

地下空間保守管理のための新しいひび割れ探査技術

The new investigation of crack for the maintenance of the underground space

小林賢一・荒木宏則・海野忠行・池尻 健

Kenichi KOBAYASHI, Hironori ARAKI, Tadayuki UMINO and Takeshi IKEJIRI

The crack is seen most generally in damaged underground space. And we can estimate the condition of ground pressure, the progress of damage and the cause of damage by observing the crack. Accordingly, the crack is measured frequently for the maintenance of the underground space. In this situation we think that it is important to measure “depth of the crack” that can evaluate the progress of the crack directly. However, there are many problems when we apply the technology that measures “depth of the crack” by the supersonic wave that are used well to the concrete structure.

Thereupon, we propose the method that evaluates of “depth of the crack” by using the new measuring technology. It is the measuring technology that used the damping property of Rayleigh wave. And we apply this method in an actual tunnel lining.

Key words : non-destructive testing, depth of the crack, Rayleigh wave, damping property

1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れは、地下空間（トンネル、地下発電所等）の変状現象で最も一般的に見られるものであり、その分布を測定することにより、荷重のかかり方、変状の進行状況、変状の原因等がある程度推定することができる。従って、現状の地下空間の維持管理においては、ひび割れ分布が頻繁に測定されている。その中の「ひび割れ深さ」は、特に現状のトンネルの維持管理では「詳細調査」のみで測定されているものの、トンネル健全度判定およびひび割れの生じたトンネル覆工に対する合理的な変状対策工を設計する際、重要な検討材料となる「ひび割れの進行性」を直接的に評価できるパラメータであるので、その測定は有意義である。しかし、現在、一般的に採用されている超音波を用いた「ひび割れ深さ」の測定技術では、コンクリートを対象に超音波法を適用した際に生じる種々の問題により、その測定精度が十分であるとは言い難い。

そこで、本論文では、レイリー波の減衰特性に着目した新しい測定技術を用いて、「ひび割れ深さ」を精度よく測定できる手法を提案する。そして、実際の発電用水路トンネルに本手法を適用し、その妥当性を検証するとともに、地下発電所の躯体コンクリートへの試験適用事例を紹介する。

キーワード：非破壊探査、ひび割れ深さ、衝撃弾性波法、レイリー波、減衰特性

* 東京電力株式会社 松本電力所

** 正会員 株式会社セントラル技研 技術部

2. ひび割れ深さの測定意義

2.1 現状のトンネルの維持管理における「ひび割れ深さ」の測定意義

ここでは、地下空間の中でトンネルに着目し、その現状の維持管理におけるひび割れ深さの測定意義について考察する。表－1は、既設の道路トンネル¹⁾および鉄道トンネル²⁾の維持管理におけるひび割れ深さの測定についてまとめたものである。尚、参考までに、現場施工のRC構造物³⁾についても併記した。

表－1 現状の維持管理における「ひび割れ深さ」の測定

構造物	道路トンネル	鉄道トンネル	RC構造物
位置づけ	「詳細調査」において、「ひび割れの形状変化調査」として測定される。	「詳細な調査」において、「ひび割れ測定」として測定される。	「詳細調査」において、「ひび割れの詳細調査」として測定される。
調査目的	ひび割れの原因推定および形状変化の進行性を計測することにより、変状が進行している可能性を判断する。	荷重のかかり方、変状の進行状況、変状原因等を推定する。	原因推定および補修の要否を判定するための高度な技術的判断資料として用いる。
調査方法	超音波・はつり・ボーリング	超音波・はつり・ボーリング	超音波・はつり・ボーリング
健全度判定への反映	「外力による変状に対する判定」においてひび割れの進行性を評価する際、参考にする。	「外力の変化による変状に対する判定」において変形の進行を評価する際、参考にする。	「耐久性・防水性」および「耐力」から補修の要否を判断する際、参考にする。

同表より、現状の既設トンネル（道路・鉄道）およびRC構造物の維持管理においてひび割れ深さは、詳細調査の1つとして測定されることが分かる。尚、詳細調査とは、通常の調査では維持管理のための情報が十分に得られない際、実施される調査である。従って、現状では、ひび割れ深さは頻繁に測定されてないと考えられる。ただし、同表より、詳細調査結果を用いて補修の要否を判断する際、「ひび割れの進行性」の評価は重要なポイントであり、それを直接的に評価できるパラメータであるひび割れ深さは、上記の有効な判断材料と考えられる。

