

シールド掘進に伴う振動低減装置の施工実績と振動特性の一考察

(株)鴻池組 正会員 ○織本 悠衣 正会員 福嶋 渉
鴻池組・西武建設・あおみ建設・鎌田建設共同企業体 越智 創 山添 浩司
吉川 康平
(株)鴻池組 太田 愛子 地中空間開発(株) 山本 拓平

1. はじめに

シールド掘進に伴う振動は、カッターヘッドの回転による地山切削やシールド外周面の地山による締付け、地山との接触等により発生すると考えられており、近年、これらの振動が地表面まで伝播し、生活環境に影響を与えることが問題になっている。

A市発注のシールド工事は、市街地中心部の幹線道路下の軟岩層や砂礫層と互層地盤を急曲線、急勾配の施工区間を有する線形となっている。加えて路線の中間地点付近にて地中障害物(H鋼)の切削箇所もあり、本工事ではシールド掘進に伴う振動による地表面への影響が懸念されていた。

このため、課題に対し、カッターヘッドの回転による振動の低減を目的とした振動低減装置(以下、制振装置)を開発し、本工事において、初めて実機に搭載し掘進を行っている。本稿では、制振装置の概要と、制振装置の有効性確認のために実施したシールド掘進中の振動計測(シールド機内、地表面)結果およびその考察について報告する。

2. シールド工事の概要

(1) 工事概要

- ・泥土圧式シールド工法
- ・シールド外径 3180mm
- ・路線延長 L=827.9m
- ・土被り 6.3m ~ 9.4m
- ・平面線形 最小曲線 R=30m
- ・縦断勾配 -36.0‰ ~ -2.7‰

(2) 地質概要

本工事場所の地質は、上位から盛土層、砂礫層、軟岩(シルト岩)層が想定された。掘削対象土質は、発進から約670mまでは全断面が換算N値100以上の軟岩(シルト岩)で、その後、到達までの約160mの間で徐々にN値10~40の砂礫層が出現する互層となっている。軟岩層では $qu = 1.92 \sim 4.42 \text{MN/m}^2$ となっている。また、到達付近の砂礫層には到達立坑掘削時に巨礫を含むことを確認している。

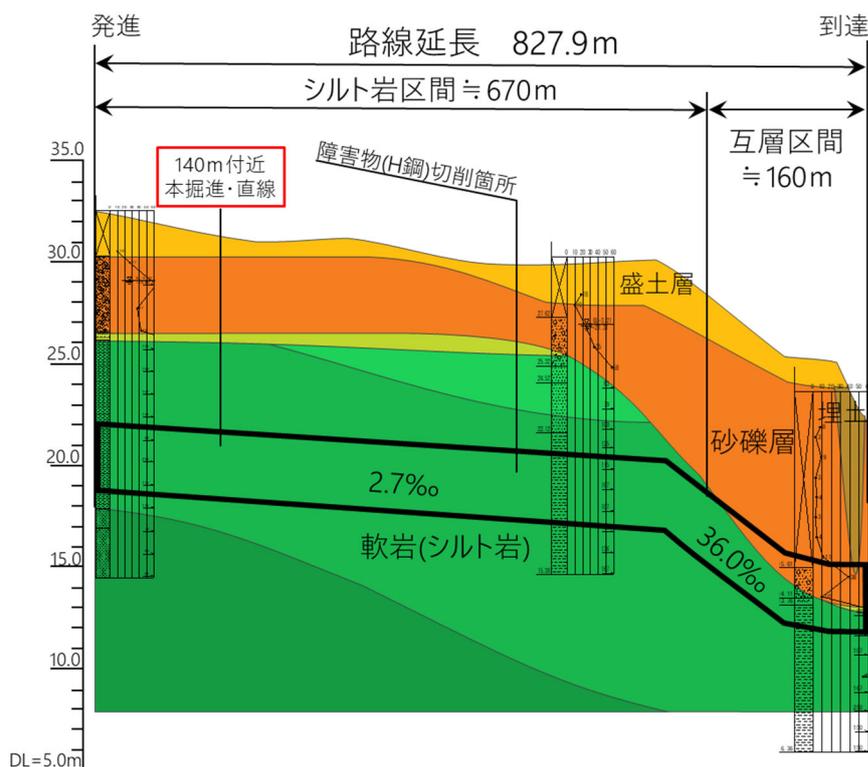


図1 土質縦断概略図

キーワード シールド, 振動低減, 制振装置

連絡先 〒541-0057 大阪府大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1 本町南ガーデンシティ
(株)鴻池組 土木事業総括本部 技術本部 土木技術部 TEL06-6245-6509

