特集≫ トンネル

シールド工事におけるアコースティック・エミッション 技術を用いた支障物切削負荷検知技術の開発

今 岡 洋 輔·大 前 慶 恵·上 田 潤

都市部のシールド工事では、杭などの支障物を直接シールド機で切削する工事が増加している。また、 想定していなかった支障物と遭遇しシールド機が破損する事例も散見されている。支障物切削時の衝撃や 切削負荷の増大によりカッタービットおよびカッター駆動部が損傷すると、掘進不能になる恐れがある。 そのため、支障物切削中の切削負荷を把握し、掘進管理へ反映する必要がある。そこで、アコースティッ ク・エミッション(以下、AE)技術を用いた切削負荷や衝撃の評価技術の開発に着手した。本稿では、 支障物切削時における AE 技術の適用性を検証するために実施した、実工事での直接発進に伴う立坑壁切 削時の AE 計測結果、および支障物切削時の AE 計測結果を紹介する。

キーワード:シールド,支障物,直接切削,切削負荷検知,アコースティック・エミッション,AE

1. はじめに

近年,都市部のシールド工事では,シールドの通過 に支障となる杭や土留め壁などを直接シールド機で切 削する工事が増加している。また,想定していなかっ た支障物と遭遇しシールド機が破損する事例も散見さ れている。

支障物切削時の衝撃や切削負荷の増大によりカッ タービットおよびカッター駆動部が損傷すると, 掘進 不能になる恐れがある。そのため,支障物切削中の衝 撃や切削負荷を検知し, 掘進管理へ反映することで, 切削負荷や衝撃を抑制する必要がある。

そこで、金属やコンクリート等の非破壊検査に使用 される AE 技術に着目し、シールド掘削における代表 的な支障物(杭,土留め材等)である金属やコンクリー トが切削される際に発生する弾性波を検知し、切削負 荷を評価する技術の開発に着手した。

本稿では、支障物切削における AE 技術の適用性を 検証するために実施した、実工事での直接発進に伴う 立坑壁切削時の AE 計測結果、および支障物切削時の AE 計測結果を報告する。

2. AE の特性と適用範囲

AEとは,材料の塑性変形や摩耗時に発生する高い 周波数をもつ音響信号を"弾性波"として放出する現 象であり,この音響信号を検出・評価する AE 技術に より,材料のクラックの発生や進行を非破壊で把握す ることができるため,通常,機械設備の保全予知に用 いられる手法である。

振動センサ・温度センサなどの多くのセンサは,材 料の変形や摩耗により生じた振動や熱などの二次的な 現象を捉えるものであるが,AEセンサは材料の変形 や摩耗が発生した際の一次的現象を捉えることができ るのが特徴である(図-1)。

AEの共振周波数帯は数kHz ~数 MHz と言われ, 人の可聴域よりもはるかに高周波領域であり,シール ド工事での切削対象である金属やコンクリートなどが 変形した際に発する音響信号の共振周波数と合致して いるため,いち早く対象の変形を捉えることができる (図-2)。



図-1 き裂・摩耗の進行と各センサの検出¹⁾



AE の計測するパラメータは,取得時間内における 最大振幅(AE 波形の最大値)およびエネルギー(AE 波形の積分値)であるが,シールドの支障物切削にお いては,各パラメータから切削対象や,切削によるシー ルド機への負荷の大小を判断できると考える。

3. AE の適用性検証

(1) 検証目的

シールド機内部に設置した AE センサで,支障物切 削により発せられる AE 波形の検知が可能であるか, また,支障物切削における AE 技術での検知の有効性 を検証した。

(2) 検証方法

立坑壁(コンクリート+FFU材)を直接切削して 発進するシールド工事(掘削外径 ϕ 12 m 級)におい て、AE 計測を実施した。AE センサは、シールド機 隔壁部およびロータリージョイント部へ設置した(**写 真**—1)。また、振動センサを用いた計測値との確認・ 比較のため、振動計測も合わせて実施した。