2.2 変状対策工の検討における「ひび割れ深さ」の測定意義

上記の調査結果からトンネル健全度が評価され、変状対策工の必要があると判断された場合、その設計方法が検討される。最近、それらを合理的に行うために、従来から用いられていた過去の類似例に基づく設計方法と併せて、ひび割れが生じたトンネル覆工の耐力を考慮した設計方法が検討されている。ここでは、上記の現状について整理し、変状対策工の検討におけるひび割れ深さの測定意義について考察する。

ひび割れが生じた無筋のトンネル覆工の挙動を評価する際には、ひび割れ断面の挙動を適切にモデル化する必要がある。そして、それをモデル化する際には、トンネル覆工の破壊過程を把握する必要がある。トンネル覆工の破壊過程については、これまでいくつかの実験的研究が報告されている。今田ら⁴⁾は、道路トンネルを想定したトンネル覆工の載荷実験により、トンネル覆工は周辺地山により弾性支承されたアーチ構造物であり、土圧等の外力により覆工部材の一部にひび割れが発生しても、構造物は破壊に至らないことを示している。従って、トンネル覆工の最終的な破壊荷重を算定するためには、ひび割れが生じた覆工の挙動を追跡する必要があると報告している。また、朝倉ら⁵⁾は、鉄道トンネルを想定したトンネル覆工の模型載荷実験結果により、峯本ら⁶⁾はコンクリートの円環載荷実験結果により同様の結果を報告している。このことから、ひび割れを生じた覆工耐力を評価する際には、「ひび割れの進行性」を的確に評価する必要がある。

そして、実際にひび割れの生じたトンネル覆工耐力を評価した例として、変状トンネル対策工マニュアル⁷⁾では、ひび割れ発生進展を考慮したひび割れ断面モデルを骨組解析手法に組み込んだ解析（ひび割れ進展解析）を適用することにより、変状対策工を検討している。また、桜井らは⁸⁾、ひび割れの進展に伴うコンクリートの破壊現象をシミュレートする解析を適用することにより、トンネル覆工耐力の評価を試みている。

以上のことから、ひび割れを生じたトンネル覆工に対して、合理的な変状対策工の設計を実施するためには、「ひび割れの進行性」の的確な評価が必要である。従って、それを直接的に評価できるパラメータである「ひび割れ深さ」を測定することは有意義である。

3. 現状のひび割れ深さの測定方法とその問題点^{9) 10)}

現状のひび割れ深さの測定方法としては、コンクリート中に放射する弾性波を電気的外力により発振させる超音波法が一般的に採用されている。ここでは、その中で比較的適用頻度が高い、超音波の伝播時間を用いた方法についてまとめる。尚、本方法では、発振された縦波がひび割れ界面で回折することを利用して、表-2および図-1に、その代表的な方法についてまとめる。

表-2 代表的なひび割れ深さの測定方法の特徴

測定方法	測定原理	計算式
$T_c - T_0$ 法	発・受振子をひび割れからそれぞれ等距離に配置したときの伝播時間 T_c とひび割れのない近傍表面での伝播時間 T_0 からひび割れ深さ y を計算する。	$y = a \sqrt{\{T_c / T_0\}^2 - 1}$
T法	発振子をひび割れから a の距離に固定し、受振子をひび割れ方向と直角方向に一定間隔で移動したときの走時曲線から不連続時間 T を求め、ひび割れ深さ y を計算する。	$y = \{T \cot \alpha (T \cot \alpha + 2a)\} / \{2(T \cot \alpha + a)\}$
BS法	発振子・受振子をひび割れから各 $a_1 = 150\text{mm}$ 、 $a_2 = 2a_1 = 300\text{mm}$ にしたときの伝播時間 t_1 、 t_2 からひび割れ深さ y を計算する。	$y = 150 \sqrt{\{4t_2^2 - t_1^2\} / \{t_2^2 - t_1^2\}}$