(3) シールドの仕様

今回使用しているシールドの仕様主要一覧及び全体組立図を表1、図2に示す。

カッターヘッドはスポークタイプ(3本+サブ3本)とし、障害物切削に備えて5度の傾斜とした。パス数はセンタープレート部が1パス、内外周部が2パスとし、ビットは耐摩耗性を考慮したE5種とした。また、表1に示すように、回転速度は障害物切削時も含め、4種類とした。

表1 シールドの主な仕様

仕様	詳細	
シールド	総推力	10000kN
	シールドジャッキ	1000kN×10本
	伸縮速度	50mm/min
カッター	駆動トルク	656kN・m (障害物切削時、低トルク時) $\alpha = 20.4$
		984kN・m (高トルク時) $\alpha = 30.6$
	回転速度	3.8min ⁻¹ (障害物切削時)
		2.1min ⁻¹ (高トルク・超高速回転時)
1.4min ⁻¹ (低トルク時) ※標準回転		
駆動用油圧モータ (4台)	14.31kN・m×18MPa×4台 (障害物切削時、低トルク時)	
	21.47kN・m×27MPa×4台 (高トルク時)	

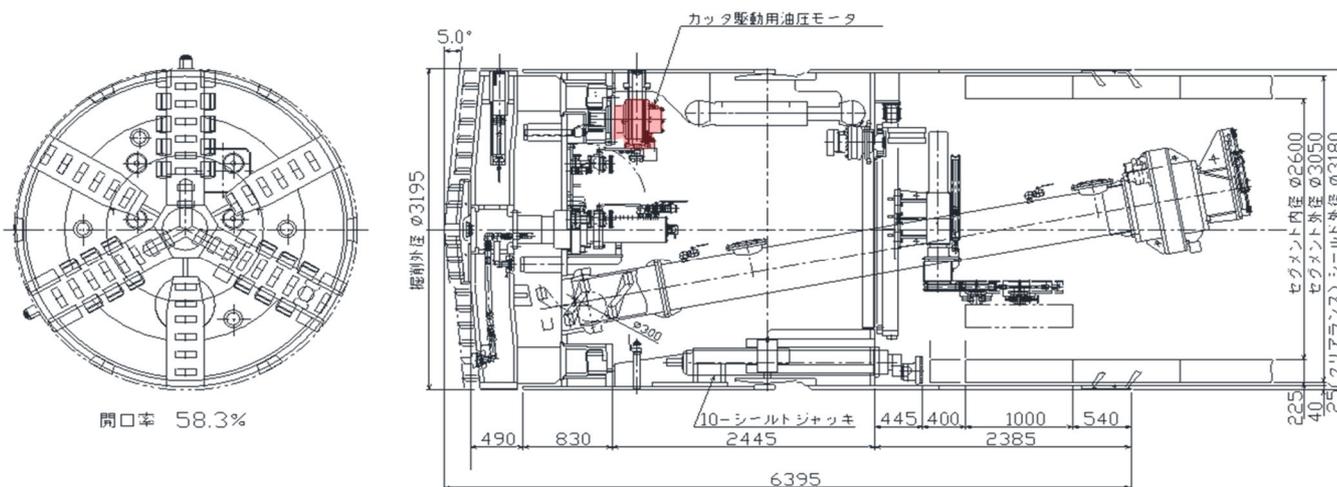


図2 泥土圧式シールド

3. 制振装置について

カッターヘッドの回転によって生じる振動としては以下のようなものが挙げられる(図3)。

- ①カッターヘッドが硬質地盤や障害物を切削する際に発生する振動
- ②カッターヘッドが回転する際の摩擦の影響やチャンバー内の攪拌によって発生する振動
- ③カッターヘッドの支持軸受の転がり、駆動ギアの摩擦や接触によって発生する振動

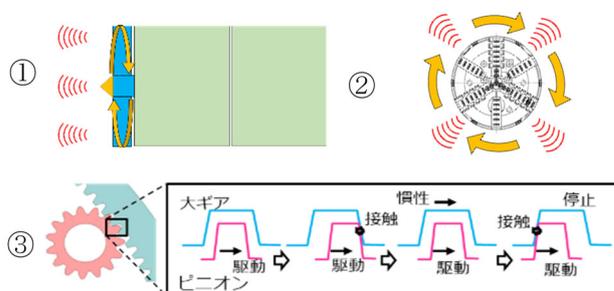


図3 カッターヘッドの回転時に発生する振動

これらの振動源が重なりあい、土質や土被り、シールド径などの施工条件も要因となって共振や伝播により振動問題を引き起こす。

シールドのカッターヘッドは、カッターヘッドのギア部分(内歯車)とピニオンとの噛み合わせによって回転している(図4)。そのピニオンを回転させる動力となっているものが油圧モータである。

