

# TBMによる硬岩掘削に伴う 振動、騒音特性について

萩森健治<sup>1</sup>・牧野卓三<sup>2</sup>・大塚勝司<sup>3</sup>・浜田元<sup>4</sup>・岩垣富春<sup>5</sup>・中川浩二<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 (株)奥村組本社土木部 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

<sup>2</sup>正会員 (株)奥村組東北支店土木部 (〒981-0914 仙台市堤通雨宮町2-25)

<sup>3</sup>正会員 (株)奥村組関西支社土木部 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

<sup>4</sup>正会員 工修 (株)奥村組東京支社土木部 (〒107-0051 東京都港区元赤坂1-3-10)

<sup>5</sup>本州四国連絡橋公団第一建設局 (〒651-0088 神戸市中央区小野柄通4-1-22)

<sup>6</sup>正会員 工博 山口大学工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2557)

住宅地直下の硬岩トンネルを直径5m級のTBMにより掘削する工事において、掘削時に振動・騒音を計測しスペクトル解析を行ってその特性を明らかにした。掘削時の振動レベルは、直上の集合住宅(TBMからの距離が約25m)で60dB前後で、騒音レベルは50dBであった。振動速度はTBMから測点までの距離の1.8乗に逆比例する傾向が認められた。住民からは振動、騒音に対する不快感や睡眠の妨げなどの苦情があった。集合住宅(4階)に伝播した振動は、水平成分は5Hz, 30~60Hz, 90~100Hz, 鉛直成分は30~60Hz, 80~110Hzの周波数成分が卓越しており、集合住宅付近の地表での騒音、低周波音のスペクトルとよく対応していることから、騒音および低周波音は、集合住宅の振動により二次的に生じた固体音であると考えられる。

*Key Words: tunnel boring machine, rock tunnelling, vibration and noise*

## 1. まえがき

我が国のトンネル掘削の歴史の中でTBMは過去に何度か脚光を浴びた時期があった。しかし、そのたび毎に実施工等におけるいくつかの問題点が指摘されることが多くあり、広く普及するまでには至らなかった。ここ数年再びTBMが目目されるようになり、施工事例の増加が見られる。この理由について日本トンネル技術協会<sup>1)</sup>の資料によれば次のことが述べられている。

- ・TBMは発破工法と比べて機械化、自動化が進められており、トンネル工事の急速施工、省力化や安全性の向上といった要請に対応しやすい工法である。
- ・複雑な地質にも対応できるようなTBMの改良が進み、その結果システムとしての信頼性が向上した。

一方、TBMの用途をみると、国内の施工件数は下水道の建設に対するものももっとも多く、それについて発電用導水路、上水道となっており、これら水路用途に対するものが約80%を占めている。このうち上下水道については、上下水道の都市部あるいは都市近郊部への建設が要求されるに伴い、TBM掘削の事例が増加したものと思われる。すなわち、都市部あるいは都市近郊部のトンネル掘削において硬岩掘削が必要となる場合、発破掘削採用の困難さから低公害の硬岩掘削工法としてTBM

が採り上げられてきたものと考えられる。

最近ではTBMは上下水道トンネル建設に対するもののみならず、道路トンネルに地質調査と避難坑掘削とを兼ねて採用されるなど、その用途も拡大する方向にある。それに伴って、民家等にきわめて近接したトンネルをTBMによる工法で計画される機会も増加するものと考えられる。TBMは前述のように低公害の掘削工法であることを大きな特長とするが、このようなケースでは、たとえTBMを用いたとしても振動、騒音の問題を伴う可能性がある。しかし、これまではTBMによる掘削工事で振動、騒音が問題とならなかったためか、この問題に関する研究はほとんど見られない。

筆者らは、集合住宅の直下のトンネルをTBMで掘削する際に、振動、騒音の計測解析を行い、周辺への影響を検討した。本トンネルは3車線の道路トンネルでその導坑をTBMで掘削したもので、一部の区間では鉄筋コンクリート造の5階建集合住宅の最短15m直下を通過する。この区間ではTBMによる掘削中に集合住宅の住民から振動、騒音による不快感と睡眠に対する障害による苦情が発生した。そこで、集合住宅付近の地表とトンネル坑内で振動、騒音の計測と解析を行い、周辺への影響を検討し、今後有用と思われる知見が得られたのでその結果を述べる。

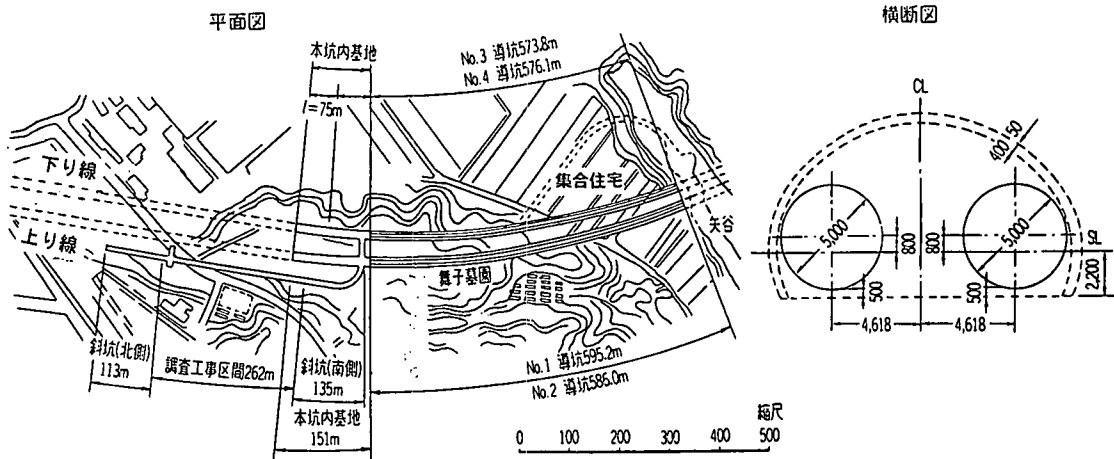


図-1 TBM施工位置概要

## 2. TBM掘削に伴う振動・騒音に関する既往の研究

(社)日本電力建設業協会による「TBM工法による施工事例調査報告書」<sup>2)</sup>では、26件の施工事例でTBM工法の採用に際して重視した理由のうち、最大件数のものとして振動、騒音が少ないことを挙げている。これを裏付けるように、この報告書ではTBMの振動・騒音が問題となった事例に関して記述したものは26件中わずかに1例のみである。それによると、人家の密集する地域で花崗岩を対象として土被りが14~28mの条件下で直径2.8mのTBMでトンネル掘削が行われた。このときの地表での振動レベルは距離が10~20mで50~58dB、卓越周波数は50~60Hzであった。家屋への被害はなかったが、微振動に対する訴えがあり、これと同時に発生したと思われる低周波音も伴って不快感を訴える苦情が発生したと報告されている。