また、上記の方法以外にも、SH法、レスリー法、近距離迂回波法、S-S法、R-S法等が提案されている。

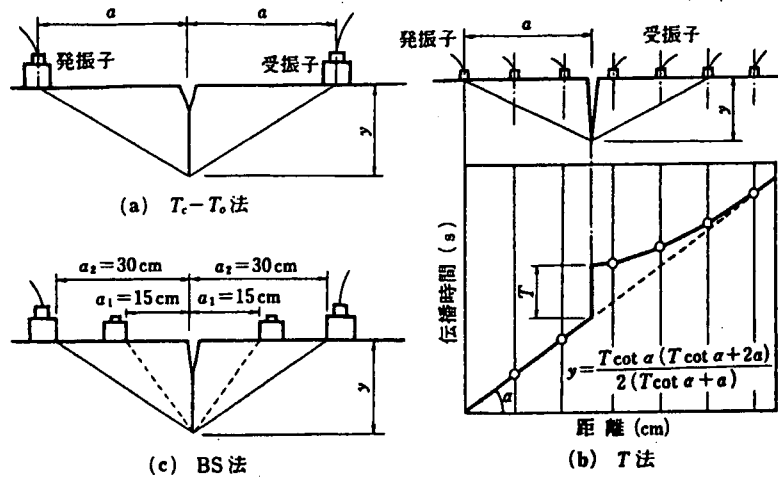


図-1 代表的なひび割れ深さの測定方法

一方、超音波の伝播時間を用いた方法については、主に以下の問題点がある。

(a) 縦波の伝播時間の測定誤差に関するもの

- ・本方法のような「表面法」において、受振子に受振される縦波のエネルギーは、透過法（直接法）の2～3%に過ぎない¹⁰⁾。従って、受振子間の距離が離れ、縦波の振幅が小さくなった際、受振波形の立上りが不鮮明になり伝播時間に測定誤差が生じる。
- ・測定対象とするひび割れが深くなるほど受振子に伝播する縦波の振幅が小さくなるので、受振波形の立上りが不鮮明になり伝播時間に測定誤差が生じる。

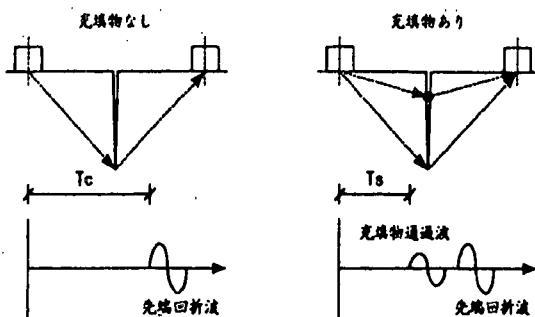


図-2 縦波の伝播特性による測定誤差

(b) 縦波の伝播特性に関するもの（図-2）

鉄筋、充填物（ひび割れ先端の水、粉じん、遊離石灰等）および粗骨材とひび割れ断面との部分接触等がある際、その部分を縦波が伝播するため、実際のひび割れ深さを浅く評価してしまう可能性がある。

しかし、最近、これらの問題点を解決するために新しい測定方法が開発されている。すなわち、回折波法（ランプ法）は、初動波の立上りの位相が変化する位置を探し、位相変化点からひび割れまでの距離がひび割れ深さに等しいとするものである。また、超音波スペクトロスコーピー¹¹⁾は、ひび割れ深さが周波数領域で応答特性に反映されることを利用したものであり、受振波形をフーリエ変換して得られる応答スペクトル関数を用いられている。さらに、受振波の最大振幅の変化を利用したひび割れ深さの評価方法も提案されている¹²⁾。ただし、いずれの方法も「超音波」を用いた方法であり、材料の基本組織の大きさと波長が同程度になると超音波が錯乱し、その透過性が低下する等、これらには複合材料であるコンクリートに超音波を適用する際に生じる特有の問題を含んでいる。

4. レイリー波を用いたひび割れ深さの測定技術

4.1 レイリー波の特徴

現状の測定技術の問題点を踏まえ、本研究では、媒体（土、アスファルト、コンクリート等）の表面を力学的外力により打撃した際に発生する弾性波（衝撃弾性波法）の中で、「レイリー波」に着目し、それを用いた新しいひび割れ深さの測定技術を開発した。レイリー波は弾性波の一種で、媒体表面より一定深度の範囲にしか存在しないことから、表面波に属する。以下にレイリー波の特徴についてまとめる。

- (a) レイリー波は媒体表面を打撃した際に発生する弾性波の中では、エネルギーが最大である。
- (b) レイリー波は媒体のせん断剛性の影響を受ける。
- (c) レイリー波の振幅は、表面からの深度が増加するとともに、急激に減少する。

(a) の原因については、打撃により発生する弾性波のエネルギー中でレイリー波のエネルギーの割合が大きいこと（縦波：7%、横波：26%に対して、レイリー波は67%である¹⁰⁾）、および実体波（縦波・横波）に比べてレイリー波の減衰が少ないすなわち、媒体を伝播する弾性波の中でレイリー波のエネルギーが最も大きい（発振源からの距離 r における実体波の減衰が $1/r^2$ に比例することに対して、レイリー波の減

