

応力反射波法によるトンネル覆工内部の亀裂探査

Investigation of Cracks inside The Lining Concrete of Tunnel by The Ultrasonic Reflection Sounding System

清水 勉¹⁾・馬場弘二²⁾・塩月隆久³⁾・孫 建生³⁾・今枝良仁⁴⁾

Tutomu SHIMIZU, Kouji BABA, Takahisa SHIOTSUKI, Kensei SUN, Yoshihito IMAEDA

The lining concrete of Nikkureyama Tunnel at Jo-Shin-Etsu Highway has been reinforced by steel fiber concrete or carbon fiber sheets because of deformations of the tunnel at 400m of expanded mud stone area. However, many cracks were found at surfaces of steel fiber lining concrete near the carbon fiber sheets area. In this paper, the result of the investigation of cracks inside the lining concrete blinded by the carbon fiber sheets by the ultrasonic reflection sounding system are described.

Key Words: tunnel, lining concrete, investigation, cracks, ultrasonic

1. はじめに

上信越自動車道日暮山トンネルは、施工当時に膨張性泥岩区間約400mで変形・変状を著しくきたし、支保剛性の増強やトンネル断面の変更など様々な試行錯誤を繰返しながら膨圧に対処している。二次覆工については、当初プレーンコンクリート覆工巻厚80cmにて対処可能と考え4スパン施工したが、打設後まもなくクラックが観測され、計測解析の結果、鋼繊維によって補強したスチールファイバーコンクリートにて施工が継続された。また、プレーンコンクリート区間については、覆工打設後の変位計測・クラック観察の結果変状の増加傾向が認められ、供用後の安全性確保のため、炭素繊維シートによる補強工が実施されている。

しかし供用後の観測によってこのシート補強区間直近のスチールファイバーコンクリート部においてもクラックの進行が進み、またシートの浮き上がりが観察されたことで、目視観察のできないシート補強区間における覆工の強度低下や今後の安全性が懸念された。

そこで、覆工の破壊進行及び剛性低下を定量的に評価することが必要と考え、今回、覆工コンクリート内部の亀裂調査を目的とした応力反射波法による新しい探査方法を試みいくつかの知見を得ることができた。

2. 探査方法の概念

発振センサー及び受振センサーをトンネル横断面方向の覆工コンクリート内部に配置・埋設した。発振センサーから発生し覆工コンクリート内部を伝播する応力波は亀裂面で反射するが、その反射波を受振センサーが受振する。本応力反射波法とは、この反射波の走行時間、反射波の数から亀裂位置、本数を検知するも

- 1) 日本道路公団 東京第三管理局 佐久管理事務所
- 2) 正会員 日本道路公団 東京第三管理局 佐久管理事務所
- 3) 正会員 工学博士 (株)青木建設 研究所 土木研究室
- 4) 正会員 (株)青木建設 研究所 土木研究室

のであり、以下に述べる「周波数選択特性理論」¹⁾に基づき亀裂のおおよその亀裂幅を推定することの特徴とする。図-1に応力反射波法の探查概念図を示す。

波の周波数と不連続面(亀裂など)の剛性・幅の組合せにより不連続面における波の伝播特性が変化する。即ち、亀裂の剛性幅が変われば特定の周波数成分に応じて亀裂での反射率、通過率も変化する。本探查方法はこの亀裂における周波数選択特性