一方、海外では例えば地質条件とTBMの径が異なる5件の工事での振動計測事例を紹介した文献<sup>3)</sup>が見られる。これによれば最大振動速度は地質条件とTBMの径に左右されるが、 $\phi 5.6$  mのTBMではTBMからの距離が4mの地点で0.8~0.9cm/s、10m地点では0.2cm/sとなり、振動速度は距離の1.5乗に比例して減衰し、卓越周波数は30~90Hzである。近接施工では不眠・不快感の苦情はあるが家屋の損傷はなく、40m以遠では苦情もなかったと報告されている。

以上の文献によれば、TBMを用いた施工では10m程度の近接施工では、家屋の損傷はほとんどみられないが、不眠や不快感などをもたらす問題が生じる可能性があると考えられる。また、硬岩に対してはTBMの掘進速度が概ね日進10m以上は可能であることを考慮すれば、個々の家屋で住民がこのような影響を受ける期間はせいぜ

い数日間であると思われる。しかし、地域住民の振動・騒音に対する意識の高まりに応えるといった社会的要請からは、TBM掘削に伴う振動・騒音の特徴を把握し、何らかの対策を検討することが重要である。

## 3. TBMによる硬岩掘削計画と予想される振動、騒音

### (1) TBM施工計画

本研究の対象としたトンネルは明石海峡大橋につながる神戸側陸上部に位置し、片側3車線のトンネルを2本併設する構造となっている。

トンネルの延長は約3.3kmで、地質は中央部の1/4区間が硬質の六甲花崗岩であり、両側の残りの3/4区間が大阪層群と呼ばれる未固結砂礫層である。この六甲花崗岩部の本坑断面内にずり搬出用として導坑を先行して掘削することになり、この掘削工法として掘削径5mのTBMを採用したものである。

導坑は図-1に示すように一つの断面内に2本配置されるが、これは本坑掘削時の振動低減と掘削効率の向上を意図したものである。導坑1本の延長は約600mで上り線、下り線内にそれぞれ2本ずつの合計4本で、総延長は約2,400mとなる。

これらの導坑の掘削にTBMが用いられた理由は下記の通りである。

- ①花崗岩部のうち約150mの区間では住宅地域の直下の施工となるため振動の少ない掘削工法が要請される。
- ②本坑掘削のずり搬出ルートとして利用する導坑を早期に施工する必要がある。

TBMはルーフシールド付きのオープン型であり、仕様を表-1に示す。これらの4本の導坑の掘削手順は次の通りである。まず最初のNo.1導坑(上り線内側、図-1参

表-1 TBMの仕様

掘削径	5,000mm	カット電動機	150kW×6=900kW
機長	19,470mm	カットトルク	108tf・m
全長	59,970mm	カット回転数	7.5rpm
重量	260tf	カット径	394mm
出力	1,080kW	カット数	37個
推力	212tf×4=848tf	後続台車	3台
グリップ押付け力	1,048tf	ベルトコンベア	600W 248m <sup>3</sup> /h

照)を掘削し、掘削終了後カットヘッドの外周部を取り外して掘削した導坑内を発進基地まで後退させ、横移動する。次にNo.2導坑(上り線外側)を掘削し、同様に発進基地まで後退する。このような施工を順次繰り返すことによりNo.3導坑(下り線外側),No.4導坑(下り線内側)を掘削する。地質は一軸圧縮強度が150~250MPaの花崗岩で、弾性波速度は4~5km/sである。途中に弱層部が1箇所あるのみで、全体として亀裂や湧水の少ない良好な地山である。

## (2) TBM掘削に伴い予想される振動,騒音

各導坑4本とも到達側約150mの間では鉄筋コンクリート造の集合住宅の直下を土被り15~20mで通過することになる。前述の文献によれば、距離が15~20mでは最大で60dB程度の振動が生じ、住民からの苦情が発生する可能性もあるが、振動による家屋への損傷はほとんどないものと想定された。また、騒音に関しては検討の対象とすべき資料が得られなかった。

このことから、実際の対応としては実施工に伴い発生する振動,騒音を感知あるいは計測し、県条例で定められた規制値と照合しながら詳細な検討あるいは対応を加えることとした。

振動規制に関しては、兵庫県条例では特定建設作業に伴う振動が敷地境界において振動レベル値で65dB以下に規制されている。そこで、実施工における振動レベルの管理値としてこの規制値をもとに屋内に伝搬するときの増幅分として5dB,安全側の割増し分として5dBを目安として、屋外測点での振動レベルを55dBとした。

## 4. 住宅地直下の掘削に伴う振動

### (1) 振動レベル計,騒音計による振動の概略計測

前述の施工計画時の振動予測では、振動による住民からの苦情が発生する可能性が予測されたので、問題となるほどの振動が生じるかどうかを確認する目的で、No.1導坑の施工に際して公害振動レベル計による振動計測を行った。