衰は $\sqrt{1/r}$ に比例する)ことが挙げられる¹³⁾。従って、表面における弾性波を利用した種々の測定(表面法)において、レイリー波が最も採取しやすい。

(b)については、レイリー波による媒体粒子の動きは波の進行方向に対して垂直であるので、レイリー波は媒体のせん断剛性の影響を受ける(図-3)。従って、レイリー波を用いれば、せん断剛性の小さい充填物および粗骨材とひび割れとの部分接触等が与える測定結果への影響を軽減することが可能である。

図-3 レイリー波による粒子の動き

(c)については、大部分のエネルギーは、表面から1倍波長の

の範囲に収まると考えられる。尚、本方法においては、使用するハンマーの大きさを変えることにより、発生するレイリー波の波長を変え、対象とする測定深度を確保している。

以上のことから、ひび割れ深さの測定において、レイリー波を用いた方法は、現在、最も採用されている超音波法の問題点(縦波の振幅および伝播特性に関するもの)をカバーする有効な方法である。

4.2 測定原理

本方法の基本概念を図-4に示す。その測定原理は、以下の通りである。すなわち、レイリー波の伝播過程では、波頭が広がるにつれて単位面積でのエネルギー密度は減少する(幾何減衰)。また、コンクリートには粘性による減衰も存在する(材料減衰)。従って、これらの減衰を補正することにより波のエネルギー(振幅)を常に一定な値に保つことが可能である。しかし、ひび割れがある場合

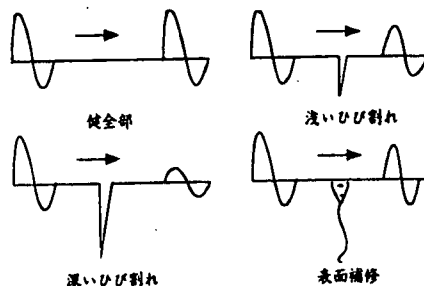


図-4 本測定技術の基本概念

には、レイリー波がある程度遮断され、ひび割れ以降では振幅が減少する。つまり、ひび割れの存在により、その前後における波の振幅は変化する。このとき、ひび割れが深くなるほど、その変化は大きくなる。以上のことから、幾何減衰および材料減衰を補正し、レイリー波の振幅の変化を測定すれば、ひび割れの有無および深さを推定できる。ただし、本方法では、ひび割れ深さが同じでも壁厚(例えば、トンネル覆工厚)が変化すれば振幅比も変化すると考え、それに対する補正も行っている(壁厚補正)。尚、上記により、図-4に示すように表面補修をしても、本方法を用いればひび割れ深さの測定が可能と考えられる。

上記の原理を用いて、ひび割れ深さを測定するためには、ひび割れ深さ H と振幅比 x との関係を評価する必要がある。しかし、この関係を理論的に算定するのは非常に難しいため、本方法では、これらのパラメータの関係を式(1)のように仮定する(図-5)。

$$H/\lambda = C' \ln(x) + C_0 \dots \dots (1)$$

ここで、 H : ひび割れ深さ、 λ : 波長、 x : 振幅比(ひび割れ後の各センサーで採取した振幅の平均値とひび割れ前の振幅の平均値との比)、 C' および C_0 : 定数を示す。

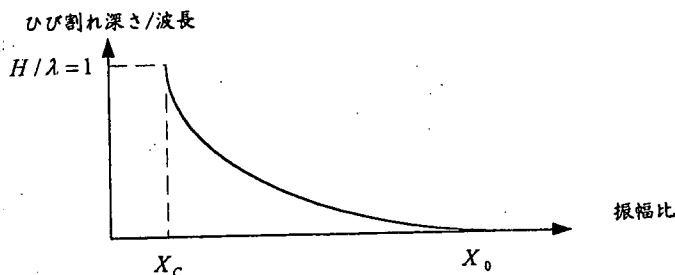


図-5 ひび割れ深さ(H/λ)と x との関係

尚、式(1)における定数 C_0 および C' は、 C_0 に関しては、各補正によりひび割れが無い ($H = 0$) ときの振幅は変化しない ($x = x_0 = 1$) ので、式(1)より $C_0 = 0$ となる。また、 C' に関しては、ひび割れ深さを変化させた人工ひび割れ (幅 1.5mm) を含むコンクリートブロック供試体 (B-1 ~ B-4) を対象に実施した室内試験結果より評価する。人工ひび割れ供試体は、厚さ 1.5mm の鉄板をコンクリート硬化後に引き抜くことにより作製し、鉄筋は用いていない。供試体の形状を図-6に示す。さらに、ここでは、ひび割れ幅の変化が結果に与える影響を小さいものと考え、ひび割れ幅は一定として、試験を実施している。

