

連続地中壁工法による地下鉄駅建設工事に伴う地盤振動の発生と伝播

Ground vibration caused by
construction of subway station using Diaphragm Wall Method

片山 貴裕*

飛田 潤**

福和 伸夫***

若山 武彦*

Takahiro KATAYAMA

Jun TOBITA

Nobuo FUKUWA

Takehiko WAKAYAMA

In order to investigate properties of ground vibration due to ground excavation during construction of a subway station, vibration measurements are conducted for several construction stages, using array of sensors in and near the excavation site. The following points are obtained. Properties of ground vibration strongly depend on operation methods and working construction machines. Vibration component perpendicular to diaphragm wall is principal effective input to surrounding soil during lifting soil up from underground level. Pre-constructed wall suppresses vibration amplitude in the component perpendicular to the wall less than other components. It is observed that surface waves have a large effect on wave propagation and properties of attenuation.

Keywords : diaphragm wall method, environmental vibration, construction machines,
operating condition, attenuation, surface wave

連続地中壁工法、環境振動、工事機械、作業状況、距離減衰、表面波

1. はじめに

近年、都市域において建設工事や道路交通などに起因する環境振動の影響は避けがたくなっており、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振動レベルに基づく環境工学的な研究のみでは不十分であり、振動発生源から周辺地盤、建物入力に至る振動伝播のメカニズムを考慮することで、より一般性を有する検討が可能になる。さらに、環境振動の振動源は人為的なものであり、障害を受ける施設に近接することから、振動源の抑制・制御のために

も、振動源そのものの特性把握が重要となる。また、周辺の地盤条件を考慮した振動伝播特性の把握が重要であり、実測データの蓄積が望まれる。

環境振動問題に対する検討として、道路交通振動を対象に、実測に基づいて振動源特性あるいは距離減衰特性を検討した例^{例(1), (2), (3)}は多く見られる。しかし、工事振動に関しては、杭打ちなど特定の施工状況に応じた検討例^{例(4), (5)}は見られるものの、全体的に検討例は少ない。また、花里ら⁶⁾では、場所打ち杭の施工現場では掘削作業より大型積載車両の走行の方が環境に対する影響の大きな振源であると指摘されており、工事振動問題の検討では、建設工事の各工程から発生する振動を、総合的・統一的に分析することが重要であると考えられる。特に、地下鉄駅のような大規模な地下構造物建設の際には大きな地盤振動の発生が予想されるが、具体的な特性には不明な点が多い。

そこで本論では、連続地中壁工法⁷⁾による地下鉄駅建設工事を対象として、土留壁及び構造物本体の一部として

本報の一部は、文献^{8), 11), 12)}で発表している。

*名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻・大学院生

Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Nagoya Univ.

**名古屋大学工学部社会環境工学科・助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, School of Eng., Nagoya Univ., Dr. Eng.

***名古屋大学先端技術共同研究センター・教授・工博

Prof., CCRIST., Nagoya Univ., Dr. Eng.

利用される連続地中壁の工事から、駅舎部分となる内部の掘削工事に至る各工事段階を通して、継続的に振動計測を実施し、発生する振動特性及び周辺地盤内の振動伝播性状、特に距離減衰特性について分析を行う。

2. 計測の概要

計測は、工事の進行状況に合わせて'96～'98年の3年間にわたり計5回実施した。対象とした工事現場付近の平面図を図1に示す。名古屋大学の東山キャンパスを地下鉄が南北に縦断し、図中の部分を含めて約250mが連続地中壁工法による駅舎部分であり、その南北はシールド工法によりトンネルが建設される。

'96年、'97年の計測対象は、連続地中壁の掘削工事であり、'96年は東側地中壁の掘削を対象とし（以下、'96年計測）'97年は西側地中壁を対象とした（以下、'97年計測）。'97年計測について計測地点の配置を図1に示す。'96年については、②地点以降の計6地点で計測を行っており、⑤地点は建物1F床ではなく、建物西側の地盤に設置した。また'97年計測時には、振動の伝播経路の①と②の間に既設の東側地中壁を挟むことになる。従って、'96年と'97年との比較により、完成後のRC造連続地中壁による振動伝播の抑制効果の検討が可能である。対象とした掘削位置付近では掘削機（BWロングウォールドリル）と泥水循環ポンプが稼動しており、シルト回収ユニット等の泥水精製プラントが掘削位置から約80m離れた位置で稼動していた。連続地中壁の掘削は、掘削機により1部分（壁厚800mm×掘削長2720mm）ごとに所定の深度（-35.6m）まで掘り下げ、これを順次繰り返して水平方向に掘削機が移動していく。1回の掘削に約1日要进行。掘削深度あるいは掘削対象層の土質種別により発生する振動特性の相違が考えられるため、同じ掘削位置の掘削深度ごと（約1～4mごと）に'96年計測では13回、'97年計測では15回の計測を行った。なお、'96年には、泥水精製機構を含めた各工事機械ごとに発生する振動特性を把握する目的で、泥水精製プラント付近での掘削時に、現場内で高密度に計測地点を配置し計測を行った（以下、'96年追加計測）。

'98年の計測対象は、連続地中壁完成後の内部掘削工事である（以下、'98年計測）。計測地点の配置と土留支保工断面図及び周辺のボーリングデータから推定した地盤断面図を図2に示す。計測時には掘削底面（-25.7m）付近を掘削中であつた。平面的な測線は'96年、'97年計測とほぼ同様であるが、'97年計測と比較して①地点を東側地中

壁の東側とした点および⑤地点を建物西側の地盤上、⑥地点を建物1F床とした点で異なっている。連壁の上端はG.L.-1.5mとなっており、その上部にはガイドウォール及び建込み鋼材によって支持された覆工板・受桁が架けられている。なお、覆工板・受桁は、防振材を介してガイドウォールに接触しており、受桁は約2.5m間隔で架けられている。周辺地盤構造は約G.L.-3mから洪積層となっており、約G.L.-7mで第三紀層に達する。①地点は地下の掘削面、②地点は連壁の上端である。③地点は覆工板上であるが、内部掘削時には設置していなかった。そのため、覆工板など支保工構造の振動特性と周辺地盤に与える影響を詳細に把握する目的で、後日、追加計測を行った（以下、'98年追加計測）。'98年追加計測時には、①、②、③、①地点に計測地点を配置し、下部にマットスラブが施工された状態であつた。

内部掘削工事の主な作業内容を表1に示す。地下での作業を停止した場合（以下、地上での作業時）と地上での作業を停止した場合（以下、地下での作業時）に分けて計測を行った。また計測時には、大型の壁面はつり機械による作業は終了していたが、連壁への衝撃的加力により大きな振動の発生が予測されるため、ショベルで直接連壁に衝撃を与えた場合（以下、連壁への衝撃時）の計測も行った。なお、'98年追加計測時には、覆工板上のクレーン車により地下への資材搬入作業が行われていた。

計測は作業時間帯にあわせ、一部を除き昼間に実施した。また、'96年追加計測を除く各計測時には、暗振動の特性把握の目的で、工事停止時の常時微動計測をあわせて行っている。'96年計測、'98年計測、'98年追加計測時には周辺道路の交通量が減少する午後8時頃、'97年計測

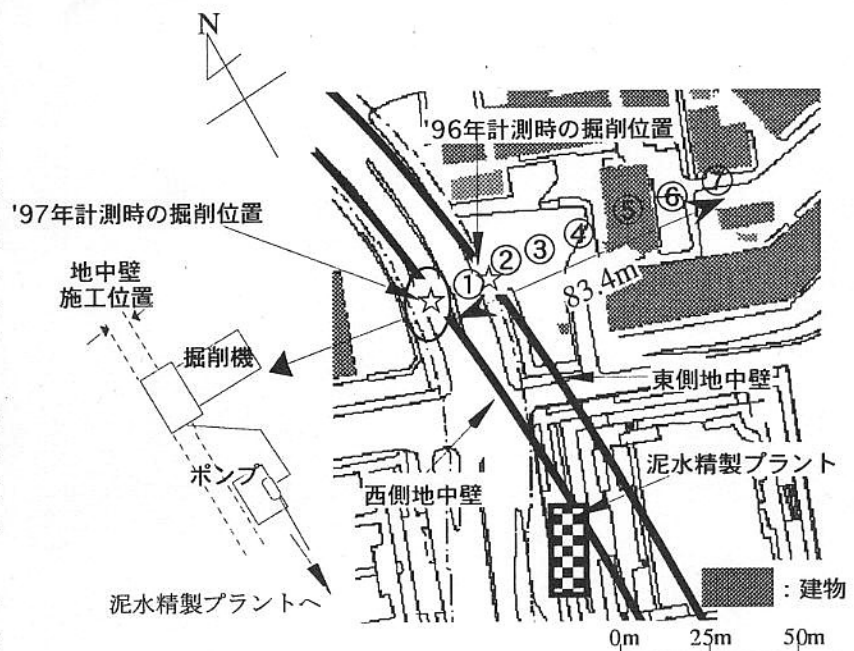


図1 計測地点配置図（'97年連続地中壁掘削時）

時には深夜0時頃に実施した。なお、以下の分析には、周辺道路の交通振動の影響が含まれる時間区間を取り除いたデータを用いている。

いずれの計測でも、各地点で連壁直交方向（EW）、連壁平行方向（NS）、上下方向の3方向成分を同時計測した。センサーは固有周期1秒の動コイル型微動計を用いて速度成分での計測を行い、サンプリングは500Hzとした。なお、内部掘削時（'98年計測）の地下の掘削面（①地点）のみ振動レベル計を用いて加速度成分での計測を行っている。以下の分析では、レベル計の精度と対象とする振動数域を考慮し、2～50Hzのバンドパスフィルターをかけた波形を積分し、速度成分とした上で他の地点と比較している。