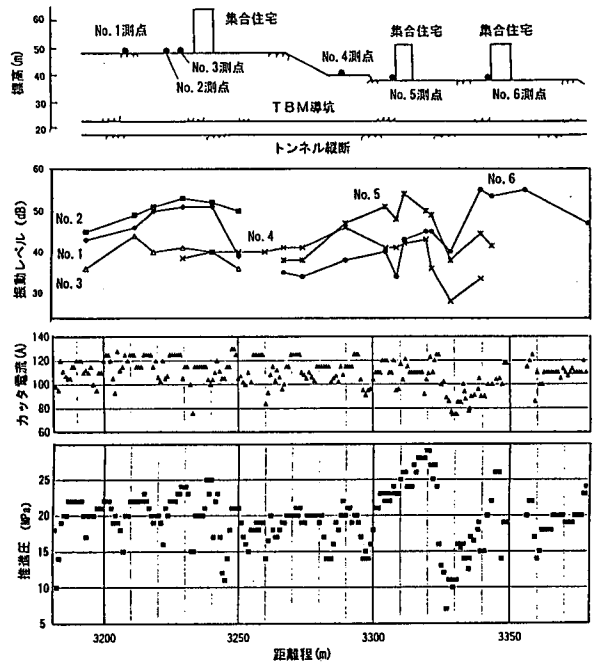


図-2 TBM掘進に伴う切羽位置と地表測点での振動レベル及びTBM掘進データ (No.1導坑)

振動計測は、導坑の軸線上の地表部の3か所に公害振動レベル計を設置し、これらをTBMの掘進に合わせて適宜移設して実施した。計測範囲として、TBMの先端が、集合住宅地域の直下の50m手前の切羽から集合住宅地域を通過して50m前方の切羽に至るまでの約220m区間を目途とした。計測頻度はTBM稼動日に1~2回とし、1回当たり2分間計測した。使用した振動レベル計および計測方法はJISで定めた基準に従った。

### (2) 計測結果

各測点で計測した振動レベル値(L<sub>10</sub>値:変動幅の80%レンジの上端の数値)をTBM掘進に伴う切羽位置との関係で表すと図-2の通りである。なお、図にはTBM掘進時のカット電流値と推進圧をあわせて示した。図によれば距離程3,330m付近で振動レベルが小さいことを除けばおおむね各測点ともTBMの接近に伴い振動レベル値が上昇し、測点の直下を通過する時点で50~55dB程度の振動レベルを記録した後、TBMが遠ざかるとともに振動レベル値が低下する傾向が認められる。なお、図には示していないがTBMの停止時の振動レベル(暗振動)は20dB程度であった。

TBMの稼動時には、直上の集合住宅付近では一部の住民から異常音が聞こえる、ボイラの燃焼時に発生するような音が感知される、あるいは睡眠の妨げになるとの

表-2 振動感覚についての訴え率と振動レベル  
 単位：dB (出典：環境庁調べ<sup>4)</sup>)

振動源	振動感覚 訴え率	やや感じる			よく感じる		
		30%	40%	50%	30%	40%	50%
工場		50	55	59	60	65	69
新幹線		48	51	54	65	70	75
道路交通		-	-	50	62	65	69

苦情が発生した。環境庁の調査結果<sup>4)</sup>による振動感覚についての訴え率と振動レベルとの関係を表-2に示すが、これによれば新幹線、道路交通振動の場合、振動値が50～55dB でやや感じるとの訴え率が50%になる値とされており、暗振動が前述のように20dB程度のきわめて閑静な住宅地であることから、住民の反応がより敏感であったものと考えられる。

一方、集合住宅付近での騒音レベル(A特性)の計測結果は、TBM稼働時には45～50dBで、停止時の暗騒音が40dB程度であったことと比べて5～10dB程度の増加が認められた。

次に距離3,330m付近で振動レベルが小さい値を示す理由をカット電流値および推進圧との関連で考察すると以下のように説明される。カット電流値は、距離3,330m付近を除けば100～120Aの範囲でほぼ安定している。カット電流値はカットトルクと関係し、TBMのオペレータが直接制御できない要因である。一方、推進圧は、掘削ずりの形状や掘削速度のデータを参考にして、カット電流値が設定した上限値(125A程度)を超えないようTBMのオペレータが制御する。このため、15～25MPaの範囲でばらついているが、距離3,330m付近では特に小さい値となっている。これは、この付近では地質の弱層部がみられたために他の区間と比べてTBMの推進圧を下げ、掘削しており、その結果、図-2に見られるように、カット電流値が他の区間と比べて小さな値を示したものである。いいかえれば、掘削に際して地山に与える単位時間当たりのエネルギーが小さいことになり、これによって掘削に伴う振動も小さくなったものと考えられる。このことから、振動の低減を図る一つの方法として、推進圧を下げ、カット電流値が小さい状態で掘削する方法の可能性が示唆される。

一方、距離3,310～3,320mでは推進圧が大きな値を示すが、振動レベルの変化は小さい。この区間では一軸圧縮強度が200MPaの亀裂の少ない硬岩が分布していたため、推進圧を上げて掘削しているが、カット電流値は他の区間と同程度の値を示す。このことから振動レベルはカット電流値の影響を受けることが示唆される。

次に各測点で測定した振動レベルとTBMカット中心

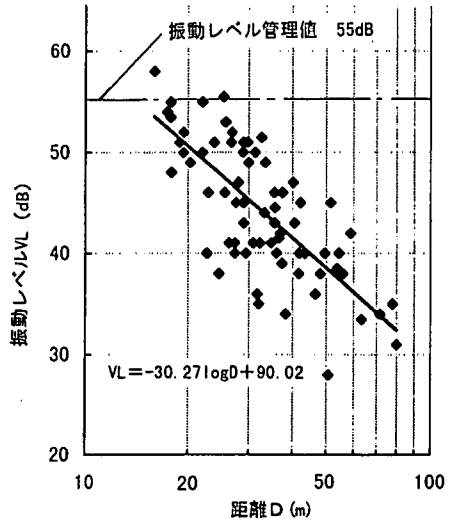


図-3 TBM切羽からの距離と振動レベルとの関係

から測点までの直線距離との関係を図-3に示す。多少のばらつきはあるが振動レベルは倍距離で9dB減衰する傾向が見られる。

この図から、TBMとの距離が25m以内となれば、振動レベルは55dBを越える可能性があることが予想できる。

### (3) 計測結果にもとづく施工管理方法

トンネル直上の集合住宅は、風化花崗岩を掘削した造成地上に直接基礎方式で建設されており、TBM導坑の天端までの最小土被りは15mであり、振動の伝搬経路や受振点での振動対策は技術的に不可能に近い。一方、発生源での効果的な対策も見当たらないため、残りの3本の導坑の掘削に際して計測を行いながら以下のように対応することとした。