ひび割れ深さの異なる供試体 (B-1 ~ B-4) に対して、 λ を変化させて求めた x を式(1)に代入して求めた $C (= C' \lambda)$ と λ との相関を図7に示す。同図より両者の相関は良好であることが分かる。従って、式(1)は、式(2)に変形できる。

以上のことから、式(2)にレイリー波の波長 λ および測定結果 (減衰比 x) を代入すれば、ひび割れ深さを求めることができる。

$$H = -0.7429 \lambda \ln(x) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、図-7の試験結果には、発振方法 {ハンマーサイズ: ミニ (M)、小 (S)、中 (I) および超音波発振子 (U)}、発振距離 (0.0025 m、0.10 m および 0.20 m) およびセンサー間隔 (5 cm および 10 cm) を変化させたものを含んでいる。

4.3 システムの構成

本方法のシステムは、ハード部分 (計測ドライバー) とソフト部分 (解析および処理ソフト) から構成されている (写真-1)。尚、上記の計測ドライバー、解析および処理ソフトは、すべて C++ または VisualC++ を用いて独自に開発したものであり、容易にソフトの改良およびメンテナンスを行うことができる。各部分の構成は以下の通りである。

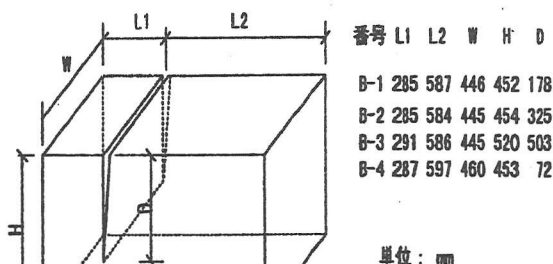


図-6 人工ひび割れ供試体

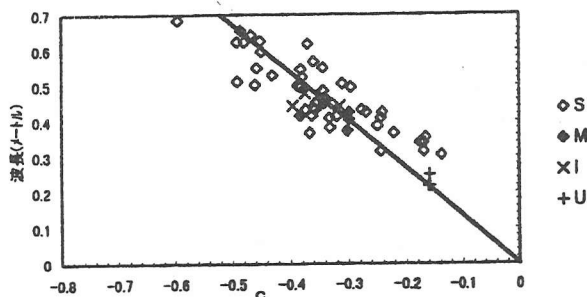


図-7 Cと波長 λ との関係

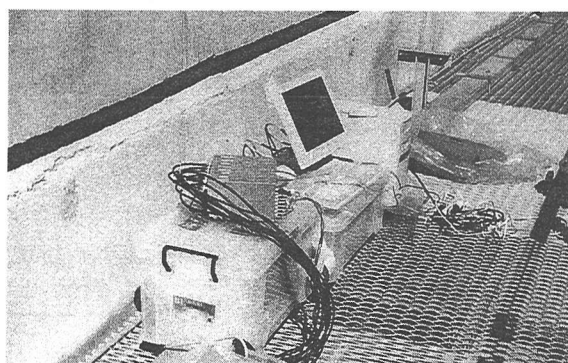
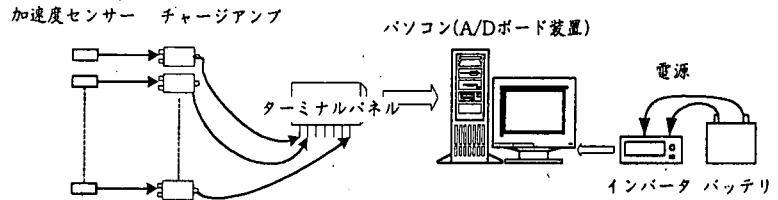


写真-1 測定システム

a) ハード部分の構成

ハードの構成を図－8に示す。尚、受振子は、加速度ピックアップ（NP-2120、共振周波数：30kHz）を採用している。



図－8 ハード部分の構成

b) ソフト部分の構成

独自に開発した解析および処理ソフトにより、採取したデータのノイズ除去および分析をして、ひび割れ深さを計算する。尚、測定結果に対する主な補正としては、前述したとおり、幾何減衰補正、材料減衰補正および壁厚補正を実施している。それぞれの基本的な考え方を表－3にまとめる。