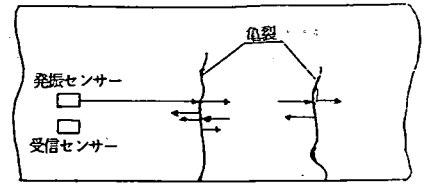


図-1 応力反射波法の探查概念図

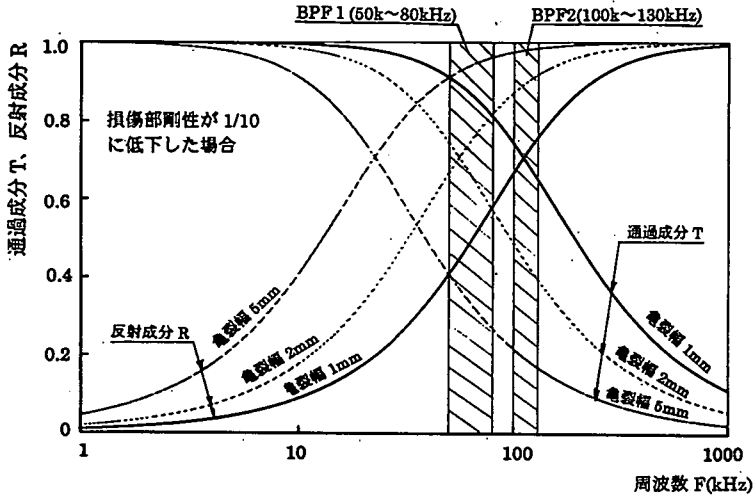


図-2 亀裂における応力波の反射・通過成分と周波数及びバンドパスフィルターの関係

に基づいており、反射波の特定帯域の周波数成分を選択し反射波を得ることによって亀裂幅を推定することができる。これを「周波数選択特性理論」と筆者らは呼び、文献1)では亀裂の剛性、幅に依存した応力波の反射率、通過率と周波数の関係式を与えている。これによると応力波の反射成分と周波数の関係及び応力波の通過成分と周波数の関係が得られる。

今回、シート補強部周辺で目視で観察された亀裂幅が微細な亀裂幅であったことから、数mmオーダーの亀裂幅の検知を目的とした。このため受振した反射波の中から特定帯域の周波数成分を選択するためにバンドパスフィルター（BPFと略称する）をBPF50～80kHzとBPF100～130kHzの2つの帯域に設定し波形処理した反射波形から亀裂幅の推定を試みた。この周波数帯にBPHを設定した理由を以下述べる。

図-2にこのバンド・パス・フィルターを表した応力波の反射・通過成分と周波数の関係を示す。尚、亀裂部(損傷部)の剛性はコンクリート杭探索の実施例^{2), 3)}から1/10に低減したと仮定している。

図-2によるとBPF50～80kHz帯域は2mmの亀裂幅に対して通過成分と反射波成分が共に0.7程である。亀裂幅が2mm以上になると反射波成分が大きくなり通過成分が小さくなる。この場合はその先の亀裂の検知は困難になる。これに対して1mmの亀裂幅に対しては通過成分が大きく(0.85程)、反射波成分が小さい(0.5程)。1mm以下の亀裂の反射波が検出しにくく1mm以上の亀裂を検出しやすい。つまり、おおよそ1mm～2mm、あるいはそれ以上の幅を有する亀裂が存在したときこのBPFで処理した波形に反射波として現われることになる。

また、図-2によるとBPF100～130kHz帯域は、1mmの亀裂幅に対して通過成分と反射波成分が共に0.7程になる。幅1mm以下の亀裂が存在するとき、それより先の亀裂の検出も可能となる。しかし、2mmの亀裂幅に対して通過成分は小さく(0.45程)、反射波成分が大きくなり(0.9程)、幅1mm以上の亀裂が存在するときは、それより先の亀裂が検出しにくくなることになる。つまり、おおよそ1mm以下、あるいはそれ以上の幅を有す

る亀裂が存在したとき、このBPFで処理した波形に反射波として現われることになる。

以上のように、BPF50～80kHzとBPF100～130kHzで処理した反射波形からおおよその亀裂幅の推定ができ走行時間と反射波の数から亀裂位置と亀裂の本数が推定できるようになる。

3. 室内実験による検証

(1) 実験概要及び計測システム構成

実際のトンネル計測に先立ち本応力反射波法の精度確認のため基礎的な室内実験を行った。事前に载荷機にて生じさせた複数の亀裂を有するコンクリート梁形状の供試体を計測対象とした。供試体に設けた箱抜き部内面に接着・固定した発振センサー及び受振センサーにて亀裂の計測を行った。計測結果と目視で観察した亀裂状態（位置、亀裂幅）の対比により探査精度の確認を行った。