この油圧モータを流量制御弁により一定の回転抵抗(背圧)を付加することによって、カッター回転の負荷変動や機械抵抗等による振動を抑制する。

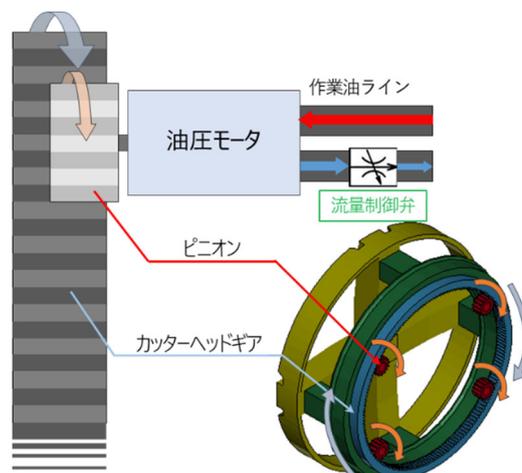


図4 カッターヘッドの回転の仕組みと制振原理図

4. 振動計測について（シールド機内・地表面）

シールド掘進による振動の計測は、路線線形、土質および掘進状況などを考慮して、表 2 に示す計測計画を策定した。計測位置 No. 1 の計測および計測データの分析は実施している¹⁾。本稿では、計測した振動データのうち、計測位置 No. 2（表 2 赤囲い）の計測を行った。

シールド機内ではシールド隔壁内側の 3 時および 9 時方向の 2 箇所に加速度計を設置（図 6、写真 1、写真 2-左）し、常時計測した。また、地表面の計測は振動レベル計（写真 2-右）を使用した。表 3 に機内及び地表面での振動計測の概要を示す。なお、地表面の計測機器設置箇所は交通の妨げにならないよう歩道部や植込み内等とし、計測機器直下に振動伝播の妨げとなる空洞や空隙が少ない箇所を選定した。また、地表面の計測は、交通による振動影響（暗振動）の少ない夜間作業時とした。

計測機器はシールド機内・地表面共に三軸の振動を計測できるものを使用した。計測軸は図 8 に示す X 軸をシールド掘進方向、Y 軸をシールド掘進直角方向、Z 軸を鉛直方向となるように設置した。

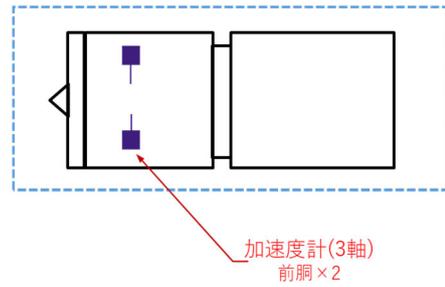


図 6 振動計設置位置図



写真 1 機内加速度計（全景）



写真 2 機内加速度計，地表面振動レベル計

表 2 振動計測計画

計測位置		施工・線形 条件	掘進 土質	土被り (m)	発生振動の 予想
NO.	追加距離				
1	55m付近	初期掘進・直線		9.0	小
2	140m付近	本掘進・直線		8.5	小
3	180m付近	本掘進・R=30m曲線	シルト岩	8.3	中
4	420m付近	H鋼直接切削手前・直線		8.2	小
		H鋼直接切削(1回目)・直線			大
		H鋼直接切削(2回目)・直線		大	
5	800m付近	到達手前・直線	砂礫	8.9	大

表 3 振動計測概要

	計測機器	機器設置箇所	出力データの形式	計測間隔
機内	データロガー 加速度計	シールドマシン 隔壁内側	加速度(m/s ²)	0.002sec
地表面	振動レベル計	マシン直上部付近	振動レベル(dB) 振動加速度レベル(dB)	0.1sec