3. 各工事段階で発生する振動の特性

3.1 連続地中壁の掘削によって発生する振動

連続地中壁掘削時（'97年計測）に掘削位置近傍（①地点）で記録した速度波形を連壁直交方向と上下方向について図3に示す。なお、図3を含めて、分析に用いる時刻歴波形は、微動計の精度と対象とする振動数域を考慮して50Hzのローパスフィルターをかけた速度波形としている。参考として、変位、加速度との比較を示すと、図3の（b）上下方向の粘土層掘削時（上段）について、最大変位、最大速度、最大加速度はそれぞれ、 $0.65\mu\text{m}$ 、 7.51mkine 、 1.47gal である。図3より、両方向とも振幅レベルは同程度であり、比較的定常な波形が継続している。図3には20秒間のみ示しているが他の時間区間においても同様の傾向を示した。連壁直交方向ではうなるような波形が等間隔で現れているのに対し、上下方向では傾向は類似するものの、うなりの成分は小さく高振動数成分を多く含んでいる。また、上下方向では掘削層の土質種別による相違もみられる。

これらの波形（'97年計測）から $8.192\text{秒} \times 16\text{サンプル}$ を取り出し、アンサンブル平均により求めたフーリエスペクトルを図4に示す。なお、掘削層の土質種別及び掘削深度による相違を考察するため、各方向ともG.L.-8m、G.L.-16m（上段）については右側の縦軸が、G.L.-19m、G.L.-22m（下段）については左側の縦軸がそれぞれ対応する。各方向成分ともスペクトルに狭帯域のピークがいくつかみられる。スペクトル形状は水平方向と上下方向で異なっており、水平方向では連壁直交方向の振幅が大きくなっている。水平方向では、掘削している層の土質種別によりスペクトル形状が異なっており、共通して7～20Hzの振動数域でほぼ等間隔での卓越がみられるが、土質種別により各ピークの卓越度合いが異なる。土質種別によるスペクトルの特徴は掘削深度が異なっても同様であるため、掘削機ピット付近から発生する振動が多く含まれていると考えられる。なお、掘削機は5軸のピットが水平面内で回転するタイプである。上下方向では前述の時刻歴波形とは異なり、スペクトル形状は掘削層の土質種別による差が小さく、18Hz成分が大きく卓越する。また泥水循環ポンプ稼働時にポンプから約2.5mの位置で計測した波形（'96年追加計測時）について、 $8.192\text{秒} \times 16\text{サンプル}$ による平均フーリエスペクトルを図5に示す。水平方向成分については2方向をベクトル合成してい

表1 内部掘削時（'98年計測）の主な作業内容

	主な作業内容
地下での作業	ブルドーザー、ショベル等による掘削
	小型ブレーカーによる壁面はつり
	支保工の構築
地上での作業	覆工板上のクラムシェルバケットによる土砂の引き上げと、ダンプへの積み込み

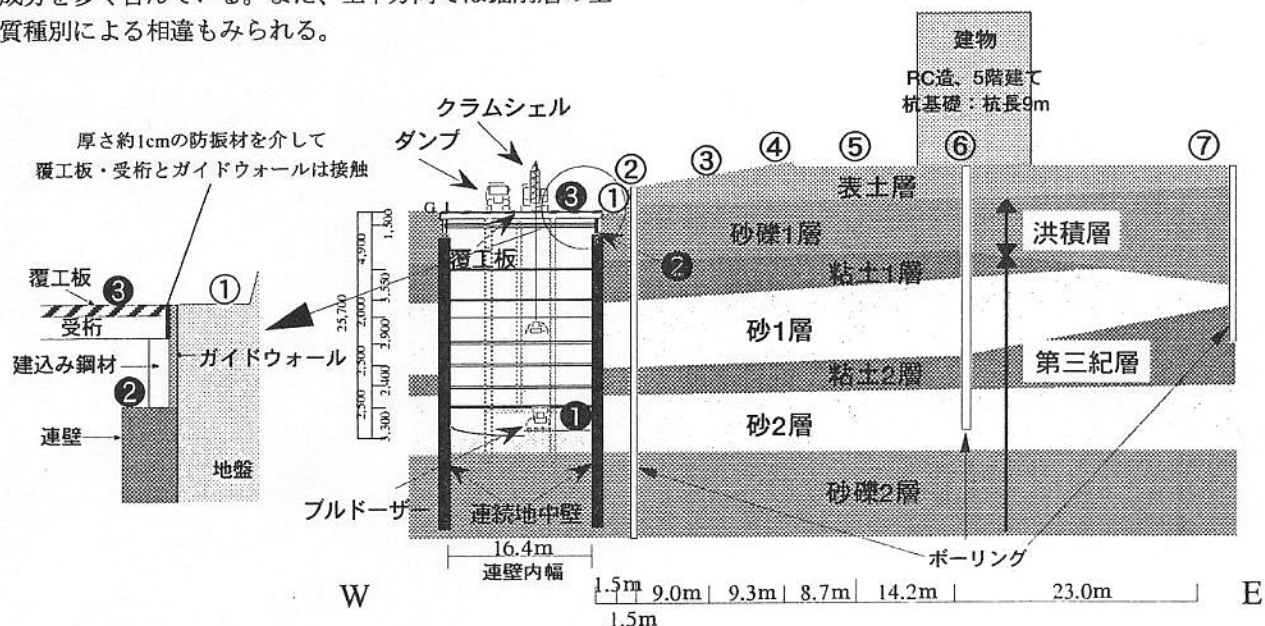


図2 周辺地盤断面推定図及び掘削現場の概略図、計測地点配置図（'98年内部掘削時及び'98年追加計測）

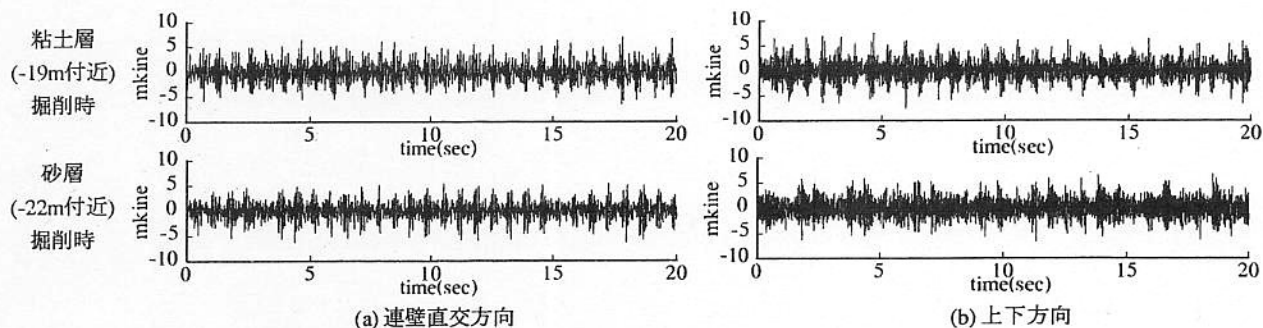


図3 連続地中壁掘削時（'97年計測）の①地点（掘削位置から14.5m）の速度波形

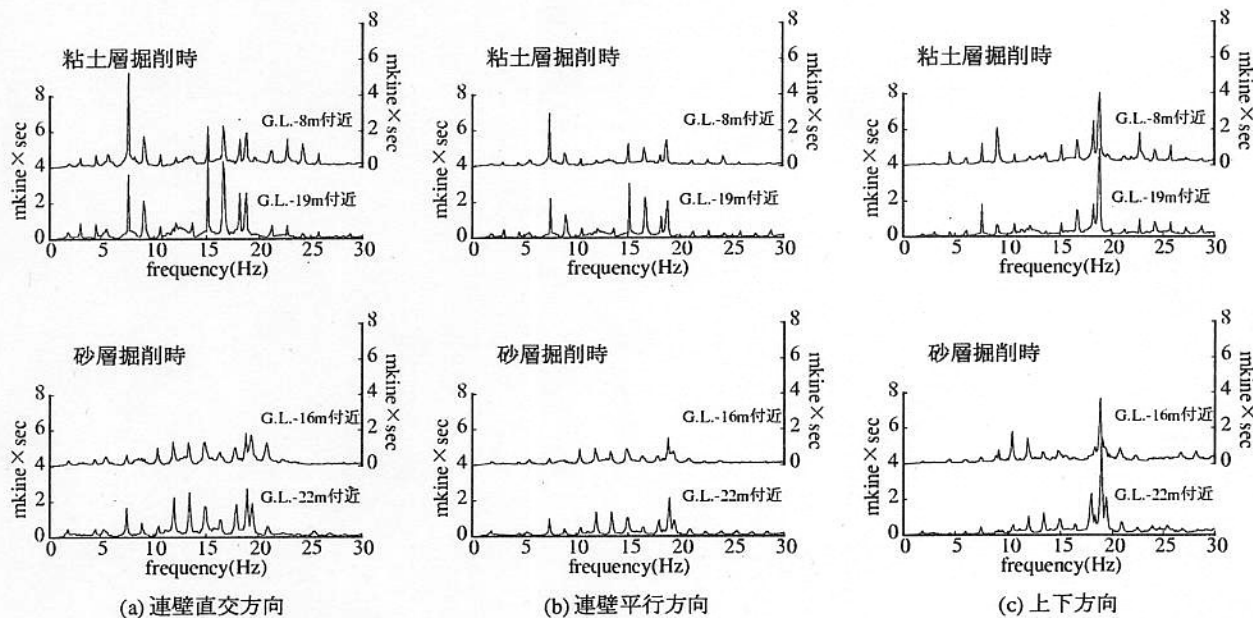


図4 連続地中壁掘削時（'97年計測）の①地点（掘削位置から14.5m）のフーリエスペクトル

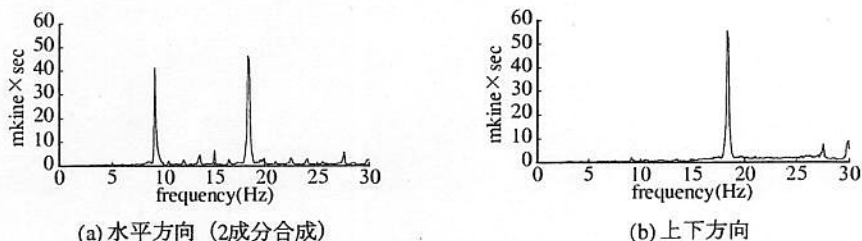


図5 連続地中壁掘削時（'96年追加計測）の泥水循環ポンプ近傍のフーリエスペクトル

る。図より泥水循環ポンプに起因する振動において、水平方向では9Hz、18Hz成分、上下方向では18Hz成分が大きく卓越する。このことから、図4の上下方向成分で掘削層の土質種別によらず大きく卓越する18Hz成分は、地表に設置された泥水循環ポンプに起因する振動と考えられる。'96年追加計測では、この他に連続地中壁の掘削時に使用される各種機械に比べて、泥水循環ポンプに起因する振動は大きなレベルとなることを確認している³⁾。