図－3、図－4は供試体A（長さ2.0×幅0.2×高さ0.5m）、供試体B（長さ3.0×幅0.2×高さ0.5m）の形状図で、センサー位置の箱抜き部から供試体先端部までの距離はそれぞれ1.5m、2.5mである。目視で得た各供試体の亀裂状態は以下のとおりである。図中に供試体正面側から見た亀裂分布を実線にまた背面から見た亀裂分布を破線で示し、開口幅を併記した。

供試体A：亀裂1本、亀裂開口幅1.0～2.5mm、供試体B：亀裂5本、亀裂開口幅0.1～0.8mm

計測システム構成は以下のとおりである。

発振側：発振センサー（共振型圧電センサー）、増幅器、シンセサイザー

受振側：受振センサー（プリアンプ内蔵共振型圧電センサー）、ディスクリミネータ、オシロスコープ

(2) 実験結果の解析

受振した反射波の中から特定帯域の周波数成分を選択するためにBPF処理を行った。今回、BPF50～80kHzとBPF100～130kHzの2つの周波数帯域を用いた。前章で述べたようにBPF50～80kHz（以下、BPF1と称する）ではおおよそ1mm～2mmの亀裂幅を、また、BPF100～130kHz（以下、BPF2と称する）ではおおよそ1mm以下又はそれ以上の亀裂幅を有する亀裂を検出することになる。

a) 供試体Aの結果

BPF1処理の波形図を図－5に示す。図中の図下の横軸は走行時間(ms)、図上の横軸は距離(m)、縦軸は電圧(V)である。この波形図からコンクリートの弾性波速度を用い、反射波までの距離を式(1)から求める。

$$L = \Delta t \times V_p / 2 \quad (1)$$

ここに、L：センサー取り付け位置と反射波間の距離(m)、 Δt ：反射波の走行時間(ms)

V_p ：コンクリートの波動伝播速度(km/sec)

波形図中にある初期の複数のオーバーレンジしている波形は受振センサーのほぼ真横で発振される衝撃波が直接入力された波形であり解析上は考慮していない。この波形図の下に同じスケールの亀裂を有する供試体の図面を併記した。亀裂部の他にその先の箱抜き部と供試体端部にほぼ対応する位置に反射波が得られている。亀裂部での反射波形は提灯の形になっているが、これは亀裂の不規則な断面形状によるものと考えられる。BPF1で亀裂部で反射波を得られ、さらにその先の箱抜き部と供試体端部からも反射波を得られたことから亀裂部の亀裂幅は1～2mmであり、それ以上大きな亀裂幅ではないことが推測できる。

次に、BPF2処理の反射波形を図－6に示す。図－5と同じく亀裂部の他にその先の箱抜き部と供試体端部から反射波が得られている。亀裂部の先の箱抜き部と供試体端部から反射波が得られていることから、1mm以下の亀裂幅を有することが推測される。しかし、亀裂部はBPF1処理の波形図の図－5よりは明確な反射波形と

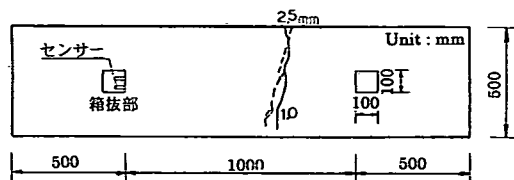


図-3 供試体A形状及び目視観察亀裂分布
(実線：正面及び破線：背面から見た亀裂分布)

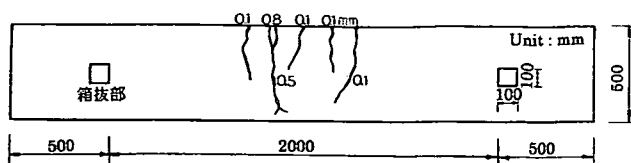


図-4 供試体B形状及び目視観察亀裂分布

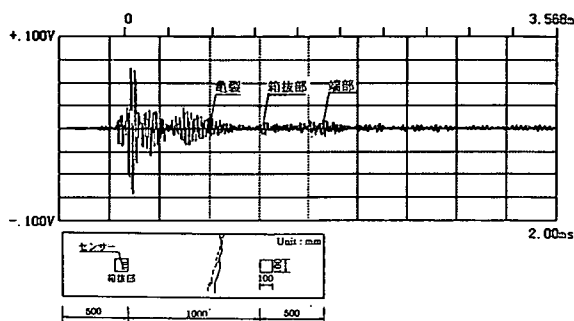


図-5 供試体AのBPF1処理波形図
(実線：正面及び破線：背面から見た亀裂分布)