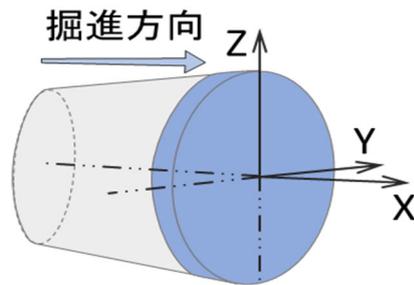


図 8 振動計測軸イメージ

5. 掘進状況について

発進直後から今回の分析を行った地点までの約 140m 区間の掘削対象土質は全断面軟岩層で想定以上に硬質であったため、切り込み深さが過大になるとカッタートルクが上限を超え、掘進停止もたびたび発生した。掘進速度も 10mm/min 以下の低速となり、掘進時間も 1 リング（1m）あたり 2～3 時間と長時間となった。そのため、掘進速度、カッター回転数などを試行錯誤的に変化させて掘進を行っている。また、制振装置についても上記の条件下で使用している。

6. 振動計測データの分析

(1) 振動計測データの評価方法

振動を評価するものとして「振動加速度レベル Lva (dB)」を使用する。地表面で計測した振動加速度レベ

ルに合わせるためにシールド機内で計測した加速度のデータ (m/s²) を振動加速度レベルに変換する。なお機内の計測データの中で電子的なノイズと判断される特異値はあらかじめ除外した。また計測した三軸の振動データの内、特に人間が感じやすい揺れといわれる鉛直方向の振動である Z 軸方向の計測値に着目し、本工事におけるシールド掘進に伴う機内振動と地表面振動の関係性の確認、シールド掘進と振動との関係性の評価、搭載した制振装置の振動低減効果についての検証を行った。

(2) 振動計測データの分析結果

a) 機内と地表面の振動データおよびシールド掘進データの比較

140m付近掘進中の機内と地表面での振動加速度レベルと掘進データ (カッター圧力, 総推力, 掘進速度) の経時変化の一例をグラフ化したものを図 9 に示す。制振装置の ON・OFF や掘進停止中の時間帯は図 9 の凡例に示す背景色としている。今回, 掘進データとの全体的な比較やシールド機の停止時からカッター始動,

凡例

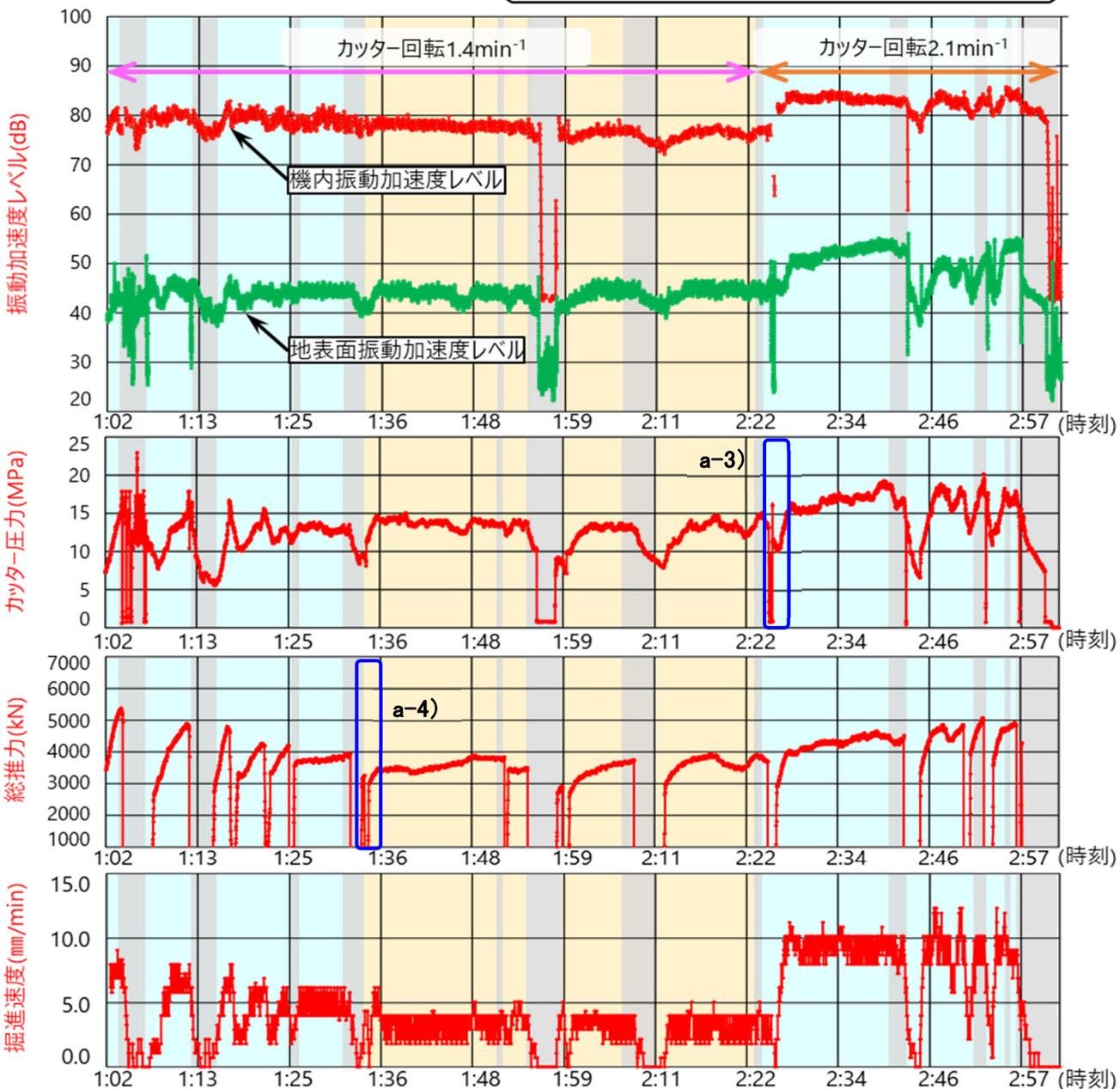
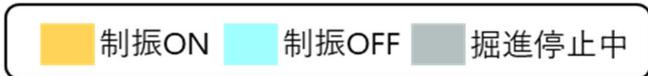


