トンネル施工時の振動を利用した前方探査手法に関する室内試験

清水建設	正会員	○若林	成樹
清水建設	正会員	西	琢郎
清水建設	正会員	中谷	篤史

1. はじめに

トンネル切羽前方の地山状況を事前に把握することは、各種対策工や支保選定を合理的に行い、工事を安全 に進めるだけでなく、急速施工やコスト低減のためにも重要である.比較的精度が見込める前方探査手法には TSP 等の物理探査や先進ボーリングなどがあるが、特殊な機材を準備し、探査時には施工を一時休止する必要 がある.そこで筆者らは施工サイクルを極力乱さず、施工のモニタリングデータから探査実施地点を選定する 手法を得ることを目的に本研究を進めている.ここでは NATM 工法による山岳トンネルを対象とし、ブレーカ ーやジャンボなどの掘削機械によって発生する振動を利用して切羽前方の地山状況を大まかに把握する 2 種 類の手法¹¹を提示し、その原理を確認するために実施した岩石ブロックによる室内試験について報告する.

2. 探查手法

掘削機械で発生した振動が切羽前方の反射面から戻ってくる一次反射波を利用する手法と,切羽と反射面間 での多重反射波を利用する手法を以下に記す.

図-1 に示す一次反射波を利用する手法では発振時刻が 特定できる振動を切羽に与え,切羽後方に設置した受振セ ンサにより直接波と反射面からの一次反射波を計測する. 得られた波形はスタッキングなどの強調処理を施し,時刻 歴波形を作成する.次に,掘削が進んだ段階で,切羽と受 振センサとの距離を一定に保持した上で同様の計測を複数 回行う.直接波と一次反射波が重なった特徴的な波形をピ ックアップすると切羽の進行に伴って特徴的な波形位置が 移動して行く.この波形位置から反射面の位置が推定され, 掘削の進行に伴い推定確度を上げていくことが可能となる.

図-2 に示す多重反射波を利用する手法も測定方法は同 じである.切羽前方に反射面が存在すると,切羽と反射面 間で多重反射波が発生し,距離に応じた周波数成分が強調 される.切羽から一定距離後方に設置した受振センサで掘 削振動を計測してスペクトル解析を行うと,掘削に伴い反 射面が近づくと,徐々に高い周波数成分が強調される.こ の周波数から反射面の位置を推定することが可能となる. また,この方法では初動の把握は不要となる.

3. 室内試験

前述した2種類の手法の原理を確認するために稲田花崗 岩の岩石ブロックを用いた室内試験を行った.岩石ブロッ クの高さ,幅は30cmとし,厚み(D)を10,15,30cmと変化 させて切羽と反射面との距離変化を模擬した.図-3に示す





キーワード 切羽前方探査,一次反射波,多重反射波,自己相関係数,スペクトル解析
連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株)技術研究所 地下技術グループ TEL 03-3820-8396

ように岩石ブロックの表裏面に受振センサを接着し、ビー玉で表面(切羽)を打撃して振動を発生させて一次 反射波、多重反射波を測定した.

4. 試験結果

厚み 15cm の岩石ブロックの表面(CH2)と裏面(CH1)での振動の計測例を図-4 に示す. 一次反射波の到達による波形変化は明確ではない. 厚み(D)10cm, 30cm も同様であった. これは岩石ブロックが薄く,打撃振動が減衰する前に一次反射波が到達するためと考えられる. 現場計

測では打撃振動がある程度減衰してから一次反射波が到達するの で波形変化は確認できると考えられる.また,厚みの変化と初動到 達時刻との関係から花崗岩の弾性波速度(Vp)は4140m/secとなった.

多重反射波に関してはコンクリートの厚みを測定する手法²⁾と同様の処理を行う.厚み15cmの岩石ブロックの多重反射波の計測例を図-5に示す.まず,多重反射波の自己相関係数を求めることにより打撃振動と多重反射波の周波数の違いを強調する.次に自己相関係数のスペクトル解析を行い,卓越周波数を求めることで打撃振動と多重反射波の卓越周波数(f₀)が求められる.卓越周波数(f₀)と弾性波速度(Vp),厚み(D)との関係は次式となる.

 $f_0 = Vp/(2 \times D)$

従って、厚み 30cm であれば 6.9kHz, 15cm で 13.8kHz, 10cm で 20.7kHz 付近に多重反射波の卓越周波数が現れることになる.図-6 に多重反射波の自己相関係数のスペクトル解析の結果を示す.厚み 30cm では打撃振動の周波数成分しか認められないが、厚みが 15cm, 10cm と薄くなる(切羽と反射面との距離が近づく)につれ、高周波 数域に多重反射波の卓越周波数が出現するのが確認できた.

5. まとめ

一次反射波,多重反射波を利用する切羽前方探査手法を提示し、
その原理を確認するために岩石ブロックによる室内試験を行った。
多重反射波を利用して切羽前方の反射面の位置を推定できる可能
性が示された。今後はトンネル現場での適用性を検証していきたい。



参考文献

1) 西琢郎ほか:トンネル掘削時の振動を利用した前方探査手法の研究,平成 23 年度 日本応用地質学会 研究発表会講演論文 集, No. 59, 2011.

2) 岩野聡史ほか:衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定,コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp547-552, 2001.



図-3 岩石ブロックを用いた室内試験状況

初動到達

4

2

0

-2

-4

-6

0.0E+00

図-4

4

3

2

1

-1

-2 -3

-4

0.8 0.6

0.4 数 0.2 0 1 -0.2

-0.4 ⊡__0.6

> -0.8 -1

> > 0.0E+00

図-5

喝 0

撮

- CH1 — CH2 — 予測到達位置

15E-04

20F-04

CH2

CH2

1.5E-04

D=15cm

 $M \sim M$

1.0E-04

時間(sec)

D=15cm

z射波

到達

1 0F-04

時間(sec)

一次反射波の計測例(厚み 15cm)

h h h

-1.0E-03 0.0E+00 1.0E-03 2.0E-03 3.0E-03 4.0E-03

時間(sec)

多重反射波の計測例

5.0E-05

反射波 到達

5 0F-05