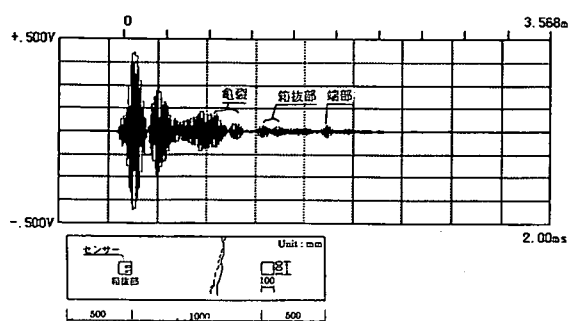


図-6 供試体AのBPF2処理波形図
(実線：正面及び破線：背面から見た亀裂分布)

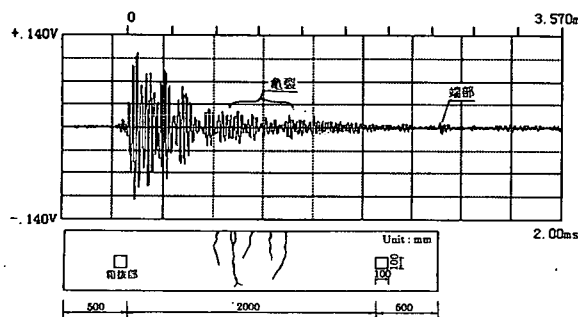


図-7 供試体BのBPF1処理波形図

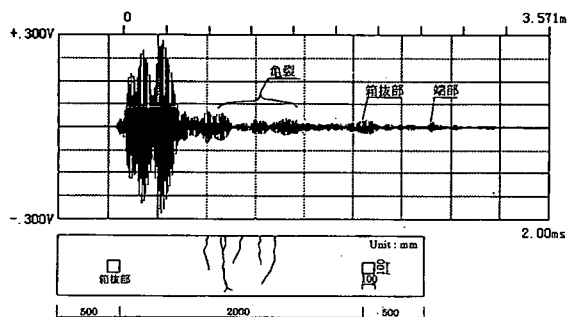


図-8 供試体BのBPF2処理波形図

なっている。また、亀裂が1本であり、伝播距離が短い。このことから実際の亀裂幅が1.0~2.5mmを有しBPF2では亀裂面での通過率が小さいにもかかわらず箱抜き部と供試体端部が検出されたことも考えられる。従って、1mm以上の開口幅の可能性をこの結果から推測できる。

以上、BPF1とBPF2の両者の結果から総合的には亀裂幅1~2mm程度と推定できる。

b) 供試体Bの結果

BPF1処理の反射波形を図-7に示す。供試体端部が検出されたが、箱抜き部は検出されず亀裂部(開口幅0.1~0.8mm)も明確な反射波が検出されなかった。BPF1の場合1.0mm以下の亀裂幅に対して反射波成分が小さく、計測ノイズに混じり検出できていない。

BPF2処理の反射波形を図-8に示す。ほぼ亀裂位置に対応する反射波を得ている。さらに、箱抜き部、端部から反射波を得られている。BPF2 範囲の周波数成分の応力波は1mm程度の開口幅の亀裂面で通過成分と反射波成分がほぼ等しくなり、幅1mm以下の開口幅になると通過成分は大きくなる。本供試体の亀裂はほぼ密着し亀裂幅が小さい(0.1~0.8mm)ため、BPF2のとき、複数のそれぞれの亀裂からの反射波を得られると共にその先の箱抜き部、端部の検出が可能となった。尚、第2本、第3本、第4本の亀裂からの反射波が重畳して