計測は,無負荷時,立坑壁切削時,地山掘削時の各 区間とし,シールド発進前から連続して計測を行った。

AE センサはコンクリートの共振周波数である 60 kHz 帯のものを使用し、センサ出力 0.1 μs ごとに サンプリングし, 10 ms ごとに最大振幅およびエネル ギーに換算し記録する。

(3) 検証結果

掘進データから、立坑壁切削時および地山切削時に おけるカッタートルク値(図-3)と切込み量(図-4) を示す。図-3から、立坑壁切削時より地山掘削時 の方が高い値を示しているのがわかる。これは、地山 掘削時の方が掘進速度5mm/分と速く、切込み量が 大きくなったことにより、カッタートルクが高くなっ たと考えられる。

一方, AE 計測結果の最大振幅 (図—5) やエネルギー



図―3 カッタートルク





写真―1 AE センサおよび振動計設置状況



(図―6) では、カッタートルクの値とは異なり立坑 切削時の方が高い値を示している。これは、コンクリー トや地山が切削される際の切削現象による波形を捉え たものであり、切削対象の違いによる AE 波形の差異 によるものと考えられる。

また、振動計による計測結果では、立坑壁切削時と 地山掘削時とで明確な違いを確認することができな かった(図一7)。以上より、AE 波形をシールド機 内から検知可能であり、切削対象によって AE 波形の 明確な違いを確認することができたため、支障物切削 において AE 技術での検知が有効であると言える。

次に,立坑壁切削時のAE計測値について最大振幅 とエネルギーの散布図(x軸:最大振幅,y軸:エネルギー) を図-8に示す。この結果より,切削における掘削速 度が一定であればAE計測値に相関関係があることが 確認できる。近似式を1つの指標とした場合,近似式 から外れる値であれば,切削時の衝撃が発生している など,切削状況が変化していると考えることができる。

4. 実工事における支障物切削時の AE 計測

(1) 工事概要

支障物(土留め鋼管矢板 φ 1.4 m)を直接切削する シールド工事(掘削外径 φ 7 m 級)で AE 計測を実施



図-8 最大振幅-エネルギーの相関図



図-9 傾斜カッター2)

した。当該工事は、支障物がカッター面全体に存在す るため、図一9に示すようなカッターヘッドに傾斜 角度をつけた傾斜カッターを採用し、支障物に対し中 心部から外周部へと切削部分を変えながら切削する。

(2) 計測方法

AE センサは、シールド機隔壁部の天端および SL 付 近の2か所に設置し AE 計測を実施した(図―10)。 計測は、地山掘削時、支障物切削時の各区間とし、連 続して計測を行った。

AE センサは金属の共振周波数である 250 kHz 帯の ものを使用し、センサ出力 0.1 µs ごとにサンプリン グし、10 ms ごとに最大振幅およびエネルギーに換算 し記録する。



(3) 計測結果

(a) 切削ステップにおける計測結果

地山掘進時の計測結果と,支障物切削時の切削ス テップごとの計測結果を切削状況とともに示す。

AE 計測結果については, 天端と SL 付近で概ね同様の計測結果であったため, 天端の計測データを用い, 切削ステップ・状況に合わせた比較を行うため, エネルギーを用いて述べる。

①地山掘削時

地山切削時のカッタートルク,AE計測値を図—11 に示す。掘進速度30 mm/minで掘進を行っているが, N値3程度の粘性土地盤を掘進しているため,カッ タートルク,AE計測値ともに小さい値を示している。 ②切削開始100 mm 付近

切削開始 100 mm 付近の切削状況およびカッタート ルク, AE 計測値を図-12, 13 に示す。

1本の鋼管矢板をシールド機中心部で切削しており, 切削範囲が徐々に増えていく状況である。カッタート ルクも切削範囲の増加にあわせ上昇し, AE 計測値も 一定幅で変動していることがわかる。なお,切削0mm ~100mm 区間においても,カッタートルク, AE 計測 値ともに徐々に上昇傾向にあることを確認している。 ③切削開始 200mm 付近