3.2 内部掘削工事によって発生する振動

両側の連続地中壁施工後に、内部の掘削工事が行われ

る。この際に発生する振動特性について、地下での作業と地上での作業（表1）に分けて考察を行う。計測中に稼働していた工事機械として、地下での作業時には①地点から約1～2m離れた所をブルドーザー（バケット容量：0.8m³）が往復しており、①地点から約5～15m離れた所では小型の機械による壁面はつり作業も断続的に行われていた。地上での作業時には、覆工板上のクラムシェル（つり上げ荷重：30t）により掘削面から土砂を引き上げ、覆工板上で停止しているダンプ（最大積載量：10t）に積み込む作業が行われていた。なお、ダンプ1台分の土砂を6～7回程度で引き上げている。

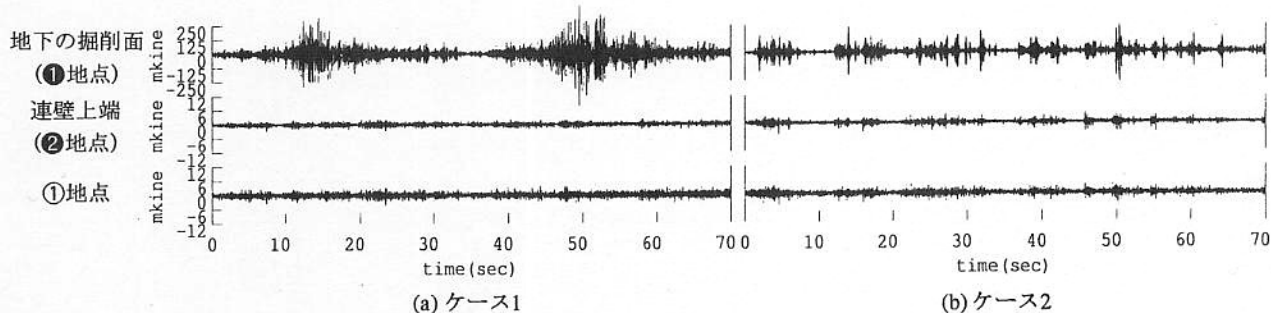


図6 内部掘削に伴う地下での作業時（'98年計測）の連壁直交方向の速度波形

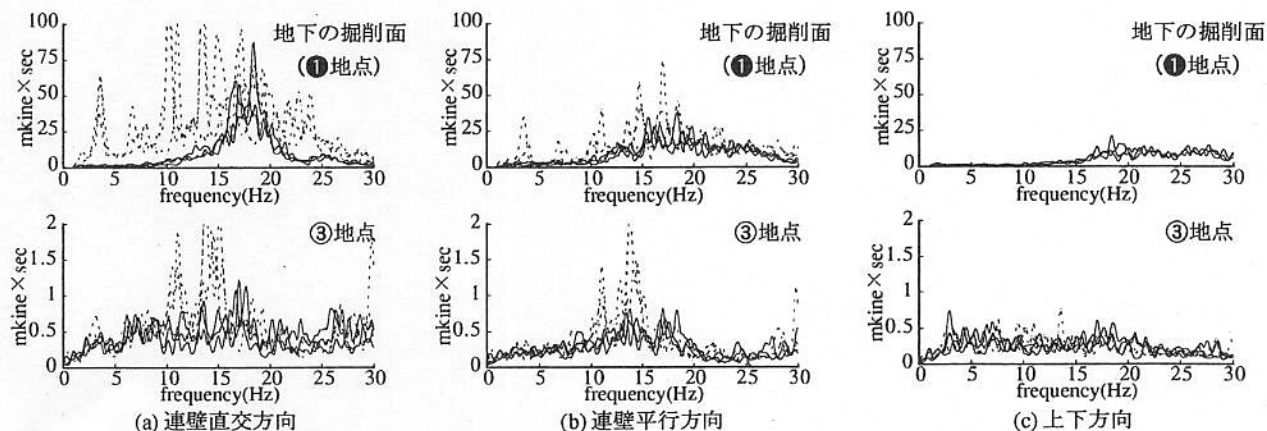


図7 地下での作業時（'98年計測）のフーリエスペクトル（破線：ケース1（3波）、実線：ケース2（3波））

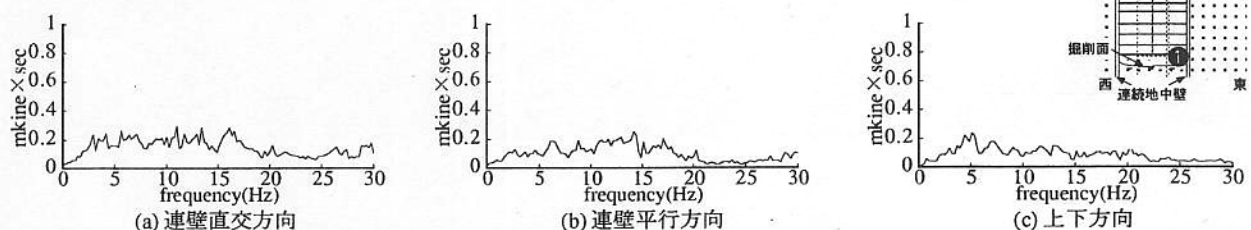


図8 地下で連壁に衝撃を与えた場合（'98年計測）の③地点のフーリエスペクトル

(1) 地下での作業

図6に地下での作業時に①、②、①地点で記録した連壁直交方向の速度波形を示す。波形の特徴から以下の2ケースが確認された。ケース1：①地点では紡錘形の大きな波形がみられるが、②、①地点との対応はみられないもの。ケース2：①、②、①各地点で対応の良い波形となっているもの。またケース2の特徴は、ケース1と比較して、他の時間区間でも長時間連続してみられる。現場での観察により、ケース2の特徴が現れる時間区間ははつり機械の稼働時間と対応が良いことを確認している。

地下の掘削面（①地点）と東側地中壁から12m離れた地表面の③地点について、それぞれのケースの特徴が確認された時間区間（8.192秒間）を抜き出し、バンド幅0.5HzのParzenウィンドウで平滑化を行ったフーリエスペクトルを図7に示す。各ケースについて3波づつを重ね書

きで示している。ケース1の地下の掘削面の上下方向成分は、計器の振り切れによりデータがとれていない。

まず、地下の掘削面の水平方向成分について両ケースの比較を行うと、ケース1（破線）とケース2（実線）の3波はそれぞれ同様の傾向を示しており、ケース1では10Hz付近、15Hz付近にいくつかのピークがみられるが、ケース2では現れていない。同様の特徴は③地点でも確認できる。上下方向については、地下の掘削面での比較はできないが、③地点ではケース1とケース2の差は小さい。次に、壁面はつり工事に対する参考として、連壁への衝撃時の4.096秒×9サンプルのデータによる③地点の平均フーリエスペクトルを図8に示す。3方向成分とも図7のケース2と類似のスペクトル形状を示している。