表－１ 供試体A実験結果：検出亀裂の推定幅と実測幅の対比

B P F	亀裂他	亀裂検出	推定幅	実測幅
BPF1 (50～80kHz)	第1本	○	1～2mm	1.0mm～2.5mm
"	箱抜き部	○		
"	供試体先端部	○		
BPF2 (100～130kHz)	第1本	○	1mm以下、又はそれ以上	1.0mm～2.5mm
"	箱抜き部	○		
"	供試体先端部	○		

表－２ 供試体B実験結果：検出亀裂の推定幅と実測幅の対比

B P F	亀裂他	亀裂検出	推定幅	実測幅
BPF1 (50～80kHz)	第1本	△		0.1mm
"	第2本	△		0.1mm
"	第3本	△		0.1mm
"	第4本	△		0.5mm～0.8mm
"	第5本	△		0.1mm
"	箱抜き部	×		
"	供試体先端部	△		
BPF2 (100～130kHz)	第1本	○	1mm以下	0.1mm
"	第2本	○	1mm以下	0.1mm
"	第3本	○	1mm以下	0.1mm
"	第4本	○	1mm以下	0.5mm～0.8mm
"	第5本	○	1mm以下	0.1mm
"	箱抜き部	○		
"	供試体先端部	○		

いる。これはそれぞれの亀裂が斜めになってセンサー軸線の投影が重なっているためである。

(3) 解析結果のまとめ

室内基礎実験における亀裂を検出した結果と推定亀裂幅及び実際の亀裂幅を対比させた表－1（供試体A）及び表－2（供試体B）を示す。供試体Aの結果では表－1に示すように、BPF1の場合、上述のように推定幅を1～2mmとしたのに対して実測幅は1.0～2.5mmであり両者はほぼ合致している。BPF2の場合、同じく上述のように推定幅を1mm以下又はそれ以上としたのに対して実測幅の値とほぼ合致している。

次に、供試体Bの結果では表－2に示すように、BPF1の場合、亀裂からの明確な反射波を得られていない。BPF1の対象推定幅の1～2mmに対して実測幅は0.1～0.8mmであり、通過成分が大きく反射波が計測できないことと合致する。BPF2の場合、亀裂からの反射波を得ており、推定幅1mm以下又はそれ以上に対して実測幅は0.1～0.8mmであり両者はほぼ合致している。本計測法によって亀裂位置の検知とおおよその亀裂幅の推定が可能であることがほぼ検証できたと考える。

尚、A、B 供試体先端部からの反射波の走行時間は各0.76ms、1.24msであった。センサー取り付け位置から供試体端部までの距離は1.5m、2.5mであり、先の式(1)から V_p を計算するとコンクリートの波動伝播速度は3.94km/sec、4.05km/secとなる。供試体作製時に採取した3本のテストピースの超音波透過試験結果は $V_p=4.01\text{km/sec}$ （平均値）であり、反射波の走行時間から計算した結果とほぼ一致する（誤差 -2%、+1%）。

4. トンネル覆工コンクリート内部亀裂探査への適用

(1) センサー設置位置の決定及びセンサーの取り付け

弾性応力波はコンクリート材料内で減衰し、その伝播距離は材料特性、内部亀裂に依存することは

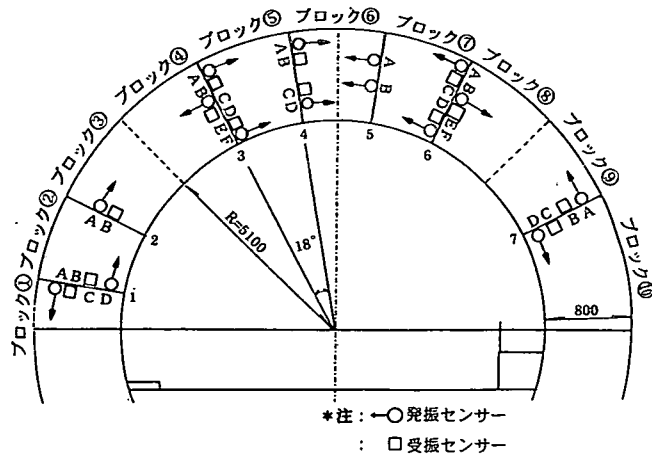


図-9 センサー埋設位置及び計測ブロック割り、トンネル横断面図

もちろん計測システムの感度、周波数特性にも依存する。前節の室内実験結果では距離2.5mの反射波が得られた。安全側に最大測定範囲を1.8mとしてのトンネル横断面（覆工巻厚80cm、トンネル半径 $R=5100\text{mm}$ ）を図-9に示す計測ブロック①～⑩に分割し各センサーの配置を決めた。