図 9 振動計測結果(シールド機内, 地表面)と掘進データ(カッター圧力, 総推力, 掘進速度)

シールドジャッキ作動から通常掘進作業へと移行する一連の作業時における各掘進データと振動の詳細な変化を比較することで発生する振動との関連性を確認した。

a-1) 機内振動と地表面振動

図9の機内振動と地表面振動の振動加速度レベルの経時グラフより、機内と地表面の振動は同じ変動傾向を示しており、特に時刻1:02~2:25のカッター標準回転での掘進では振動の経時変化は非常に近似した動きをしている。

これらから、今回の地層ではシールド機から発生した振動が地表面に伝播するまでに大きく減衰するものの、発生の有無や計測値の増減は同じ傾向と見られる。

a-2) 各掘進データと地表面振動加速度レベル

機内の測定は加速度計の電圧信号に電磁弁 ON・OFF が影響したノイズが発生し、連続したデータを検出できなかった。そこで、今回は地表面の振動加速度レベルと掘進データを比較した。

図9のカッター圧力、総推力、掘進速度とともに概ね全域にわたって地表面の振動と連動した傾向を示している。

a-3) カッター圧力と地表面振動加速度レベル

図9の振動計測結果のうち「カッター圧力」の時刻2:26~2:30区間（青囲い部 a-3）を抽出し、カッター始動時から安定した掘進までのカッター圧力と振動との関係を確認したものを、図10に示す。カッター回転始動時のカッター圧力上昇時（カッター圧力：0.8MPa→16.2MPa）には振動加速度レベルが25.5dB→50.3dBと大きな変化がみられる。また、掘進開始時のカッター圧力上昇時（カッター圧力：11.4MPa→15.5MPa）においても振動加速度レベルは45.0dB→49.9dBと上昇傾向がみられる。その後、掘進が安定するとカッター圧力・振動加速度レベルともに変動量は小さくなる。