以上から、ケース2は主に壁面はつり工事による特性と考えられ、周辺地盤に伝播する振動には30Hz以下の振動

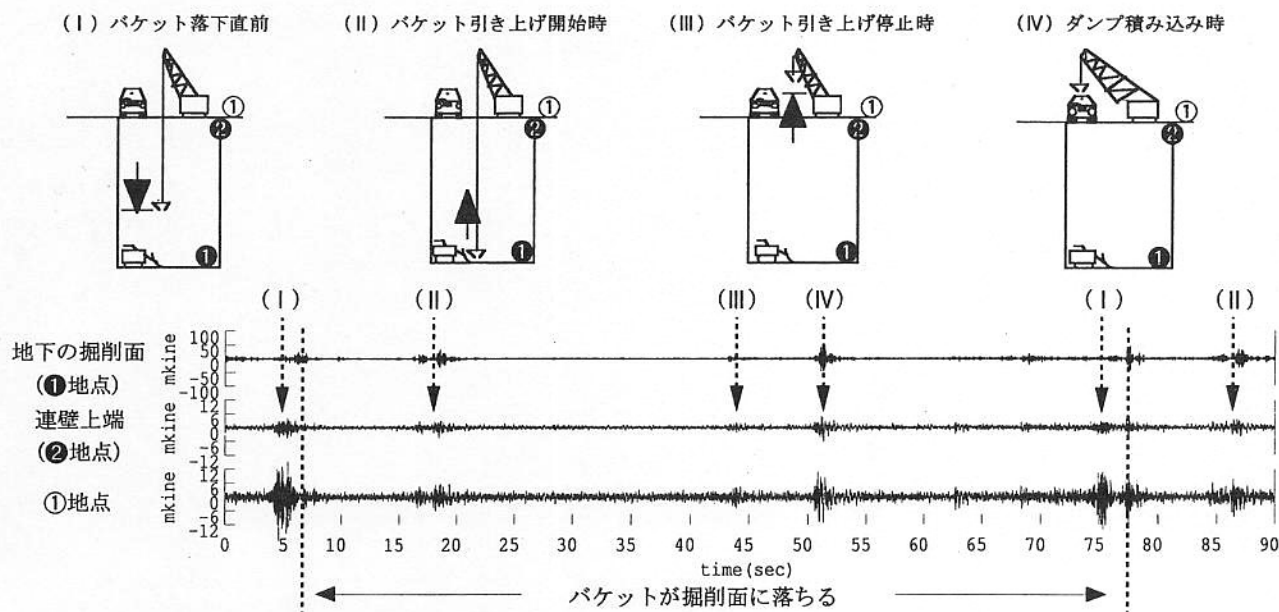


図9 内部掘削に伴う地上での作業時（'98年計測）の連壁直交方向の速度波形

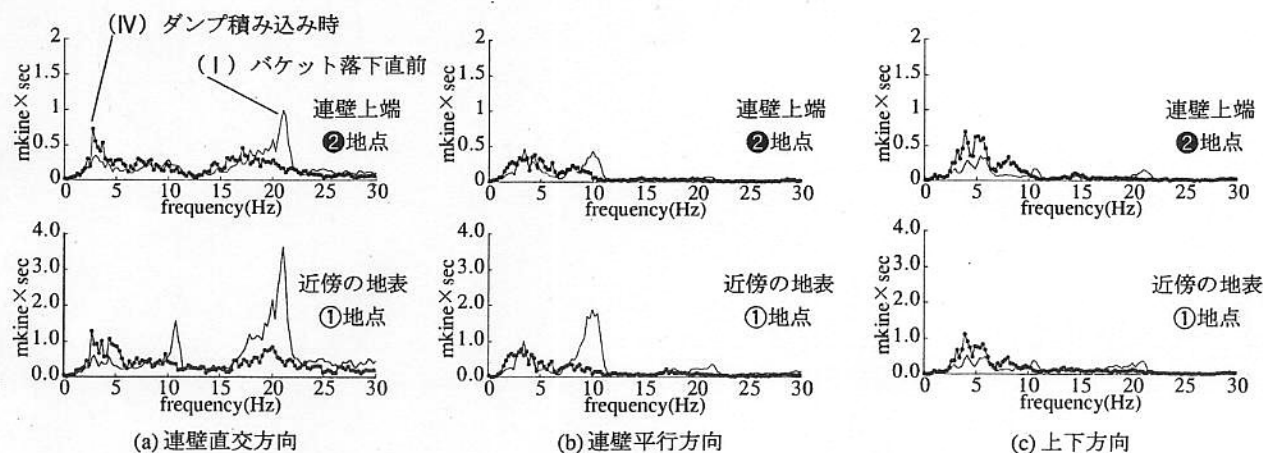


図10 内部掘削に伴う地上での作業時（'98年計測）のフーリエスペクトル

数域で広帯域の振動数成分が含まれることが分かる。一方ケース1は、地下の掘削面で、断続的に振幅が大きく、③地点では傾向がはっきりとしないことから、地下の掘削面での局所的な振動であることがわかる。また、地下の掘削面ではブルドーザーの走行位置に大きく影響され、紡錘形の波形となることが考えられる。従ってケース1は、ブルドーザーによる土砂の収集作業による特性と考えられる。周辺地盤では水平方向で影響が大きく、主要な振動数成分として10～15Hz成分が卓越している。

(2) 地上での作業

クラムシェルバケットによる土砂の引き上げから、ダンプへの積み込みの一連の作業時に、①、②、①地点で記録した連壁直交方向の速度波形を図9に示す。図に示す90秒間に2回、クラムシェルバケットを掘削面に下ろしている。(I)、(II)、(III)、(IV)で1回の作業サイクルとなっており、波形の特徴が再現性をもって現れていることが

分かる。他の時間区間及び他の方向成分でも、各作業に対応する波形のレベル及び特徴の再現性が確認されている。(I)はクラムシェルバケットが掘削面に落ちる数秒前に現れており、最も大きな振幅レベルとなっている。これは、バケットの落下速度を調節するために空中で一旦停止させる作業に対応しており、この際のクラムシェルの反動が覆工板に伝わったものであることが現場での観察により確認されている（以下では、'バケット落下直前'と呼ぶ）。これに比べると、バケットが掘削面に落ちた時の振動（図中の縦の破線の時刻）は、地中では大きい、近傍の地表面上では小さくなっている。(II)はバケットの引き上げ開始に伴う反動（以下、バケット引き上げ開始時）、(III)はバケットの引き上げ停止に伴う反動（以下、バケット引き上げ停止時）、また(IV)はダンプに土砂を積み込む際のクラムシェルの反動および積み込まれるダンプの振動であることが現場での観察から推測さ

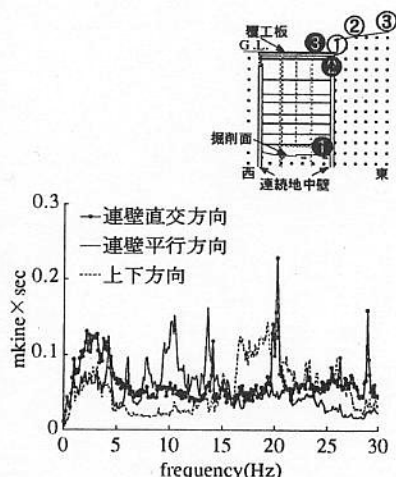


図11 ③地点の常時微動記録のフーリエスペクトル (98年追加計測)

れた(以下、ダンプ積み込み時)。図6と図9を比較すると、現場近傍の地表面上(①地点)では、地下での作業時と比較して地上での作業時により大きなレベルの振動が発生していることが分かる。

図9のなかでも特に大きな振幅を示している(I)バケット落下直前、(IV)ダンプ積み込み時の各作業に対応する時間区間について、バケット落下直前については4.096秒×9サンプル、ダンプ積み込み時には4.096秒×7サンプルによる平均フーリエスペクトルを図10に示す。②地点では①地点と比べて振幅がほぼ1/2となっている。この点については次項(3)で両地点間の伝達関数を用いて考察するが、両地点でのスペクトル形状の対応はよい。各方向で10Hz以上の振動数特性が異なり、バケット落下直前では連壁直交方向では20Hz付近、連壁平行方向では10Hz付近が大きく卓越する。これらの振動数成分には、クラムシエルの振動特性あるいは覆工板を含めた支保工構造の固有振動特性が関係していると考えられる。そこで、98年追加計測時の覆工板上(③地点)の常時微動記録から、8.192秒×41サンプルを取り出して求めた平均フーリエスペクトルを図11に示す。なお、前述の通り98年追加計測は、内部の掘削工程が終了し、地下のマットスラブも完成した後に実施した。連壁平行方向で、図10のバケット落下直前の振動で大きく卓越する10Hz成分は、図11の常時微動でも卓越がみられ、図11の連壁直交方向、上下方向では卓越がみられないことから、支保工構造の振動特性である可能性が考えられる。また、図10の連壁直交方向で大きく卓越する20Hz成分は図10の他の方向では明確な傾向が見られないことから、支保工構造の振動特性の影響を受けている可能性が高いと考えられるが、図11の常時微動記録から支保工構造の連壁直交方向の振動特性としてこの振動数域に大きな特徴は見られない。

また、図10の上下方向ではバケット落下直前、ダンプ積み込み時ともに3~7Hz付近に卓越がみられ、後者につ

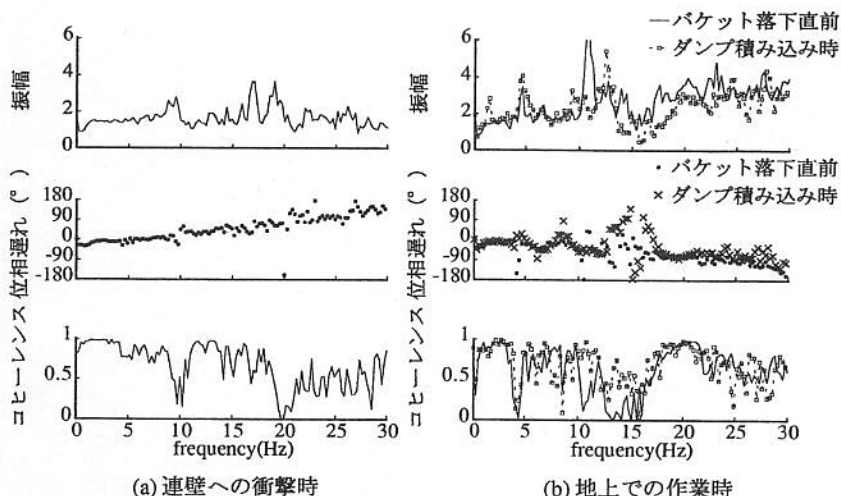


図12 連壁上端(②地点)に対する近傍の地表(①地点)の連壁直交方向の伝達関数とコヒーレンス(98年計測)

いては連壁直交方向でも3~7Hz付近に卓越が見られる。この振動数域には、覆工板上のダンプに土砂が積み込まれる際に励起されるダンプのパネ上の固有振動数⁹⁾も含まれていると考えられる。ダンプ積み込み時と比較して、バケット落下直前に高振動数域でより大きな卓越がみられる原因として、バケット落下直前ではクラムシエルの運転状況の変化(落下→停止)がより急激であったため反動が大きくなったと考察される。なお、紙面の都合で図は省略するが、バケット引き上げ開始時、バケット引き上げ停止時の時間区間については、ダンプ積み込み時と類似したスペクトル形状を示すが、3~5Hz付近の卓越が小さいという傾向を示した。

(3) 現場から周辺への振動伝播のメカニズム

(1)の地下での作業における連壁への衝撃時と(2)の地上での作業時について、連壁直交方向成分の②地点に対する①地点の伝達関数(4.096秒×9サンプルのデータから推定)を図12に示す。(a)連壁への衝撃時と(b)地上での作業時を比較すると、(b)では高振動数域で振幅が大きくなっている。また、(a)では①地点で位相が遅れており連壁から周辺地盤へ振動が伝わっているのに対し、(b)では②地点で位相が遅れている。またコヒーレンスをみると、(a)では10~20Hz付近が大きく、20~30Hz付近が低くなっているが、(b)では逆になっている。他の方向成分については、図は省いたが、連壁への衝撃時には連壁平行方向、上下方向ともに①地点で位相が遅れるが、地上での作業時には平行方向では両地点がほぼ同位相、上下方向では20Hz以上の高振動数成分で①地点で位相が進んでいる結果を示した。