覆工コンクリートを径 $\phi 100\text{mm}$ のコアドリルで削孔し、センサーを固定したアクリル製治具を挿入した後、グラウトモルタルを孔内に充填した。各治具間でセンサーが合い向かうように、センサーの取り付け角度をトンネル横断面接線方向に対して9度とした。計測システムは前章の室内実験と同じものを用いた。

(2) 探査結果

a) 計測結果例

探査結果の例としてトンネルクラウン部（図-9中のブロック⑤）の波形図を図-10～図-13に示す。図中、図下の横軸は走行時間（フルスケール：2.0ms、1マス：0.2ms）、縦軸は電圧（V）である。

覆工コンクリートの弾性波速度 V_p はコアボーリング試料より $V_p=3.8\text{km/sec}$ とした。室内実験結果と同じように、波形図中にある初期の複数のオーバーレンジしている波形は受振センサーのほぼ真横で発振される衝撃波が直接入力された波形であり、解析上考慮していない。以下、解析結果を述べる。b) トンネル内空側（ブロック⑤）の計測結果

トンネルクラウン部のブロック⑤はトンネル内空側とトンネル地山側の2側線で計測した。まず、トンネル内空側の結果を示す。図-10はBPF1処理した反射波形の結果であり、図-11はBPF2処理した結果である。BPF1ではほぼ1～2mm幅の亀裂を、BPF2ではほぼ幅1mm以下又はそれ以上の亀裂を検知する。図-10に示すように波形立ち上がりから反射波位置までの走行時間0.22, 0.35, 0.47, 0.58, 0.69, 0.85, 1.03msにそれぞれ亀裂と思われる複数の反射波を得た（図中の番号1～7の反射波）。上式(1)から求めるとセンサーからの距離は0.41, 0.67, 0.89, 1.11, 1.31, 1.62, 1.96mとなる。同様に図-11中に走行時間0.28, 0.38, 0.66, 0.73, 0.78msの位置に亀裂と思われる反射波を得た（図中の番号1～5の反射波）。同じくセンサーからの距離は0.54, 0.71, 1.25, 1.38, 1.49mが求まる。

この結果を考察すると以下になる。

- i) 亀裂部の波形は提灯の形になっているが、前述した室内試験で述べたように亀裂の不規則な形によるものである。
- ii) 7本程度の1～2mm幅の亀裂（BPF1の結果）、5本程度の幅1mm以下の亀裂（BPF2の結果）を検知した。
- iii) 室内試験ではBPF2の場合に長さ2.5mの供試体B（亀裂幅0.1～0.8mm）の端部から反射波を得たのに対し、トンネル内空側では距離1.49mまでの反射波しか得られなかった。7本の1～2mm幅の亀裂が存在する

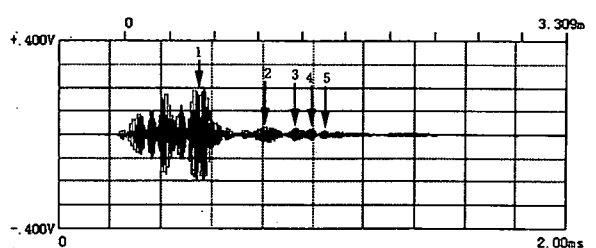
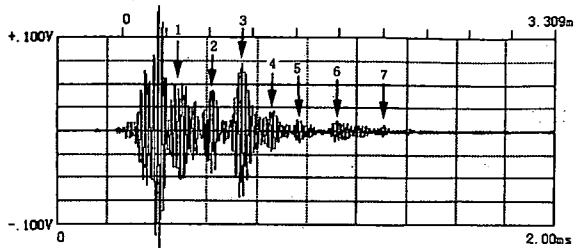