- ①直線距離で25m(水平距離では20m)以内の範囲内では振動レベルが55dBを超える可能性があるため、TBM掘削時に振動計測を行うとともに、この区間でのTBMによる掘削作業を7～20時の間に限定し、夜間の作業を中止する。
- ②振動レベルの計測値が管理値として設定した55dBを超え、しかも住民からの苦情が発生する場合にはTBMの推進圧を下げ、管理値以下となるよう掘削する。ただし、推進圧を下げると掘削速度も低下するため、振動の影響を受ける期間が増加するという問題点が残る。
- ③集合住宅1棟に対して振動が影響を及ぼす区間長は約40mでありTBMの平均日進は昼間のみの施工で5m以上は可能であることから、この区間の掘削に要する期間は8日程度となる。このことを住民に説明して

表-3 測定の際の諸条件及び計測項目

測点	距離(m)	測点の諸条件	計測項目
A	25.7	地表面(盛土)	振動速度3成分(振動速度計) 振動レベル3成分(振動レベル計) 騒音(普通騒音計) 低周波音(低周波音レベル計)
B	32.6	集合住宅4階床面	振動速度3成分(振動速度計)
C	17.4	地表面(切土)	振動速度3成分(振動速度計)
D	7.0	No.1導坑側壁	振動速度3成分(振動速度計)
E	23.0	No.1導坑前方側壁	振動速度3成分(振動速度計)
F	23.2	No.1導坑後方側壁	振動速度3成分(振動速度計)

解を得たうえで掘削を進める。

- ④また、No.2導坑の掘削時に詳細な振動、騒音の計測と解析を行い実態を把握して住民に説明し了解を得る。

#### (4) その後の施工結果

前述の方針にそってNo.2, No.3, No.4導坑の掘削を行った。No.2導坑では後述するように集合住宅の直下の掘削時に振動、騒音の特徴を把握するための詳細な計測を実施した。なお、振動レベル計による日常の管理計測の結果はNo.2, No.3, No.4導坑ともNo.1導坑とほぼ同様の結果が得られ、集合住宅付近では $L_{10}$ 値は平均55dB、最大60dB程度となった。このように、集合住宅の直下の掘削に際しては昼間だけの施工としたこと、概ね振動規制値以内で掘削できたこと、No.1導坑の掘削中に施工状況ならびに騒音、振動の実態が住民に理解されたことからその後は住民からの苦情も少なくなり、とくに支障もなく掘削を終えることができた。また、住民に対する生理的な影響や住宅に対する構造上の影響は認められなかった。

なお、これらの4本のTBM掘削の平均日進は8.5m、平均月進は198.8mであった。

### 5. 振動騒音の詳細計測

#### (1) 計測概要

No.2導坑の掘削時にTBMが集合住宅の直下の距離程3,300m付近を通過する時点で、地表および坑内に測点を設け詳細な振動、騒音計測を行った。

今回の計測位置の諸条件と計測項目を表-3に、計測点の配置を図-4に示す。地表部のトンネル中心線上にはA, B, Cの3測点を設けた。A測点は集合住宅の外壁から約1m離れた地盤上に設け、振動速度、公害振動レベル、騒音レベル、低周波音レベルを計測した。A測点を設置した地盤は表層部が盛土である。A測点以外の測点では

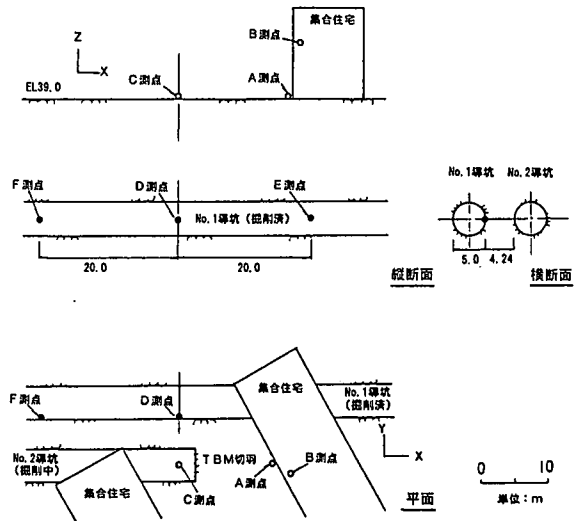


図-4 計測位置

振動速度のみを計測した。C測点はTBMのほぼ直上の地盤上に設けたが、この部分は切土であり、A測点と比べてやや硬質である。B測点は鉄筋コンクリート集合住宅4階通路のコンクリート床面に設置した。

一方、坑内には掘削済みのNo.1導坑の側壁岩盤にD, E, Fの3測点を設け、振動速度を計測した。D測点はTBM稼働時の振動をできるだけ振動源に近い位置で計測するため、TBMの真横の岩盤壁面上に設けた。また、E測点はTBMの進行方向に対してD測点の20m前方、F測点は20m後方に設けた。

計測はTBM稼働時に6回、停止時に1回の計7回を2日間に分けて実施し、1回当たりの計測時間は2分とした。TBM稼働時の計測はTBMが定常状態で掘進している時間帯を、また、TBM停止時の計測は地表部の集合住宅付近の振動騒音環境が定常状態にある昼間の時間帯を選んで実施した。なお、集合住宅付近は閑静な住宅街であるが、朝夕の時間帯は通勤、通学に伴う車輛や人の振動騒音の影響がある。

なお、計測を行った2日間で距離程3,300mを中心とする約5m区間を掘進した。表-3に示した距離は、距離程3,300mでのTBMのカッタ中心から測点までの直線距離を示している。

#### (2) 計測区間でのTBM稼働状況

計測期間中に掘進した5m区間の地質は、亀裂の少ないCh~B級の硬質の花崗岩で、このCh~B級の岩盤はTBM施工区間全体の約45%を占める。コアの一軸圧縮強度は210MPaである。