以上のことから、地上での作業時には、連壁への衝撃時のように連壁→地盤という振動伝播経路にはなっていないことがわかる。図2で示したように防振材は存在するものの、覆工板・受桁から連壁を介さずにガイドウォールへ直接伝播する振動が存在すると考えられる。また、

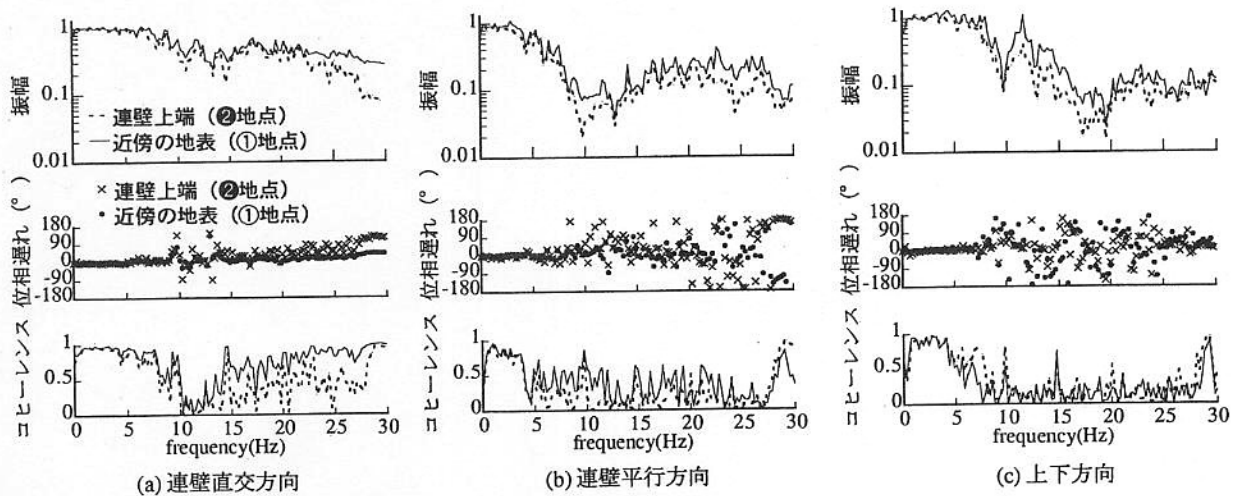


図13 覆工板上の③地点に対する連壁上端②地点および地表①地点の伝達関数とコヒーレンス（'98年追加計測）

連壁の振動には、覆工板・受桁から地盤を介して伝わるものと、建込み鋼材を介して伝わるものが存在すると思われる。さらに、伝達関数の振幅で連壁上端に対して①地点で振幅の大きい高振動数成分は、連壁上端で位相が遅れることを考慮すると、連壁に伝わりにくい振動数成分であると考えられる。以上のような原因により、図10で②地点の振幅が小さくなっていると考察される。

そこで次に、覆工板など支保工構造の振動特性が周辺地盤に与える影響について、'98年追加計測のデータを用いて考察を行う。'98年追加計測時には、覆工板上でクレーン車により、地下への資材搬入作業などが断続的に行われていた。クレーン稼働時の時間区間について、4.096秒×14サンプルのデータから推定した③地点に対する②地点及び③地点に対する①地点の伝達関数を図13に示す。振幅のみ、縦軸は対数軸となっている。連壁直交方向では、実線・破線とも他の方向成分と比較して、振幅、コヒーレンス共に大きな値を示しており、覆工板の振動がそのまま周辺地盤に伝播すると考えられる。平行方向では5Hz付近、上下方向では8Hz付近以降でコヒーレンスの低下が著しく、その様な振動数域では振幅も概ね1/10程度の値となっている。また、位相を見ると、平行方向、上下方向では、ほぼ位相差なしあるいはばらつきが大きいのにに対し、直交方向では比較的明確な位相遅れが見られ、①地点と比較して連壁上端（②地点）では位相

遅れが大きい。図12、図13を比較することにより、連壁直交方向成分では振動源によらず、覆工板の振動が直接周辺地盤へ伝播する経路が考えられ、工事振動の予測・対策を考える上で重要な要因となると考えられる。

また、連壁掘削時（'97年計測：-19m付近）及び、内部掘削時（'98年計測）の中でも大きな振動が発生する作業内容であるクラムシェル稼働時のバケット落下直前、ダンプ積み込み時に①地点で記録した最大速度を表2に示す。各工程・作業内容ごとに発生する平均的な振幅レベルを把握するために、平均フーリエスペクトルを算出したのと同様に、連壁掘削時には8.192秒×16サンプル、バケット落下直前については4.096秒×9サンプル及び、ダンプ積み込み時には4.096秒×7サンプルごとの最大振幅の平均値及び変動係数を示している。表2より、クラムシェル稼働時の連壁直交方向成分はバケット落下直前、ダンプ積み込み時ともに、他の方向及び連壁掘削時と比較しても大きな値となることがわかる。また、ダンプ積み込み時の連壁直交方向、上下方向では変動係数が大きくなっており、バケット内部及びダンプに積載済みの土砂の量などにより、ばらつきが大きくなっていることが考えられる。

次章では、それぞれの工程・作業内容に起因する振動で卓越が見られた振動数帯域に注目し、バンドパスフィルターをかけた波形に対し各サンプルごとに求めた最大

表2 各作業時に発生する①地点の最大速度(m/kine)の平均値と変動係数
上段：平均値、下段：変動係数

	連壁直交方向	連壁平行方向	上下方向
連壁掘削時 ('97年計測：-19m付近)	7.41 0.11	4.82 0.17	7.82 0.18
内部掘削時 ('98年計測：バケット落下直前)	15.50 0.20	7.13 0.13	3.32 0.18
内部掘削時 ('98年計測：ダンプ積み込み時)	8.47 0.35	4.44 0.14	5.63 0.30

振幅の平均値について、その距離減衰特性を検討する。

4. 工事振動の伝播と距離減衰特性

4.1 対象地点についての地盤の常時微動特性

工事振動の伝播特性の分析に先立ち、常時微動記録に基づいて対象地点周辺の地盤振動特性について考察する。'97年計測及び'98年計測時の常時微動記録の平均フーリエスペクトルを①、②、⑦地点について図14に示す。交通振動の影響がある時間区間を除いた静寂時のデータから、8.192秒の波形を'97年計測については16サンプル、'98年計測については23サンプル取り出している。図14によると、'98年計測の①地点では、連壁直交方向の振幅が大きくなっている。この傾向は内部掘削前の'97年計測では見られておらず、駅舎部分の掘削による切り欠きの影響が、壁剛性の小さい連壁直交方向で大きく現れていると考えられる。また②地点に注目すると、'98年計測では連壁直交方向で①地点で見られた傾向が見られる他、両計測時ともに、水平方向で10Hz付近の振幅が大きくなっている。この特徴は、内部の掘削によらず現れるため、図2に示したように約3mの崖地形となっている影響か、あるいはごく表層の地盤による局所的な影響が考えられる。⑦地点では、各方向の差異は小さく、いずれの計測でも類似したスペクトル形状を示している。

4.2 連続地中壁掘削時の振動伝播特性

連続地中壁掘削時のフーリエスペクトルの距離による変化を、'97年計測の-19m付近（粘土層）掘削時について、図15に示す。なお各地点間は直線で補間しており、縦軸は図により異なっている。この図から、振動源付近で卓越が見られた振動数成分が距離によって減衰しながら、遠方まで伝播していることがわかる。距離による振幅の変化の傾向は、方向や振動数により異なっている。

次に、'96年計測、'97年計測で共通して卓越が見られ、泥水循環ポンプに起因する振動と考えられる9Hz成分（8.7～9.4Hz）、18Hz成分（17.5～19.1Hz）のバンドパスフィルターをかけた波形に対し、前述のように各サンプルごとに求めた最大振幅の平均値の距離変化を図16に示す。なお、伝播経路での距離減衰特性を明確にし、異なる作業状況での特性を比較するため、縦軸は'96年については②地点、'97年については①地点との比で表し、横軸はそれぞれ②、①地点からの距離としている。図16左上には、'96年計測、'97年計測に対応する計測地点配置の概略図を示してある。'97年計測時には振動の伝播経路に既設の東側地中壁を挟むこととなるため、2回の計測を比較することにより、RC造連続地中壁による振動伝播の抑制効果に関する検討が可能である。

図16において、'96年計測と'97年計測との比較を行うと、上下方向の18Hz成分では'97年計測時に、既設連続地中壁の前後（①→②地点）で大きく振幅が減少しており、連壁の影響が現れていると考えられる。しかし、9Hz成分あるいは他の方向成分では明確な傾向は認められず、連壁直交方向の9Hz成分では'97年計測時の①→②地点間でむしろ振幅が増加している。この原因としては、前節の常時微動記録の分析で述べた②地点の水平方向成分に対する局所的な地盤状況の影響が考えられる。'96年計測時には②地点との比として曲線を描いているため、この影響が現れていない。しかし、②地点について同様の影響が見られた連壁平行方向では、①→②地点で直交方向成分のように明確な振幅の増加は見られておらず、従来から言われているように壁剛性が大きい