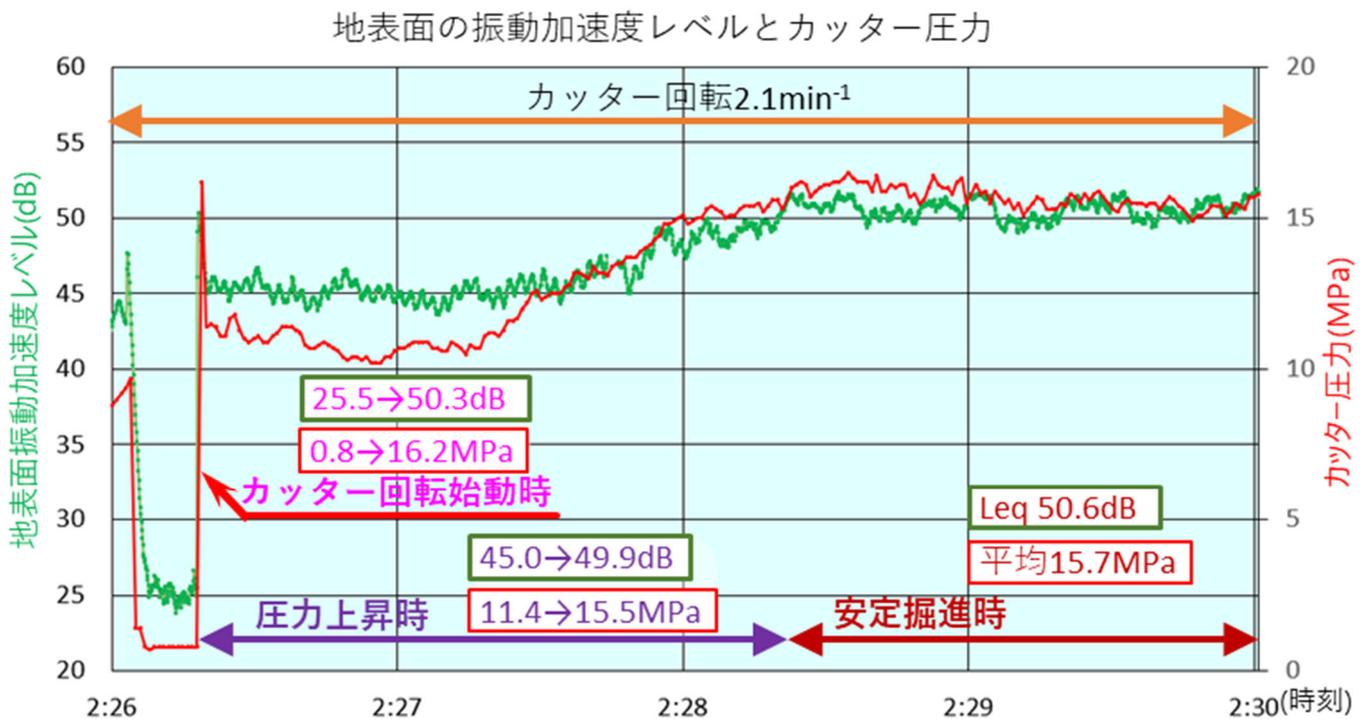


図10 地表面振動計測結果とカッター圧力

a-4) 総推力と地表面振動加速度レベル

総推力との比較は図9の「総推力」と振動加速度レベルグラフの時刻1:35~1:39区間(青囲い部 a-4)について抽出(図11)し、掘進開始時から安定した掘進となるまでの総推力と振動との関係を確認した。カッター回転のみで総推力が0kNの区間における等価振動加速度レベル(Leq)は40.9dBであり、総推力が0kN→3008kNまで上昇している区間のLeqは41.7dBであった。総推力上昇時における地表面の振動加速度レベルはほとんど変化がないが、総推力上昇後の数十秒間は振動加速度レベルの上昇が見られた。