表－3 各補正の基本的な考え方

	基本的な考え方
幾何減衰補正	センサーおよび発振位置を考慮し、補正する。
材料減衰補正	材料の損失係数および波長に依存する材料の内部減衰を考慮し、補正する。
壁厚補正	半無限体および薄い壁におけるレイリー波のエネルギー分布を幾何学的に比較し、補正する。

4.4 測定誤差を軽減する方法

a) 測定誤差の種類、原因および対策

測定対象のトンネル覆工は、金属材料と異なり不均一である。また、トンネル内では湿気、覆工表面の汚れ等があり、作業環境も厳しい場合が多い。さらに、本方法は、ひび割れ前後のセンサーで採取した波の「振幅」を比較するため、測定誤差は波の「伝播時間」を測定する方法に比べ大幅に増加すると考えられる。従って、トンネル覆工を対象に本方法を用いて正確な測定結果を得るためには、測定誤差を除去し、精度を向上させることが大きな課題である。ここでは、本方法において問題となる測定誤差の種類、原因および対策を表－4にまとめる。

表－4 測定誤差の種類、原因および対策

種類	原因	対策
偶然誤差	・ 環境ノイズ ・ 電気ノイズ	・ 複数のセンサーを使う。 ・ 複数の発振を行う。
定誤差	・ システムの固有誤差 ・ センサーの貼付けによる誤差	・ 測定システムのキャリブレーションを行う。 ・ 「双方向発振法」により誤差を軽減する。

b) 双方向発振法による誤差の低減

表－4に示す「双方向発振法」は、上記の定誤差を軽減するために新たに考案した手法である。本手法は、図－9に示すように、まず、左側（ch0）から発振してch0→ch1→…ch7→ch0の順にデータを採取する。次に、そのままセンサーを貼り付けた状態で、反対側（ch7）から発振してch7→ch6→…ch0→ch7の順にデータを採取する。そして、双方向で測定した結果を平均処理すれば、センサーの貼付けによる影響やシステムの固有誤差等が低減できると考えられる。以下に本手法の原理を、ひび割れ前後に各1個ずつセンサーを貼り付け、ひび割れによる減衰率を求めた例を用いて、具体的に説明する（図－10）。

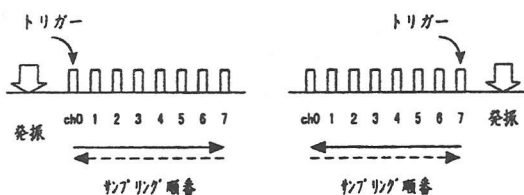


図-9 双方向発振法の原理

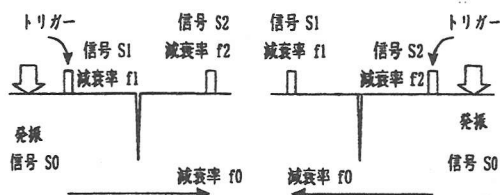


図-10 双方向発振法による誤差除去

ひび割れによる減衰率を f_0 、ch1 および ch2 におけるセンサー貼付け等による減衰率をそれぞれ f_1 および f_2 とし、発振した信号の大きさを S_0 、ch1 および ch2 で採取した信号をそれぞれ $S_1 (= S_0 \cdot f_1)$ および $S_2 (= S_0 \cdot f_0 \cdot f_2)$ とすれば、ch1 から発振した際の信号比 η_1 は式 (3) に示される。

$$\eta_1 = S_2 / S_1 = f_2 \cdot f_0 / f_1 \dots\dots\dots (3)$$

同様に、ch2 から発振した際の信号比 η_2 は式 (4) に示される。

$$\eta_2 = S_1 / S_2 = f_1 \cdot f_0 / f_2 \dots\dots\dots (4)$$

従って、この2つの信号比を平均処理すれば、 f_0 を求めることができる。

$$f_0 = \sqrt{\eta_1 \cdot \eta_2} \dots\dots\dots (5)$$

5. 実際の土木構造物への適用

5.1 水路トンネル覆工への適用性

ここでは、実際の水路トンネル覆工（無筋コンクリート）を対象に本方法を適用し、その妥当性を検証する。具体的には、トンネル覆工に生じたひび割れに対して、本方法によるひび割れ深さの測定結果とコア抜きにより採取したボーリングコアの