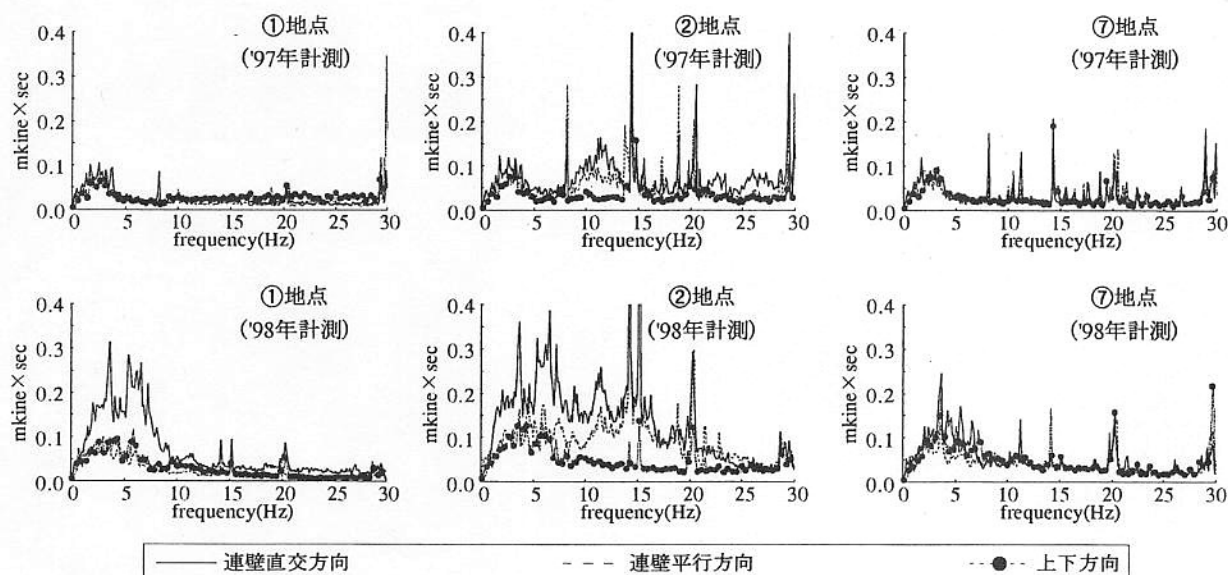


図14 常時微動記録のフーリエスペクトル（'97年、'98年計測）

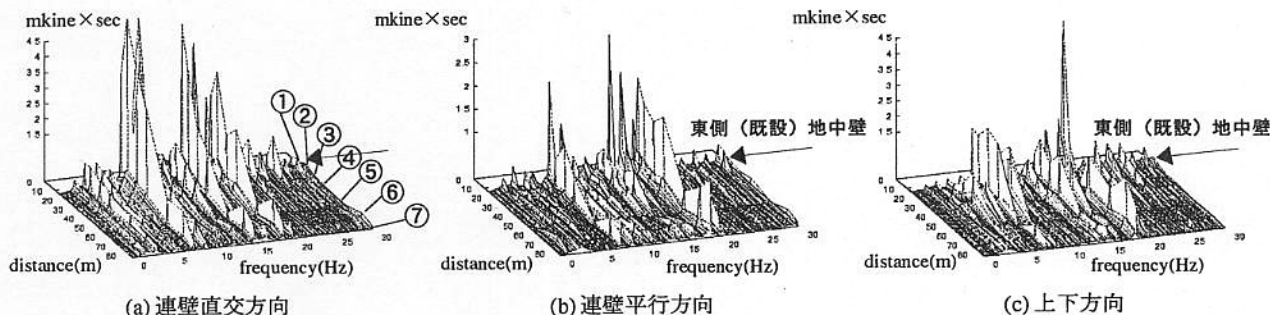


図15 連壁掘削時のフーリエスペクトルの距離変化（'97年計測：粘土層（-19m付近）掘削時）

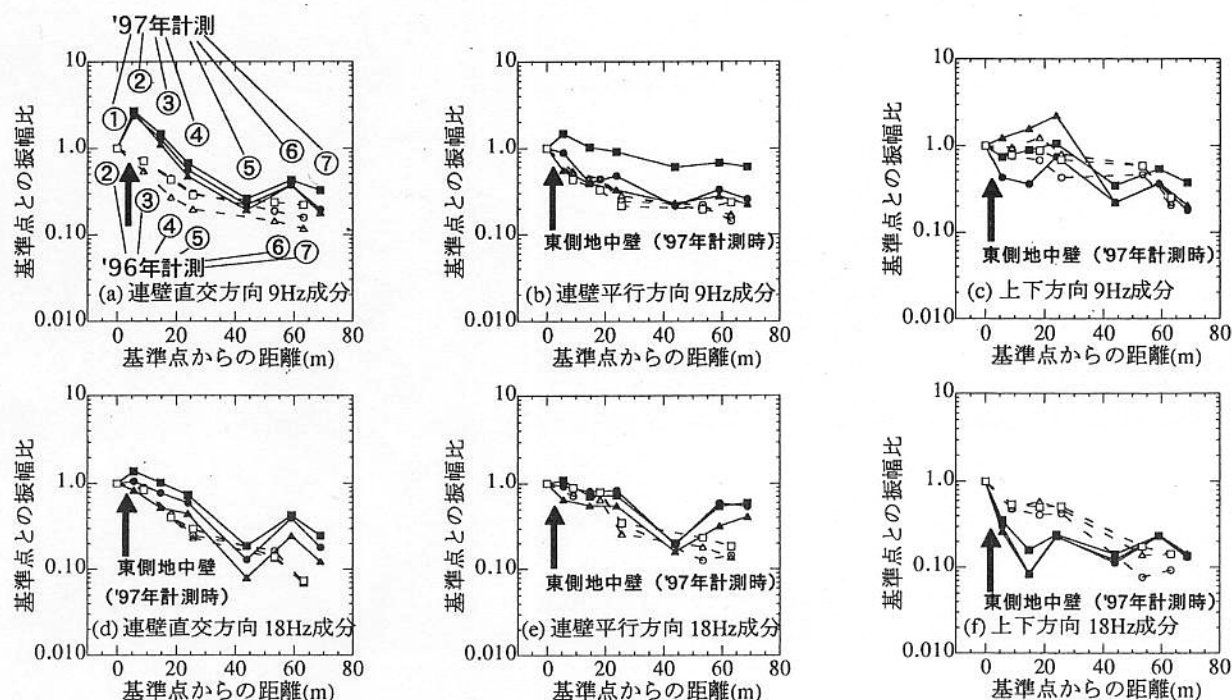
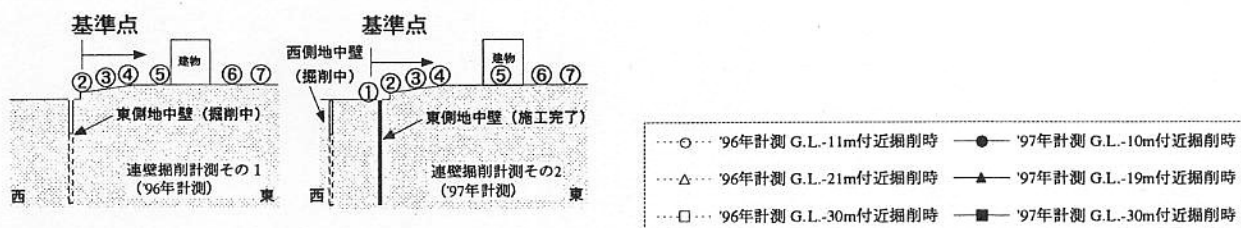


図16 連続地中壁掘削時の距離減衰特性に及ぼす既設連壁の効果

連壁の面内方向で抑制効果が大きいとも考えられる。これらから、連壁による影響と地盤条件の影響を明確に分離することは困難であると考えられる。

'96年計測と'97年計測の②地点以降の曲線の傾きを比較すると、各方向、振動数で概ね類似した曲線の傾きを示し、各方向とも18Hz成分で距離による減衰が大きく、掘削深度によるばらつきが小さい。また、'97年計測時には⑤地点は建物1F床となっており、各方向とも周辺地盤上の地点と比較して振幅が小さくなっている。特に、18Hz成分で低下量が大きくっており、建物基礎による

入力損失効果が現れていると考えられる。

4.3 内部掘削時の振動伝播特性

3.2節で述べた内部掘削時（'98年計測）に、地表面で大きな振動の発生が確認された覆工板上のクラムシェル稼働時の振動について、伝播性状の分析を行う。

クラムシェル稼働時のバケット落下直前の振動について、フーリエスペクトルの距離による変化を図17に示す。なお、各地点間は直線で補間しており、⑥地点は水平方向のみとなっている。図17から、振動源付近で卓越