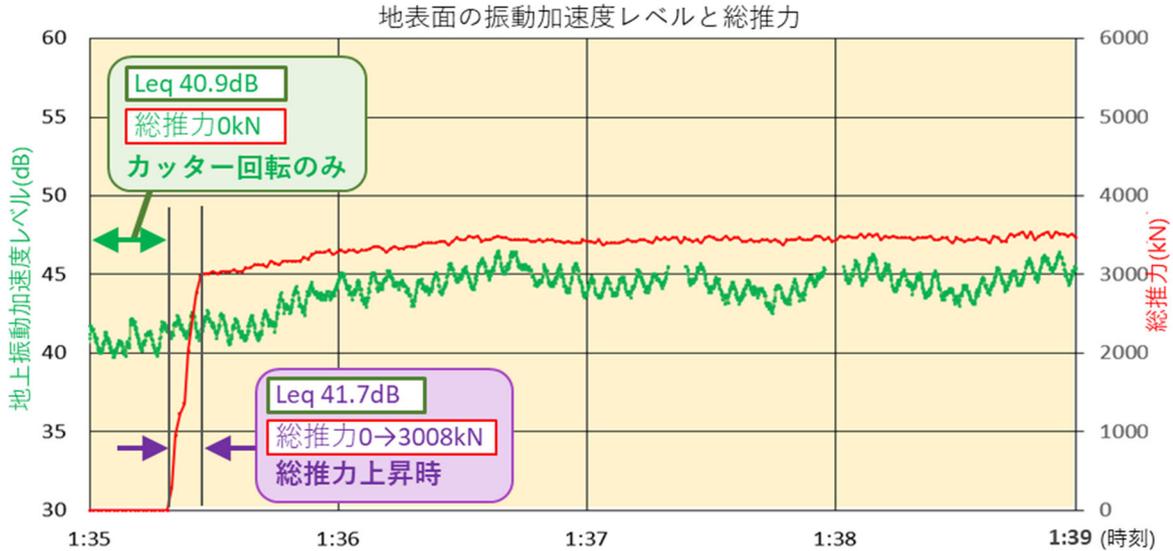


図11 地表面振動計測結果と総推力

a-5) 掘進速度と地表面振動加速度レベル

掘進速度の変化と振動加速度レベルとの関係を確認するために、図9の掘進速度と振動加速度レベルを抽出し、重ね合わせたグラフを図12に示す。制振装置をOFFにして掘進した区間の内、平均掘進速度が4mm/minであった時間帯(①時刻1:26~1:32)と平均掘進速度が9mm/minであった時間帯(②時刻2:24~2:44)を比較する。①と②ではLeqが7.9dB上昇した。但し今回の掘進では①と②でカッター回転数が異なり、①は1.4min⁻¹、②は2.1min⁻¹でそれぞれ掘進した。

カッター回転を2.1/1.4≒1.5倍に対して、掘進速度が9/4≒2.3倍となりカッターが地山に切り込む深さの上昇で振動も上昇しており、地表面振動との関連性が見られる。

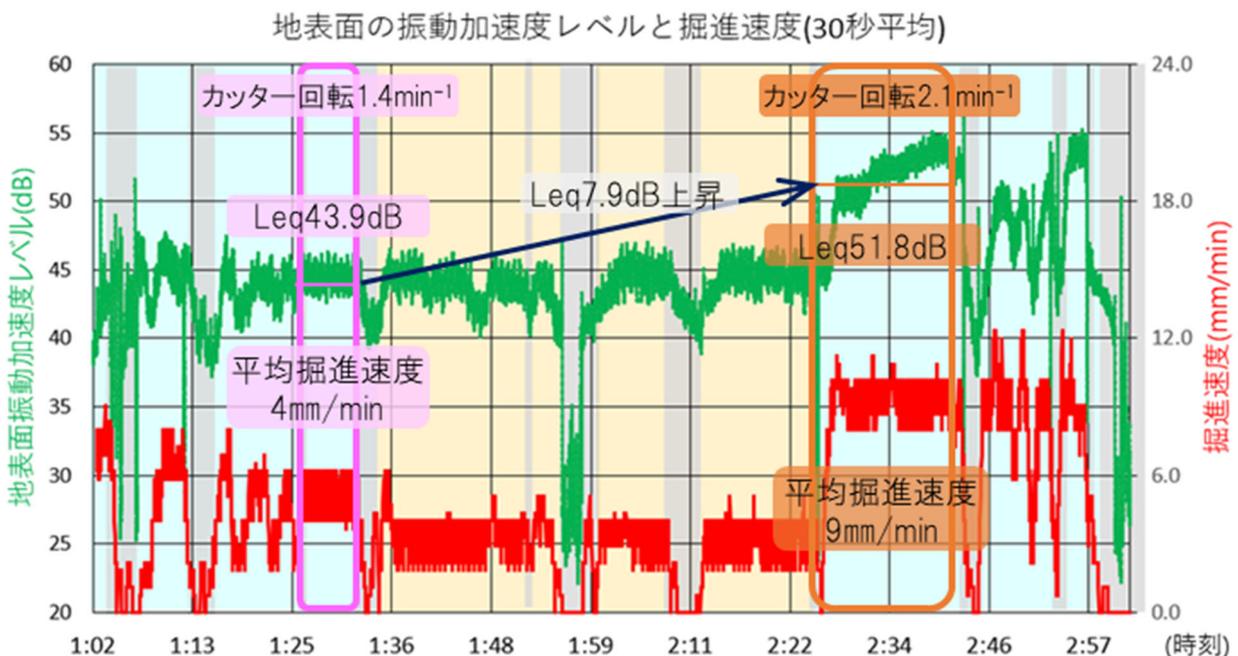


図12 地表面振動計測結果と掘進速度

b) 制振装置 ON と OFF の比較

図 9 に示す範囲のカッター圧力と振動加速度レベルに着目し、制振装置 ON、制振装置 OFF のデータを区分し、統計処理を行った。統計処理については、図 9 に示す時刻 1:02～2:57 の掘進時のデータを使用し、因果関係を確認するために回帰分析による統計処理を行った。図 13 に制振装置 ON および制振装置 OFF 時のカッター圧力と機内振動加速度レベルの散布図を示す。