切削開始 200 mm 時の切削状況およびカッタートル ク, AE 計測値を図-14, 15 に示す。









3本の鋼管矢板を切削しており,鋼管矢板を面で捉 えている状況である。切削断面積は増加し,カッター トルクも上昇している。AE計測値は,フィッシュテー ル部の切削にあわせて周期的に上昇していることがわ かる。

④切削開始 500 mm 付近

切削開始 500 mm 時の切削状況およびカッタートル ク, AE 計測値を図-16, 17 に示す。

5本の鋼管矢板をカッター面で切削しているが,切 削断面積を比較すると,切削開始200mm時よりも小 さく,鋼管矢板を線で捉えている状況である。カッター トルクは,切削開始200mm時より大きな値を示して いるのに対し,AE計測値は小さい値を示した。 ⑤切削開始800mm付近

切削開始 800 mm 時の切削状況およびカッタートル ク、AE 計測値を図-18.19 に示す。

鋼管矢板ジョイント部をカッター面で切削している 状況である。カッタートルクは徐々に上昇し,切削開 始500 mm 時の値より大きな値を示し,AE 計測値に ついても切削開始500 mm の時より大きい値を示して いる。密な構造のジョイント部を切削することによ り、どちらの値も増加したと考えられる。

(b) 切削負荷の評価

切削位置における AE 計測値(各 100 mm 区間のエ ネルギー平均値)と切削断面積の関係を図-20 に示 す。AE 計測値の大小と切削断面積の大小が概ね合致 していることから,AE 計測値と切削断面積に比例関 係があることが推察でき,切削開始 500 mm 時の AE 計測値が小さな値を示したことも切削断面積が小さい ことが1つの要因と考えられる。

また,図-21に示す切削位置におけるエネルギー 平均値と最大振幅平均値の関係から,最大振幅とエネ











ルギーは概ね追従していることが確認でき,図-22 に示す最大振幅とエネルギーの散布図(x軸:最大振 幅,y軸:エネルギー)および近似式より,相関関係 を確認することができる。

なお,近似式を1つの指標とした場合,近似式の上 側にある時は,振幅に対しエネルギーが高いため,よ り擦ったような切削状況であり,近似式より下側にあ る時は,振幅に対しエネルギーが低く,より衝撃があ るような切削状況であると推察できる。

5. おわりに

AEの適用性検証結果から、シールド工事におい て、AE技術での検知は有効であることがわかった。 また、実工事での計測結果から、支障物切削において、 カッタートルク等のシールド機の負荷だけでは把握で きないことを、AE技術では把握できることがわかっ た。これらの計測から、支障物切削負荷検知技術の開 発に必要なAE計測データ取得および知見を得ること ができ、支障物切削負荷検知技術の開発に向けて大き な一歩となった。今後は、AE波の伝搬特性も考慮し、 支障物との接触や支障物切削時の衝撃・切削負荷の評 価指標を分析し、切削管理へフィードバックできるシ ステムの構築に取り組んでいく所存である。

JCMA

《参考文献》

- 1) 信和産業㈱.「Acoustic Emissionとは」. https://www.first-ae.jp/acoustic-emission/
- 2) JIM テクノロジー(㈱. 「技術紹介 (支障物切削)」. https://www.jimt. cojp/tech/efficiency.html



今岡 洋輔(いまおか ようすけ)
(株)大林組
生産技術本部シールド技術部
副課長

[筆者紹介]



大前 慶恵(おおまえ よしえ)
(株)大林組
生産技術本部シールド技術部
副課長



上田 潤(うえだ ひろし)
(株)大林組
生産技術本部シールド技術部
担当部長