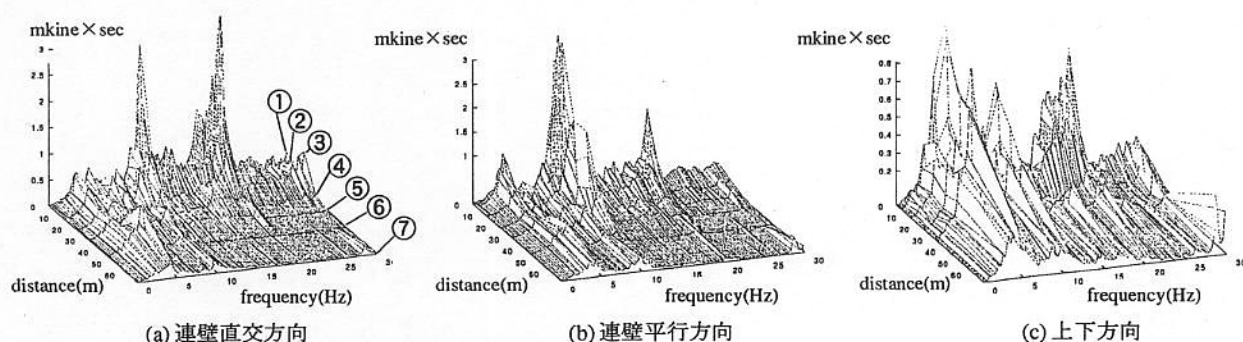


図17 内部掘削時のフーリエスペクトルの距離変化（'98年計測：バケット落下直前）

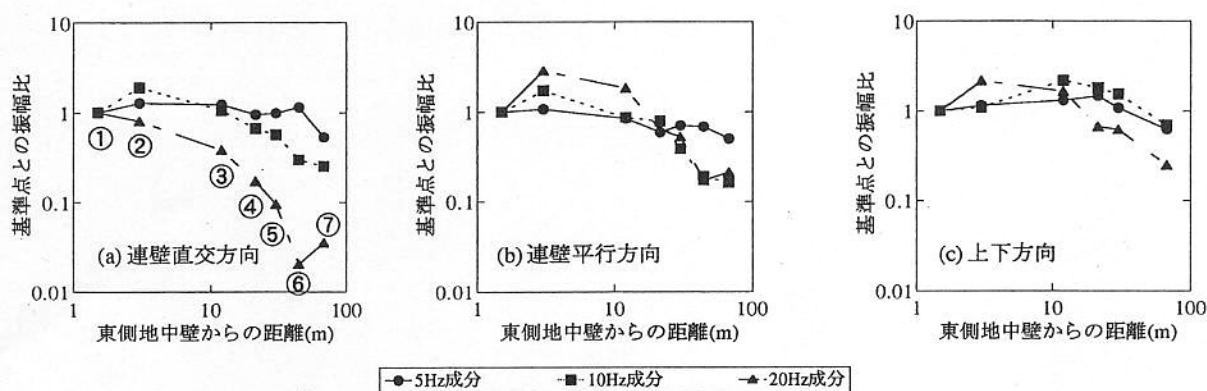


図18 内部掘削時の距離減衰曲線（①地点との振幅比）（'98年計測：バケット落下直前）

が見られた振動数成分が距離によって減衰しながら、遠方まで伝わっている事が分かる。また、各方向とも高振動数域で距離による減衰が大きいことが分かる。

バケット落下直前に卓越が見られた5Hz（3～6.7Hz）、10Hz（7.5～11.7Hz）、20Hz（16.5～22.3Hz）成分のバンドパスフィルターをかけた波形について、図16と同様に各地点での最大振幅の平均値を①地点との比で表したものが図18である。これより、特に連壁直交方向で高振動数成分ほど距離による減衰が大きいことがわかり、他の2方向でも②地点以降の曲線の傾きから同様の傾向が読みとれる。しかし、①→②地点間で増幅しているケースも多く、方向、振動数成分によらず複雑な距離減衰特性を示している。原因として連続地中壁の掘削時と同様に、地点ごとの地盤振動特性の影響も考えられるが、以下では別の観点からの検討を試みる。

まず、バケット落下直前の振動について、4.096秒×9サンプルのデータから求めた①地点と②地点のコヒーレンス関数を図19に示す。同じ方向成分間の場合（直線）と、①地点の連壁直交方向と②地点の各方向成分との場合（破線）を比較している。この図から、同じ方向間の場合は、上下方向と連壁直交方向で相関が高く、連壁平行方向でやや低いことがわかる。一方、①地点の連壁直

交方向と②地点の各方向成分との場合は、概ね15Hz以上で相関が高く、特に連壁平行方向では19Hz、21Hz付近で①—②地点の同方向間よりむしろ相関が高くなっている。以上から、②地点の15Hz以上の振動数域には3方向ともに、①地点の連壁直交方向と相関の高い成分が多いことがわかる。これは、3.2節で示した支保工構造から連壁を介さずに周辺地盤に伝播する振動など、地盤への入力振動には連壁直交方向成分が優勢であるためと考えられる。また以上のように、②地点の連壁平行方向、上下方向成分には入力の直交方向成分に対する応答が含まれているため、①地点との振幅比としている距離減衰曲線（図18）では①→②地点で増幅すると考えられる。

また、水平方向のみのデータとなるが、建物内の⑥地点では連続地中壁の掘削工事時と同様に建物基礎の入力損失効果が現れているが、20Hz成分について振動源から建物を挟んだ位置となる⑦地点では建物内より振幅が大きく、建物の先へ伝播する地盤振動成分が存在する。

当該地盤周辺のPS検層結果（図20）に基づいて、工学基礎と考えられる $V_s=530\text{m/s}$ の層までを考慮して算出したレーリー波の理論分散曲線を図21に示す。これから図18で3方向成分ともに距離減衰が小さかった5Hz成分は、レーリー波の群速度が極小となるエアリー相に近接して

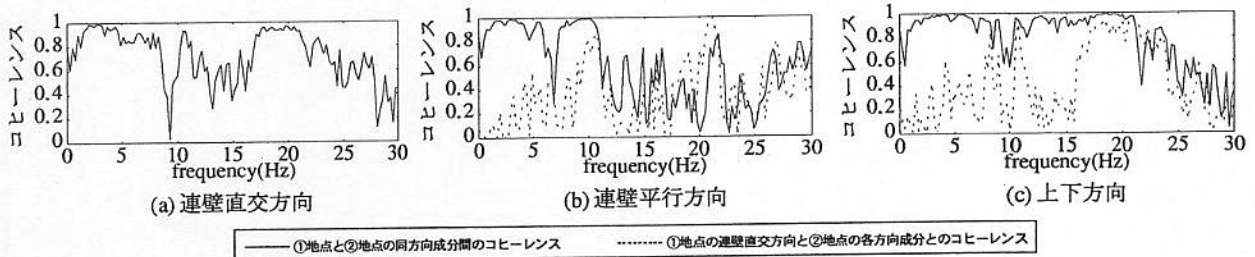


図19 内部掘削時の①地点と②地点のコヒーレンス関数（'98年計測：バケット落下直前）

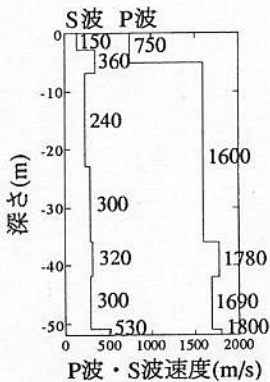


図20 地盤のPS検層結果

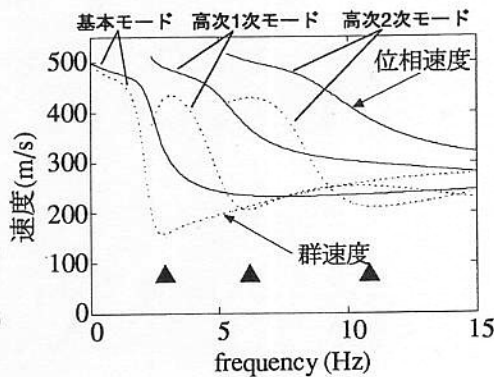


図21 レーリー波理論分散曲線

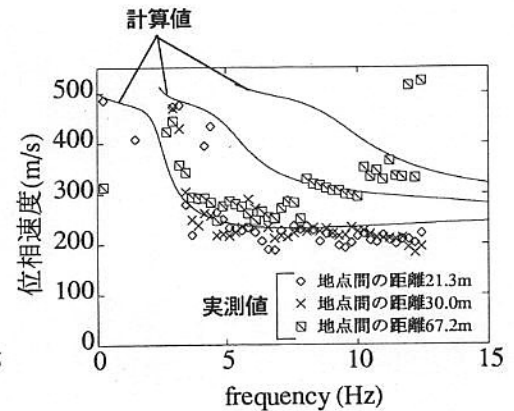
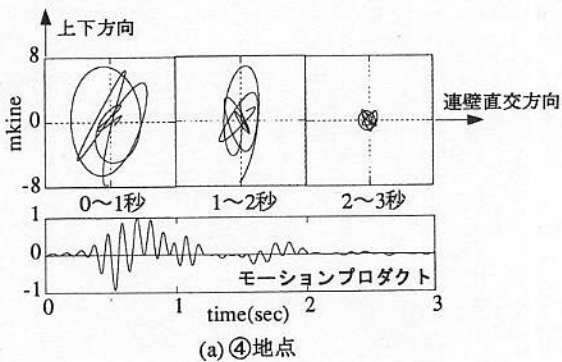
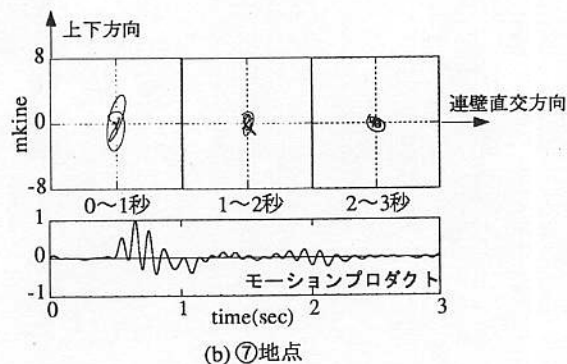


図22 上下方向成分の位相速度



(a) ④地点



(b) ⑦地点

図23 軌跡とモーションプロダクト（連壁直交－上下方向）
（'98年計測：ダンプ積み込み時、5Hz(3～6.7Hz)成分）

いることが分かる。また、ダンプ積み込み時の上下方向成分の振動について、3組の2地点間（地点間の距離：21.3m、30.0m、67.2m）のクロススペクトルから求めた位相速度を図22に示す。距離あるいは振動数によりばらつきはあるものの、実測値と計算値は概ね対応している。そこで、ダンプ積み込み時に対応する時間区間（3秒間）の5Hz成分について、④、⑦地点での速度軌跡（連壁直交方向－上下方向）及び最大値を1に基準化したモーションプロダクトを図23に示す。軌跡、モーションプロダクトともにおおむねレーリー波的な動きを示しており、実測値と分散曲線との対応とともに総合的に判断すると、地盤を伝播する振動には表面波が多く含まれていると考えられる。また、図22において2地点間に建物を挟む地点間距離67.2mの場合は、8Hz以上の高振動数域で、基本モードよりはむしろ高次モードと対応する傾向があり、建物を挟んで伝播する表面波の特性と考えられる。

4.4 距離減衰特性に関する総合的な検討

'96年計測、'97年計測、'98年計測のそれぞれで共通してデータが得られている②～⑦地点での振幅の変化の傾向から、地下鉄駅建設工事に伴う振動の距離減衰特性について総合的な分析を行う。各計測時に振源付近で卓越がみられた振動数成分について、②地点を基準とした距離減衰曲線を図24に示す。'96年、'97年計測の9Hz成分と'98年計測の10Hz成分（10Hz付近）及び'96年、'97年計測