TBM掘削時の推進圧は23~25MPa、カッタ電流値は100~110Aとなり、図-2に示したNo.1導坑における距

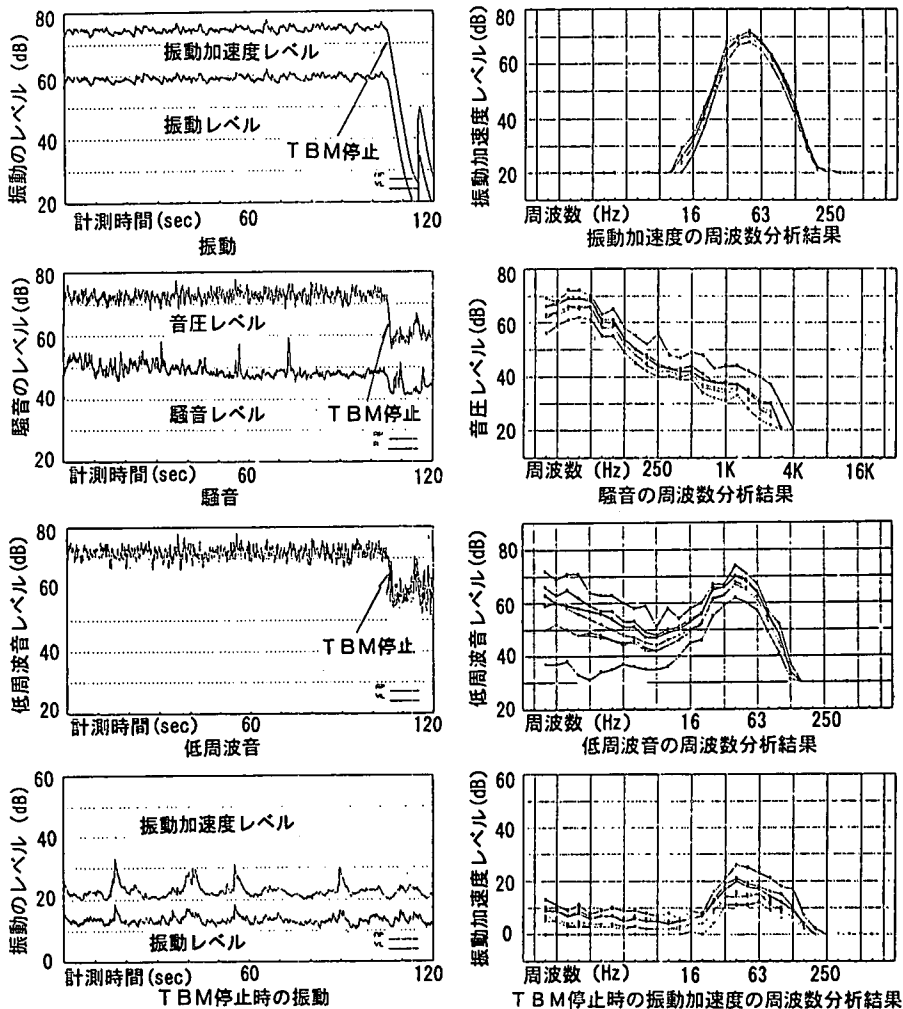


図-5 地表部（A測点）での振動，騒音，低周波音レベルと周波数分析結果

離程3,300m付近の標準的なデータと一致する。これらのことから、計測区間の地質条件ならびにTBMの掘削条件と機械データは当トンネルでは標準的なものであるとみなしてさしつかえない。

### (3) 計測結果と考察

#### a) 振動レベルと騒音レベル

A測点での振動，騒音，低周波音の2分間の計測記録の1例を図-5に示す。図の左にレベル記録を示し，右側に1/3オクターブバンド分析結果を示す。図に示したレベル記録は，計測終了直前にTBMが停止した部分での計測データであり，稼動時と停止時の違いが明らかである。なお，図にはTBM停止時の振動レベル記録もあわせて示した。

図-5によれば，TBM稼動時の振動レベルは58～61dB

であるが，停止時の暗振動レベルは20dBと小さく，稼動時と比べて40dB程度の大きな差が見られる。一方，騒音レベル（A特性）は稼動時はL5（変動幅の90%レンジの上端の数値）が50～57dB，停止時は44dBであり，10dB前後の差が見られる。

TBM稼動時には計測基地としたA測点周辺の地表部では，No.1導坑掘削時と同様，異常音に対する住民からの不快感の訴えがあった。なお，TBMの掘削は昼間のみ行っていたが，夜勤業務に従事する一部の住民からは，昼間の睡眠に対する妨げの苦情があった。

表-2に示した環境庁の調査結果<sup>4)</sup>によれば，60dB前後の振動レベル値は，工場振動では「やや感じる」との訴え率が50%，よく感じるとの訴え率が30%となる値である。

また騒音レベルが50dB前後の値は東京都の調査結果<sup>5)</sup>

によれば20%の人が睡眠に支障があると答えており、夜間に騒音がこのレベルであれば、睡眠妨害の訴えが40%に及ぶ数値である。

No.1導坑掘削時に十分な説明を行っており、住民の理解が得られていたが、本区間で計測された振動レベルは暗振動とのレベル差が40dBと大きいことや暗騒音が40dBの閑静な住宅地であることから、このように苦情が発生したものと思われる。

図-5によれば、TBM稼働時の振動レベルは60dB前後で比較的、定常的な値を示す。

振動加速度の周波数分析結果によると稼働時には30～60Hzの周波数の振動が卓越しており、50Hz付近でピークが見られる。前述の既往の研究でも同様の周波数成分が卓越していることが報告されている。一方、停止時にも30～60Hz付近の周波数の振動が見られるが、稼働時と比べて明瞭なピークは見られない。

なお、振動レベルは振動加速度レベルに振動感覚補正値を加えることによって求められる。図-5では、振動レベルは、振動加速度レベルより15dB程度小さい値を示す。

稼働時の騒音、低周波音についてもほぼ定常的な値を示している。停止時とのレベル差は振動レベルほどではないが、明らかに違いが認められ、計測時には筆者らの感覚でも稼働時と停止時とを明瞭に識別することができた。また、騒音および低周波音の周波数分析結果でも振動と同様に30～60Hzの成分が卓越しており、振動と同様の傾向が見られる。