図-10 ブロック⑤トンネル内空側BPF1処理波形図 図-11 ブロック⑤トンネル内空側BPF2処理波形図

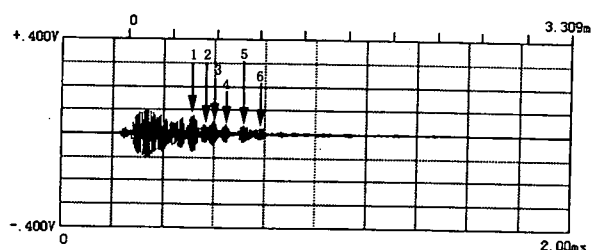
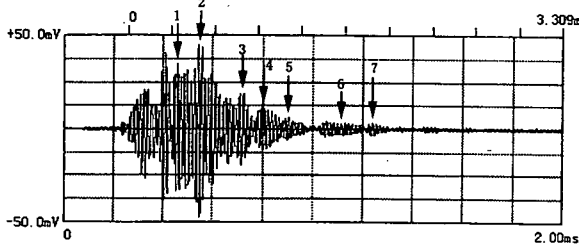


図-12 ブロック⑤トンネル地山側BPF1処理波形図 図-13 ブロック⑤トンネル地山側BPF2処理波形図

など少なくとも損傷度が供試体Bより大きい状態にあると考える。

c) トンネル地山側（ブロック⑤）の計測結果

トンネル地山側の結果を示す。図-12はBPF1処理波形の結果であり、図-13はBPF2処理波形である。

図-12に示すように波形立ち上がりから反射波位置までの走行時間0.22, 0.29, 0.45, 0.54, 0.64, 0.86, 0.98msにそれぞれ亀裂と思われる複数の反射波を得た（図中の番号1～7の反射波）。センサーからの距離は0.42, 0.54, 0.86, 1.02, 1.21, 1.63, 1.87mである。同様に図-13中に走行時間0.26, 0.30, 0.34, 0.39, 0.45, 0.51msの位置に亀裂と思われる反射波を得た（図中の番号1～6の反射波）。同様に計算するとセンサーからの距離0.49, 0.57, 0.64, 0.73, 0.86, 0.97mが求まる。

この結果を考察すると以下ようになる。

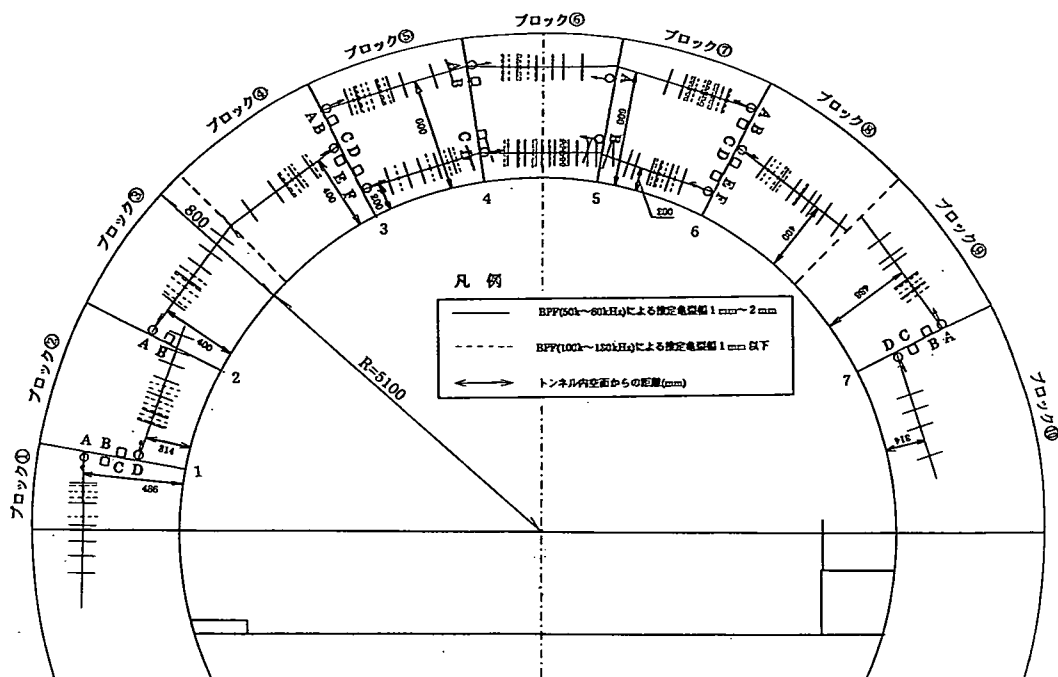
- i) 7本程度の1～2mm幅の亀裂（BPF1の結果）、6本程度の幅1mm以下の亀裂（BPF2の結果）を検知した。
- ii) 室内試験ではBPF2の場合に供試体A（亀裂幅1.6～3.0mm）の距離1.5mの端部から反射波を得たのに対しトンネル内地山側の計測では距離0.97mの反射波しか得られなかった。損傷度が供試体Aより大きい状態にあると考える。