写真-2 測定状況

目視観察により求めたひび割れ深さの測定結果を比較する。測定状況を写真-2に示す。尚、ここでは、本方法との比較のために、複数センサーを用いて前述の「T法」とほぼ同じ原理で、波の伝播時間を利用して、ひび割れ深さを測定する（以下、速度法と記す）。ただし、速度法では「T法」と異なり、超音波よりも発振エネルギーが大きな衝撃弾性波を用いている。

図-11に本方法による測定結果（推定値）とコア抜きによる測定結果（実測値）との比較、図-12に速度法による推定値と実測値との比較を示す。同図より、本手法による推定値は、コア抜きによる実測値と一致していることが分かる。このことは、本手法の測定精度が高いことを示している。一方、速度法による推定値は、コア抜きによる実測値と一致しておらず、速度法により求めたひび割れ深さは、実際のひび割れの深さよりも浅い値を示していることが分かる。また、ひび割れが深くなるほど、それらの差が顕著になっていることが分かる。

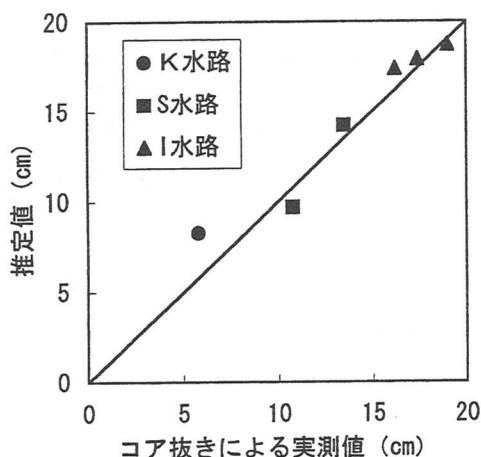


図-1 1 本方法とコア抜きとの測定結果の比較

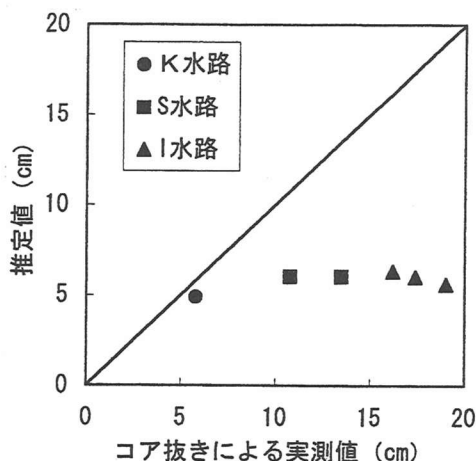


図-1 2 速度法とコア抜きとの測定結果の比較

この原因について考察するために、例として、I 水路において採取したボーリングコア（写真-3）を対象に検討する。尚、このボーリングコアの目視観察によるひび割れ深さの測定結果は 16.2cm であるのに対し、同採取地点における速度法による測定結果は 6.3 cm、本方法による測定結果は 17 cm である。ボーリングコアに生じているひび割れの観察結果によると、そのひび割れの特徴としては以下のことが挙げられる。

- ・ ひび割れ深さは、ひび割れが開口している「開口部深さ」および、ひび割れの開口幅が小さくひび割れ断面の部分的な接触が見られる「閉合部深さ」から構成されている（図-1 3）。
- ・ ひび割れは粗骨材に沿って進展している。従って、粗骨材周辺では亀裂の開口幅が小さくなっており、ひび割れ断面の部分的な接触が見られる。
- ・ ひび割れの先端付近、特に「閉合部深さ」付近ではひび割れの中に充填物が見られる。

従って、速度法においては、ひび割れ断面の部分的な接触点および充填物を伝播した波の伝播時間を測定するので、測定値が実際のひび割れ深さよりも浅い値を示していると考えられる。そして、ひび割れが深くなるにつれ、上記のひび割れの特徴が顕著になるので、測定値と実際のひび割れ深さとの差が大きくなると考えられる。