地表部で計測された騒音、低周波音は、地盤と集合住宅の振動によって二次的に発生した固体音であると考えられる。その理由は、騒音、低周波音の卓越する周波数が地盤の振動の周波数と一致することや、TBM切羽と地表部の計測地点とは空気中の伝播経路で約1.5km離れており、しかもトンネルの坑口部分には防音扉が二重に設置されており、TBM切羽での騒音が地表の計測点まで坑口を経由して空気中を伝播したとは考えられないからである。

なお、騒音はボイラの燃焼音に似た音として感知されたが、ボイラの燃焼音の周波数は30～60Hzが卓越するとされており、今回の騒音の周波数と一致する。

以上のことから、住民からの苦情の原因となった振動および騒音の実態は、30～60Hzの周波数成分が卓越した55～60dBの振動と、同様の周波数を有する50dB前後の騒音であると考えられる。このことについては、スペクトル解析結果をもとに後で詳しく考察する。

#### b) 振動速度

TBM稼働時の振動速度のZ成分の波形を図-6に示す。同図は、各測点での周波数特性を明らかにするため1秒間の時刻歴を各成分の最大値を同一にして比較したもの

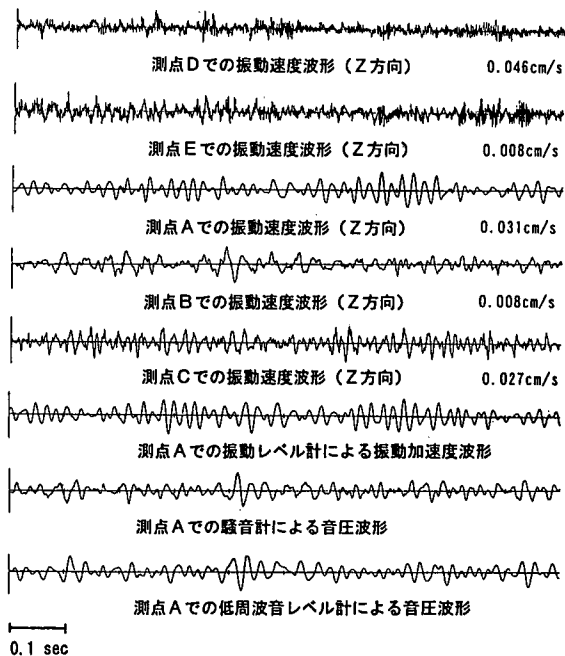


図-6 振動、騒音、低周波音の波形

である。各波形に示される最大値を図中に併記している。また、図にはA測点で測定した公害振動、騒音、低周波音の実波形をあわせて示した。

図によれば、A測点の振動速度波形は、公害振動レベル計による振動加速度波形と当然ではあるがよく対応している。また、これらの波形は、音圧波形および低周波音圧波形ともよく似ており、いずれも60Hz前後の周波数を有する正弦波形状を示す。

地表部の測点での振動速度波形を比較すると、A測点とC測点ではC測点の方が高い周波数成分が見られる。これは、A測点が盛土上であるのに対してC測点は切土上にあることから、このような周波数の違いは地盤条件の差に起因するものと考えられる。

集合住宅4階のB測点の波形は、基本周波数はA測点と似ているがやや高い周波数成分が含まれる。

一方、坑内のD、Eの2測点の波形は地表部の各測点の波形と比べて、著しく高い周波数成分が卓越することが明らかであり、C測点と比べても明らかな違いが見られる。また、D、Eを比べるとTBMにもっとも近いD測点の方が周波数が高いようである。

X、Y、Z成分の振動速度の最大振幅と距離との関係を図-7に示す。それぞれの測点の条件の違いに起因すると推定されるばらつきが見られるが、おおむね最大振動速度振幅は距離の1.8乗に逆比例する傾向があると見ることは可能である。

地表のA測点、C測点の振動速度を比較すると、A測

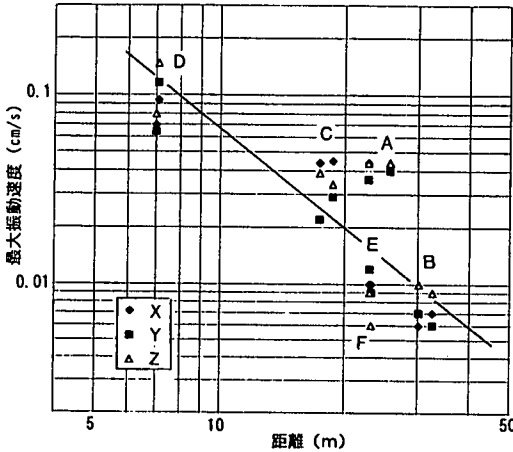


図-7 最大振動速度と距離との関係

点の方が距離が遠いにもかかわらず同程度の振動速度を示している。すなわち、A測点の方が相対的に大きな値を示すといえる。これはA測点の地盤は比較的柔らかい盛り土であるのに対して、C測点のそれは比較的硬い切土であることから、A測点ではC測点と比べて比較的低周波成分の振動の増幅が大きかったことによるものと考えられる。すなわち、A測点とC測点との2点間の振動速度の差は地盤条件の差を反映しているものと推定される。

次に地表部と集合住宅との振動速度を比較する。振動は地盤振動と建物の固有振動数の相互関係により増幅したり、減衰したりするといわれ、建物の固有振動数が地盤振動と一致すると共振して、建物の振動が増幅されることがある。図-7によれば集合住宅の4階のB測点の振動速度と地表のC測点の値とを比較すると、両方のデータはほぼ帰直線上にあり、特に集合住宅で増幅している傾向は見られない。この理由については後述するように地盤と集合住宅の固有振動数が異なることと集合住宅が鉄筋コンクリート造のしっかりした建物であったことによるものと思われる。

次に坑内測点での振動速度を見ると振動源からの距離が等しいE、F測点において、振動速度に大きな違いは見られない。

#### c) スペクトルの特徴からみた振動の伝搬と騒音

TBM稼働時の各測点のZ成分のパワースペクトル、A測点での騒音、低周波音のスペクトルを図-8に示す。とくに振動が問題となる集合住宅のB測点についてはX成分のスペクトルも合わせて示した。なおD、E、F測点では他と横軸のスケールが異なるので注意されたい。