ブロック⑤の上記の計測結果から、トンネル内空側と地山側の両方に多くの亀裂が検出され、ほぼ亀裂が覆工コンクリート厚さにわたって分布しているものと推測する。相対的にBPF2のときの到達伝播距離が内空側1.49m＞地山側0.97mであることから、内空側に比べ地山側の損傷度が大きくなっていると考えられる。

d) 全体の計測結果及び考察

覆工コンクリート内部の各計測ブロックで検知された亀裂状態（位置、亀裂幅）をトンネル横断面図に示す（図-14）。この結果から以下のことが考察できた。

- i) クラウン部（計測ブロック⑤、⑥、⑦）のトンネル内空側と地山側の2側線で検出された反射波の本数から、トンネル内空側と地山側の両方に多くの亀裂があり覆工コンクリート厚さにわたって亀裂が分布していると推定する。また、応力波の到達伝播距離の差からクラウン部で内空側に比べ地山側の損傷度の大きいことが分かった。
- ii) トンネル横断面全体の亀裂の分布密度は、相対的にクラウン部（計測ブロック⑤、⑥、⑦）→下り線



図－１４ 推定亀裂位置及び亀裂幅・トンネル横断面図

側（計測ブロック①，②，③）→上り線側（計測ブロック⑨，⑩）順に亀裂本数が少なくなっていることが分かった。

- iii) 今回，他に内部応力測定，内空変位測定等を行っている．それらの結果からトンネル構造体が地山からの偏圧（外圧）を受けた状態にあることも想定される．これに補強シート部によって内空側が拘束されその結果地山側の塑性が進行した状態も考えられる．今後，各種の継続計測を予定しており今回の内部亀裂測定結果と併せて全体的なトンネルの挙動について検討を行いたい．

５．おわりに

計測を実施した日暮山トンネルは暫定二車線区間に位置し通常期の交通規制が制限されているため，遠隔操作による計測が不可欠であり，前述のように炭素繊維シートによる補強のため目視観察が困難となっている．このような条件下で実施された今回の探査結果からは，覆工コンクリートの内部亀裂状況を評価する手法として有効である結果が得られ，今後の危機管理，破壊予知検討のために一役をなす探査手法と考える．さらには，今後当該計測において設置した圧電センサーによる覆工コンクリート内部破壊で発生する音の自動計測への移行も可能であり幅広い運用計画立案のメリットを併せ持つことも付け加えておくものである．

参考文献

- 1) 特許庁：杭または構造物欠損の動的診断方法，特許第2877759，平成11年1月22日．
- 2) 塩月隆久・孫 建生・永井哲夫・池尻 健：構造物（特に地下構造物）の損傷度非破壊探査システムの開発，第32回地盤工学研究発表会講演概要集，pp. 1659-1660，1997．
- 3) 孫 建生・塩月隆久・永井哲夫・池尻 健：コンクリート構造物非破壊探査システムの開発，土木学会耐震補強・補修技術及び耐震診断技術に関するシンポジウム，1997. 7．