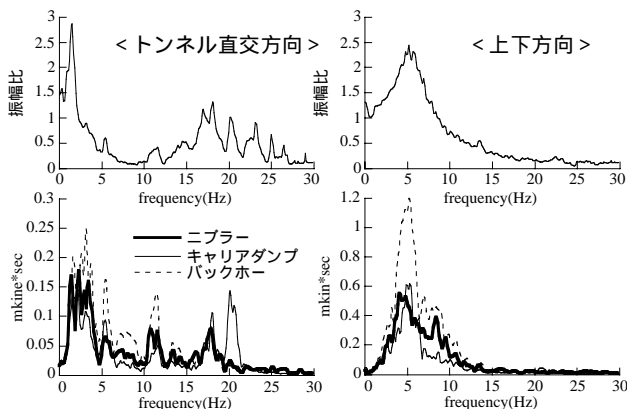


図14 電子顕微鏡基礎 - 架台の伝達関数(上段)及び架台上のスペクトル(下段)

以上の事から現場内で発生した振動が建物及び精密機器類に入力される際には、振動源側の特性と受信側の特性及び振動源との位置関係を考慮して評価することができる。

6. 環境振動の影響範囲の予測手法の検討

前章までに得られた知見を用いて、電子顕微鏡に対する工事振動の影響範囲を予測し、予測手法の検討を行う。図2に示した加振点において故意に大きな振動を発生させ、

地点と顕微鏡架台との伝達特性 $T(f)$ を推定する。また振動源特性 $S(f)$ は測線Aの地点で実測されたデータを、距離減衰特性 $F(r)$ は前述の実体波の理論距離減衰式を用いて、架台上の振動予測値 $A(f)$ を、

$$A(f) = S(f) \cdot F(r) \cdot T(f) \quad (2)$$

により推定した。その予測結果と電子顕微鏡の振動許容試験の結果を重ねて比較し、振動影響範囲を予測した。図15に、地点と掘削地点との距離 r が5m、10m、20m、60mの時の架台上の振動予測値と振動許容試験の結果を示す。この中で \times は電子顕微鏡の使用不可限界値を示し、 Δ は影響が明確でないことを示す。図より、本坑上半工事における振動影響範囲はおよそ60m以内であると推測される。また、工事が電子顕微鏡建物に最接近した時における架台上の振動予測値と実測値を重ねて示す。振動数によりばらつきはあるものの、概ね予測値と実測値とは一致する。

以上の事から、本論で得られた知見を用いて行った振動予測は妥当であると考えられる。

7. 結論

NATM工法のトンネル建設時に発生する振動について継続的に実測を行い、その振動源特性、波動伝播特性、建物への入力特性、および精密機器類の振動との関連性について分離して検討した。このように継続的に計測を行い、影響の大きい可能性のある振動を特定することにより、実際の工事においても振動発生に対して改善が見られた例もある。さらに、個々の検討で把握した知見を用いて振動予測を行い、精密機器への影響範囲等を推定した。これは実際に工事が進んだ際の振動と良い対応を示し、本論で得られた結果は汎用性を有し、他の地域での同様な工事が行われる際の予測に有用であると考えられる。

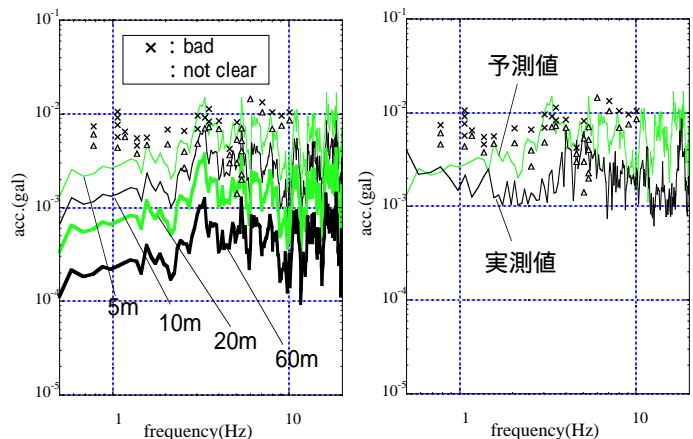


図15 予測結果と許容振動特性の比較(左)及び最接近時の予測値と実測値との比較(右)