また地表測点間のスペクトル比を図-9に示す。解析に

は、スペクトル・ウィンドウとして Parzen ウィンドウ (バンド幅: 坑内測点 5.0Hz, 地表部測点 2.5Hz) を採用し、縦軸は自己相関係数の最大値で基準化して表わしている。以下に、各測定点のパワースペクトルについての特徴を述べる。

まず振動発生源であるTBMに最も近いD測点と、坑内の他の測点とのスペクトルの相違を見る。D測点では幅広い振動数を有する波の存在が認められるが、30~35Hz付近と235Hz付近の周波数の波が比較的卓越している。これに対してTBMの進行方向にあるE測点では235Hz付近の波を中心として周波数の高い波が減衰しているのが大きな特徴である。これは、高周波成分の方が距離減衰し易いことを反映したものと考えられる。

また、TBMの後方のF測点でも高い周波数成分が減衰する傾向が見られ、350Hz以上の周波数成分は見られない。F測点で高い周波数成分が減衰したのはD、F間に弱層部がみられ、この弱層部を通過することによって高い周波数成分の波がE測点におけるよりも大きく減衰したものと推察される。

次に地表部の測点での周波数成分の特徴を検討する。地表の各測点では坑内の測点での周波数と比べて100Hz以下の周波数成分が主体であり、C測点を除けば100Hz以上の周波数成分はほとんど見られない。

A測点に対し卓越がみられる周波数は30~70Hz付近であり、B測点、C測点と比べて周波数がやや狭い範囲に限定されている。この特徴を明らかにするため、図-9のA測点とC測点のスペクトル比を見る。図において、A測点では、15~55Hz付近の比較的低周波数域の狭い範囲の波が増幅されており、これは柔らかい盛土の影響が表われているものと思われる。最も増幅されているのは25Hz付近である。このことから、A測点の地盤が前述のように比較的柔らかい盛土であったため100Hz以上の高い周波数の波は伝播されずに減衰したものと考えられる。

集合住宅の4階のB測点では、卓越が認められる振動数は20~60Hz、80~110Hzであり、A測点でのスペクトルと類似している。B測点ではX成分に5Hz付近の波が認められる点がA測点とは異なる特徴である。なお、図には示していないがB測点のY成分でも5Hz付近の波が認められる。図-9のスペクトル比でA測点と比較するとB測点では5Hzと100Hz付近の波の増幅が見られる。