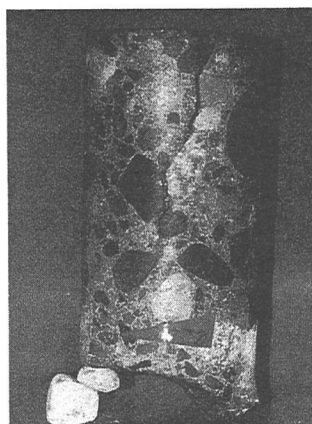


写真-3 ボーリングコア

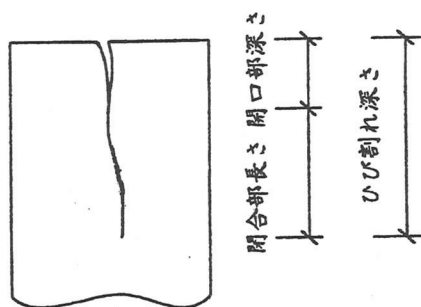
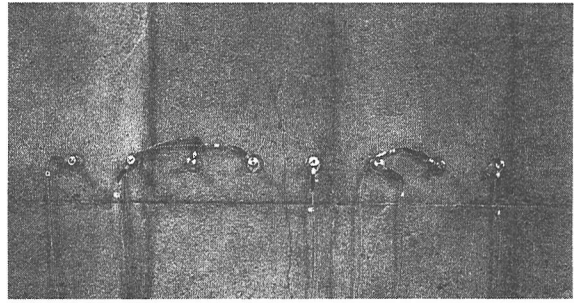


図-1 3 ひび割れ深さの概念図

5.2 地下発電所への試験適用事例

ここでは、本手法を実際の地下発電所の躯体コンクリート（鉄筋コンクリート）に試験適用した事例を紹介する。具体的には、本手法を用いて地下発電所水車周りの鉄筋コンクリートに生じた縦ひび割れを対象にひび割れ深さを測定する。その測定状況を写真-4 に示す。尚、本方法はレイリー波の伝播エネルギーを評価するものであり、鉄筋コンクリートにおいても、鉄筋はコンクリート全体に対する面積比が小さいため、それが測定に与える影響は少ないと考えられる。

鉄筋コンクリートを対象とした本手法によるひび割れ測定は、事例も少ないことから、今後は引き続きひび割れ深さを定期的実施し、進行性を確認するとともに、本手法の鉄筋コンクリート構造物への適用性について検討を進めていく予定である。



6. おわりに

写真-4 地下発電所躯体コンクリートの測定状況

本論文では、地下空間の維持管理における「ひび割れ深さ」の測定意義について考察した。そして、その測定方法の現状および問題点を明確にし、それを踏まえ、レイリー波の減衰特性を利用した新しい「ひび割れ深さ」の測定方法を提案した。また、本方法を実際の発電用水路トンネル覆工に適用して、その妥当性を検証した。その結果、本方法を適用することにより、「ひび割れ深さ」を精度良く測定できることが分かった。さらに、本方法を地下発電所の躯体コンクリート（鉄筋コンクリート）に試験適用した事例を紹介した。

今後は、センサーの取付け位置を固定し、本方法を用いてひび割れの進行性を監視することにより、地下空間の健全度の評価精度を向上させたいと考えている。また、現在、作業性を向上させるために、持ち運びが容易なノートパソコンをベースにシステムの改良を実施している。

尚、本測定方法「表面波による構造物のひび割れ深さ測定法」は現在特許出願中である。

7. 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，1993.11.
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル（案），2000.5.
- 3) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，1997.5.
- 4) 今田 徹・石倉正徳・平江 哲：トンネルコンクリート覆工の強度に関する実験報告（1），建設省土木研究所資料，No.921，1974.
- 5) 朝倉俊弘・小島芳之・安藤豊弘・佐藤 豊・松浦章夫：トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.79-88，1994.6.
- 6) 峯本 守・鬼頭 誠・梶原雄三・松岡 茂：トンネル覆工の限界状態設計法に関する研究，土木学会論文集，No.523/III-32，pp.141-149，1995.9.
- 7) (財) 鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工マニュアル，1998.2.
- 8) 桜井達郎・太田資朗・師 自海・中野雅章：ひび割れの生じているトンネル覆工の耐力評価法に関する研究，第5回地下空間シンポジウム講演論文集，2000.1.
- 9) (社) 日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の非破壊検査法，1994.12.
- 10) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書，1992.3.
- 11) 坂田安徳・大津政康：超音波スペクトロピーを用いたコンクリートの欠損評価法の研究，土木学会論文集，No.442/V-16，pp.71-80，1992.2.
- 12) 内田昌勝・大津政康・岡本享久・森大介：超音波法による鉄筋コンクリート部材の欠損調査法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol21，No.2，pp.1279-1284，1999.
- 13) Richart, Jr, F.E.・J.R. Hall, Jr.・R.D. Woods：Vibrations of Soils and Foundations，1970.