散布図は、制振装置の作動時（制振装置 ON）を赤色、停止時（制振装置 OFF）を青色で色分けしている。

制振装置 ON 時（データ数：1925 個）では、カッター圧力は 9～15MPa の範囲で変動しており機内振動加速度レベルは 74～79dB の範囲に分布している。制振装置 OFF 時（データ数：2371 個）では、カッター圧力 6～19MPa の範囲で変動しており機内加速度レベルは 76～85dB の範囲に分布している。

制振装置 ON・制振 OFF とともに、カッター圧力と機内振動加速度レベルは右肩上がり（比例関係）にまとまった分布をしており、回帰直線で表すとそれぞれ $y = 0.84x + 65.98$ 、 $y = 0.57x + 73.20$ となる。この式に従って算出したカッター圧力 10～15MPa での機内振動加速度レベルは、制振装置 ON では 74.4～78.6dB、制振装置 OFF では 78.9～81.8dB となり、3.2～4.5dB の低減量が認められる。

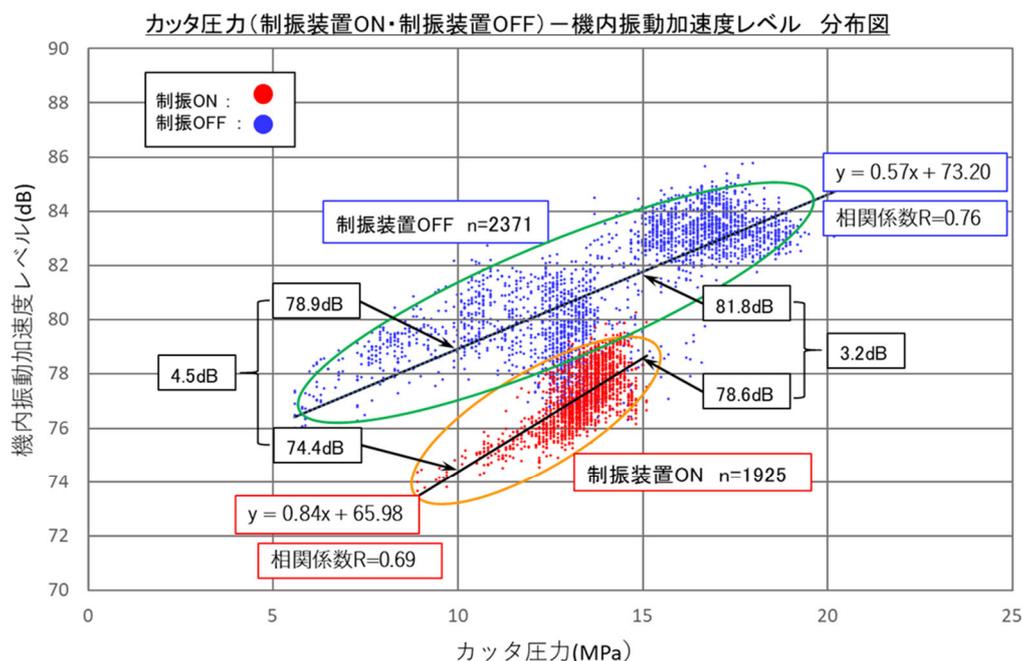


図 13 カッター圧力-機内振動加速度レベル散布図

7. 考察および今後の展望

今回、着目したカッターヘッドの回転でカッター圧力が上昇すると発生する振動も上昇し、連動する傾向がある。制振装置による振動低減効果はカッター圧力と振動加速度レベルの回帰分析により、振動加速度レベルで最大 4.5dB の低減量が得られ、一定の効果があったと考えられる。また、今回のような硬質な均一地盤では、押し付け力（総推力）に伴う、振動との関連性は低く、地山への切り込み量が大きい場合（掘進速度が大）に関連性が高く、振動への影響が大きくなると考えられる。

今回の対象区間は均一な地盤（シルト岩）を掘進した直線部で、本制振装置とシールドに係る掘進データ（カッター圧力、総推力、掘進速度）との関連性や効果を総合的に確認できた。

今後、急曲線（R=30m）部、シールドによる地中障害物（H 鋼）の直接切削および砂礫層を対象とした掘進が予定されており、今回と相違した振動傾向が生じる可能性がある。このような施工条件下でも、制振装置が有効に機能することを確認するために引き続き計測を実施し、様々な施工条件における制振効果に関して、検証を行っていく予定である。

8. 参考文献

1) 佐々木雄亮他：カッターヘッド回転による振動を低減したシールドの施工実績，土木学会第 79 回年次学術講演会，VI-974，2024