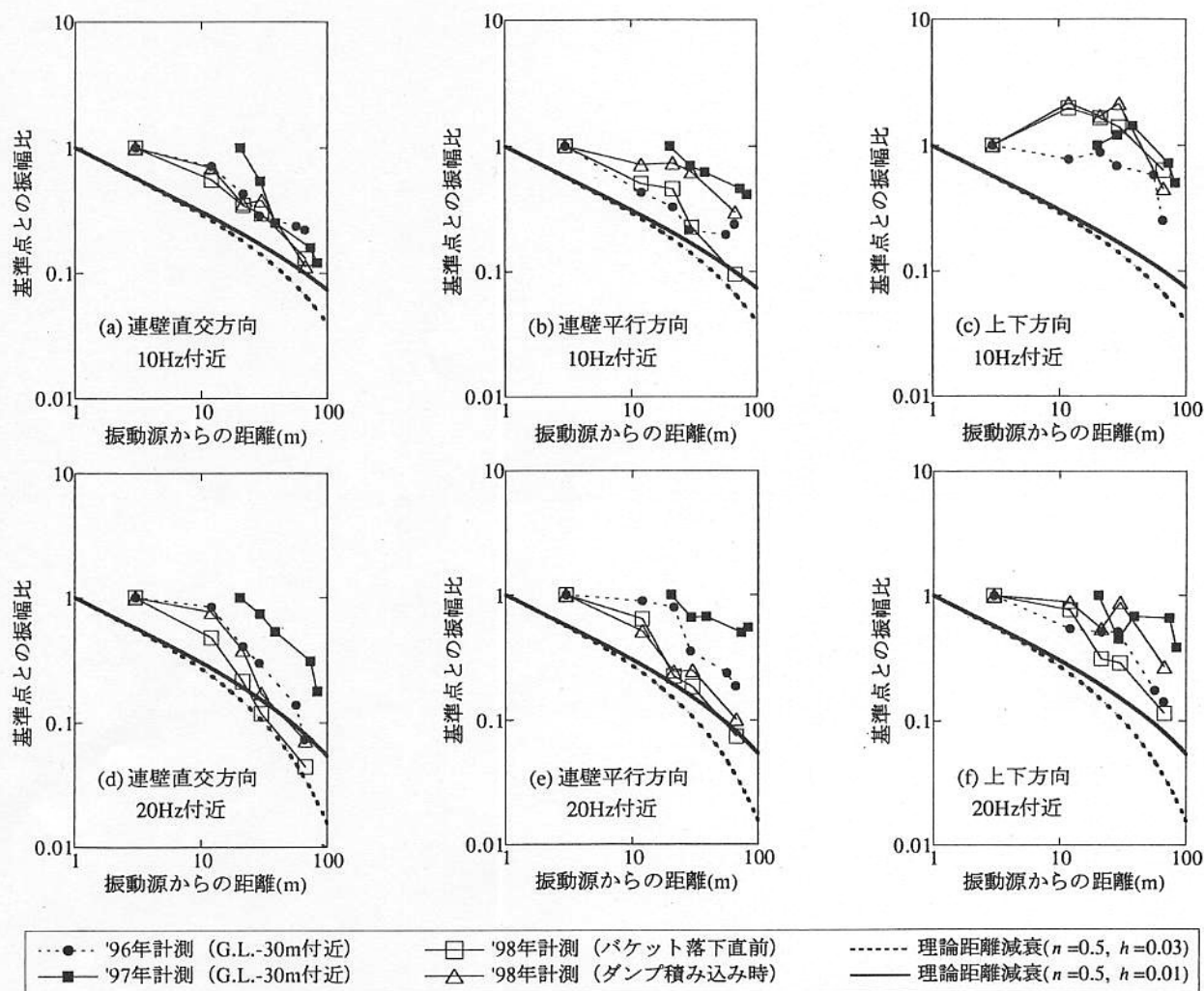


図24 距離減衰曲線の比較 (連壁掘削: '96年計測, '97年計測、内部掘削: '98年計測)

の18Hz成分と'98年計測の20Hz成分 (20Hz付近) の重ね書きで示している。なお、建物1F床となっている'97年計測の⑤地点及び'98年計測の⑥地点のデータは除いている。また、理論距離減衰式(例えば10)は

$$\frac{A}{A_0} = r^{-n} \cdot \exp\left(-\frac{2\pi f h}{V} \cdot r\right) \dots\dots\dots (1)$$

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 、 n 、 V は振動数、内部減衰定数、距離減衰係数、弾性波速度 (200m/sとした) を表している。図24の横軸 (距離) は振動源からの距離をとっており、'96年、'98年計測については東側地中壁からの距離、'97年計測については西側地中壁からの距離となっている。理論距離減衰式による曲線については、振動源からの距離1mでの値で基準化 (振幅比が1) している。このように、基準点の距離がまちまちなので、振幅比そのものではなく、傾きの一致度合いに注目する。図より、連壁直交方向では、10Hz付近、20Hz付近ともに各

計測での曲線の傾きは概ね一致しており、距離減衰係数 $n=0.5$ (点振源からの表面波)、減衰定数 $h=0.03$ とした理論曲線 (破線) の傾きと良い対応を示す。これは、前節で示したように、地盤を伝播する振動には表面波成分が多く含まれること、あるいは従来から言われている地盤の内部減衰定数の概略値に対応する。また、距離が小さいところでは曲線の傾きが緩く、振源付近では面振源的な傾向を示しているとも考えられる。連壁平行方向においても、直交方向と同様に理論曲線との対応が良いケースが多いが、各計測間のばらつきが大きくなっている。上下方向については、20Hz付近の振動数成分では、概ね理論曲線に対応するが、10Hz付近の振動数成分では、大きく異なった傾向を示している。このような傾向は各計測でほぼ同様にみられているが、振動の伝播経路に既設の地中壁が存在する'97年、'98年計測で顕著である。従って、連壁の下端などから地盤に伝播する実体波の混在なども考えられるが、この点については、今後、数値解析などにより詳細な検討が必要と思われる。

5. まとめ

本論文では、連続地中壁工法による地下鉄駅建設工事を対象として、連続地中壁の掘削から駅舎部分の掘削に至る各工事段階ごとに発生する振動特性及び、周辺地盤内の振動伝播特性について分析を行った。

工事に伴って発生する振動特性は、様々な作業状況・工事機械の影響を受けるものであり、それぞれの工事内容に応じた詳細な検討が必要である。本論の分析では、地中壁掘削時の泥水循環ポンプあるいは内部掘削時のクラムシエルによる土砂の引き上げ作業は、掘削作業そのものと比較しても大きなレベルの振動が発生することが明らかになった。このような場合、連壁直交方向の振動成分は、既設の地中壁による振動伝播の抑制効果も小さく、覆工板上の振動は大きな振幅レベルで周辺地盤へ伝播するため注意が必要である。本論で対象とした、内部掘削時に覆工板上で工事機械が稼動する本体利用の連続地中壁工法は、今後も増加が予想される。また、通常の建築物の地下掘削工事において、乗り入れ構台を用いる場合に発生する振動特性を予測する際に、今回の分析結果を適用できる可能性もある。従って、覆工板などの支保工構造と周辺地盤との接触面は、工事振動対策を考える上でも重要なポイントであり、種々の防振材、あるいは絶縁することによる振動抑制効果についての検討が重要である。

また、今回分析を行った周辺地盤内の振動には表面波成分が多く含まれており、距離減衰曲線は、距離減衰係数を0.5とし内部減衰定数を考慮した理論距離減衰曲線に概ね従う傾向を示した。しかし、既設の連壁下端から伝播する実体波の影響や表層地盤特性の局所的な影響などについては、今後詳細な検討が必要である。本論で明らかになった振動発生源からの振動伝播のメカニズムを考慮し、振動源のモデル化を含めた数値解析によるパラメトリックな分析を今後の課題としたい。

謝辞

本論文を作成するにあたって、振動計測や波形の一次処理などにご協力下さいました名古屋大学・美原義正技官、八木茂治氏（現：株式会社飯島建築事務所）、植田三月氏（現：株式会社飯島建築事務所）をはじめとする名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻構造設計工学講座の旧・現教官ならびに学生の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西阪理永、福和伸夫：交通振動問題における車両動荷重特性に関する研究—平面道路における自動車交通振動問題に関する研究（その1）—、日本建築学会構造系論文集、No.491、pp.65～72、1997.1
- 2) 入江康隆、寺坂康成：自動車により引き起こされた地盤振動の距離減衰、構造工学論文集、Vol.41B、pp.123～128、1995.3
- 3) 新井洋、若井修一、時松孝次：距離減衰から推定した交通振動源のスペクトル特性と地盤の減衰定数、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、Vol.1、pp.1059～1064、1998.11
- 4) 坪井利弘、多賀直恒、杉山武、今岡克也：杭打撃による振動伝播性状、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、B、pp.825～826、1989.10
- 5) 花里利一、岸田英明ほか：大径PHC杭の打込み試験における地盤振動の実測その1～その4、土質工学研究発表会論文集、第22回pp.1229～1234、1987.6、第23回pp.1497～1498、1988.6、第24回pp.1371～1372、1989.6
- 6) 花里利一、岸田英明：杭基礎工事に伴う環境振動に関する研究—場所打ち杭の施工現場における振動実測と打込み工法による地盤振動レベルの実測結果との比較—、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、B、pp.1305～1306、1992.8
- 7) 内藤禎二：連続地中壁工法の展望、土と基礎、Vol.41、No.9、pp.25～30、1993.9
- 8) 植田三月、飛田潤、福和伸夫、西阪理永：名古屋大学周辺の連続地中壁施工時の工事振動に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、D-1、pp.261～262、1997.9
- 9) 奈良岡浩二、福和伸夫、渡辺宏一、塩谷清人、箕輪親宏：大型振動台加振時の周辺地盤の振動性状と振動抑制に関する実験・解析的研究、構造工学論文集、Vol.35B、pp.195～204、1989.3
- 10) 石田勝彦：4.1 地震波の伝播、地震荷重—その現状と将来の展望、日本建築学会、pp.94～99、1987.11
- 11) 片山貴裕、飛田潤、福和伸夫、西阪理永、植田三月：連続地中壁の掘削工事に伴う振動の発生と伝播に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、D-1、pp.295～296、1998.9
- 12) 若山武彦、片山貴裕、飛田潤、福和伸夫：地下鉄駅建設時の掘削工事に伴う振動の発生と伝播に関する研究（その1）、（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、D-1、pp.337～340、1999.9