5Hz付近の波は、B測点のX、Y成分に認められ、A、C測点とB測点のZ成分のパワースペクトルでは認められないことから、これは集合住宅の固有周波数と推定される。

100Hz付近の周波数成分については、C測点で有する90~100Hz付近の波が減衰しないで建物に伝播したものと考えられる。

A測点での騒音、低周波音のスペクトルをみると、騒



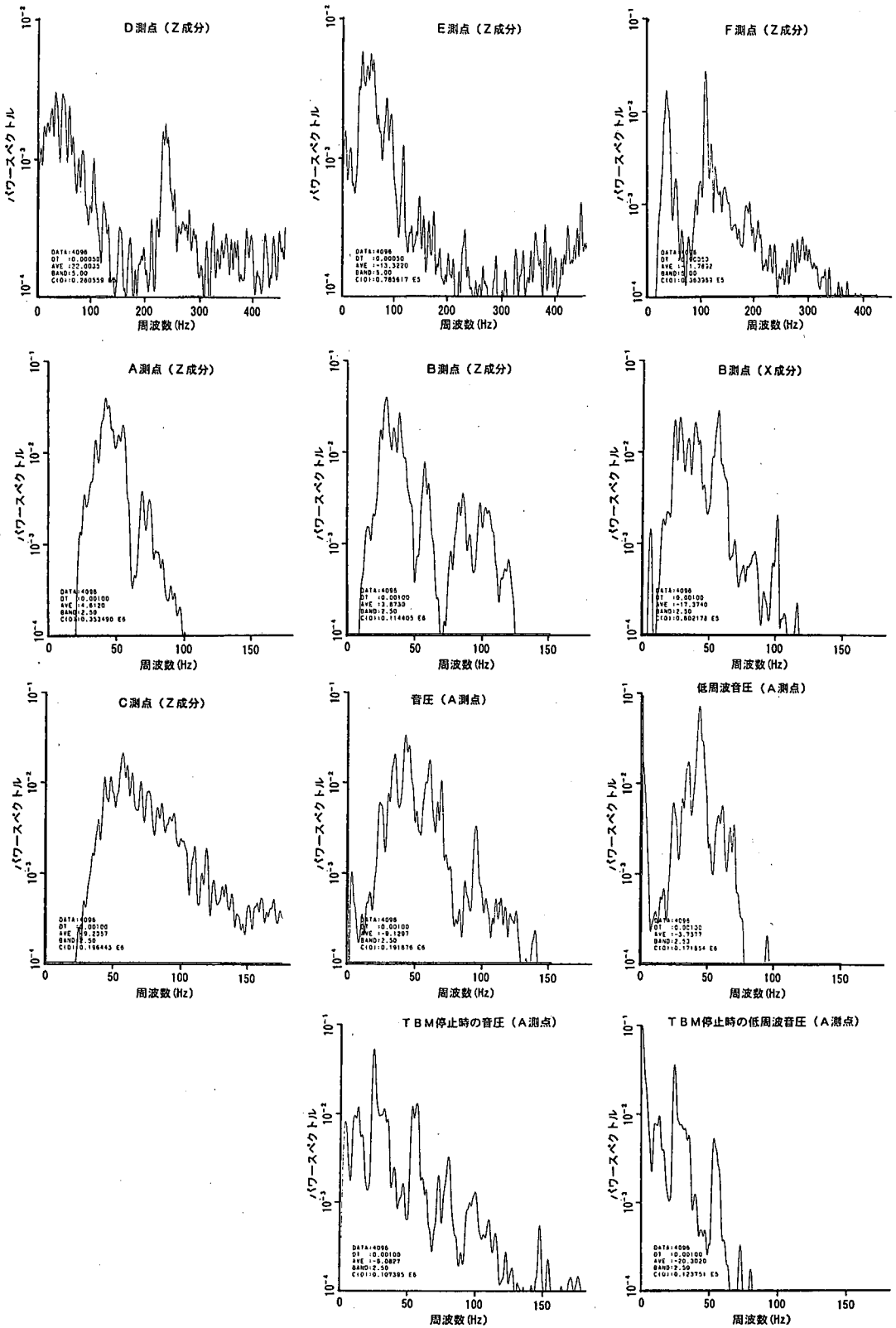


図-8 振動速度, 音圧, 低周波音圧のパワースペクトル

音のスペクトルは集合住宅のB測点のX成分の振動スペクトルときわめてよく一致しており、集合住宅の固有周波数であると思われる5Hz付近の波も見られる。

低周波音のスペクトルもB測点のX成分とよく似ており、5Hz以下を除けば、A測点の振動のスペクトルとも似ている。

すなわち、集合住宅付近の騒音、低周波音のスペクトルは集合住宅の水平方向の振動のスペクトルと似ており、A測点の地盤の振動のスペクトルとも似ている。

なお、TBMの停止時の音圧及び低周波音圧のパワースペクトルも図-8に合わせて示したが、TBMの稼働時のスペクトルの特徴として見られた40~50Hzの波が見られない。

これらのことから集合住宅付近で感知された騒音ならびに低周波音は、TBMによる掘削に伴って発生した地盤振動と集合住宅の振動とによって発生した二次固体音によるものであり、集合住宅の水平方向の振動による影響がより強くあらわれたものと考えられる。

## 6. まとめ

住宅地に近接したトンネルをTBMにより掘削する際に問題となる振動、騒音について測定結果をもとにそれらの特徴を明らかにした。本研究の結果は次のようにまとめられる。

- (1) 直径5m級のTBMの掘削時の振動レベルの測定結果によれば、約25m離れた地表の集合住宅付近で60dB前後の値となった。これと同時に発生する騒音は50dBとなった。地表の集合住宅付近で測定された振動、騒音とも、30~60Hzの周波数が卓越している。
- (2) このような振動、騒音に対して住民から苦情があったが、その内容は異常音に対する不快感、あるいは睡眠の妨げなどであり、構造物に対する物理的な影響は認められなかった。
- (3) 振動速度、振動レベルの計測結果は、計測器を設置した地盤ならびに伝播経路の地盤条件によって違いが認められるが、おおむねTBMから測点までの距離の1.8乗に逆比例する傾向が認められた。このことから、工事着手前の振動、騒音の予測が可能である。
- (4) 周波数解析結果によれば、集合住宅に伝播する振動は、5Hz、30~60Hz、90~100Hzの周波数成分が卓越しており、集合住宅付近の地表での騒音、低周波音のスペクトルとよく似ている。騒音および低周波音は、TBM掘削によって生じた振動が地盤を伝搬し集合住宅に振動を発生させ、その振動によって

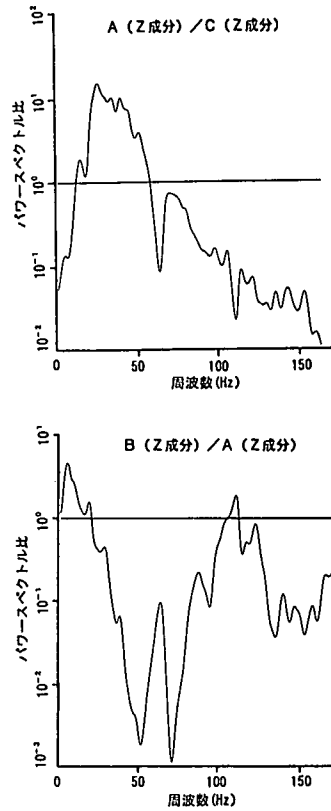


図-9 パワースペクトル比

空气中に放射されて二次的に生じた固体音であると考えられる。

## 7. あとがき

TBM工法は、大断面道路トンネルの導坑や上下水道用の中小断面トンネルの掘削に採用される機会が今後益々増えることが予想され、それに伴って住宅地に近接したTBM工事では振動、騒音の問題がさけられない状況となるであろう。本研究がこのような工事の施工管理に役立てることができれば幸いである。

最後に本研究で多大なご協力をいただいた関係各位に感謝する次第である。

## 参考文献

- 1) トンネルボーリングマシン入門連載講座小委員会：トンネルボーリングマシン入門(1)、トンネルと地下、Vol. 26, No. 10, pp. 69~74, 1995. 10.
- 2) (社)日本電力建設業協会：TBM工法による施工事例調査報告書、1995. 3.
- 3) Richard F Flanagan: Ground vibration from TBMs and shields, Tunnels & Tunnelling, pp. 30~33, 1993. 10.

4) (社) 産業公害防止協会 : 公害防止の技術と法規 [振動編], p. 20, 1991. 4.

5) (社) 産業公害防止協会 : 公害防止の技術と法規 [騒音編], p. 43, 1991. 4.

(1998. 3. 6受付)

## CHARACTERISTICS OF GROUND VIBRATION AND NOISE FROM HARD ROCK TBM

Kenji HAGIMORI, Takumi MAKINO, Katsuji OTSUKA,  
Hajime HAMADA, Tomiharu IWAGAKI and Koji NAKAGAWA

A 5 m hard rock TBM was used to bore pilot tunnels for a three lane road tunnel with a shallow overburden (15 m) in a residential area. The vibrations and noise from the TBM were measured on the ground surface and apartment building and the spectra analysis were carried out.

On the ground surface near an apartment building, the vibration level was about 60dB and the noise level was around 50dB when the resultant distance was 25m between the TBM and measuring unit. A few complaints from the apartment residents against nuisance and disturbance their sleep during TBM construction were registered. The spectra analysis revealed that the predominant frequencies were 5Hz, 30-60Hz and 90-100Hz in the apartment building and 20-60Hz on the ground surface.