

新しいひび割れ深さ探査技術の開発

THE NEW METHOD FOR TESTING THE DEPTH OF CRACK

舍川 徹¹⁾・安保 秀範²⁾・田中 雅弘³⁾・江川 顕一郎⁴⁾・呉 佳曄⁵⁾

Toru TONEGAWA, Hidenori ABO, Masahiro TANAKA, Kenichiro EGAWA, Jiaye WU

This paper presents a non-destructive field testing technique for evaluate the depth of crack, whose existence and particularly progress in concrete can be a severe safety hazard to the tunnels (underground structures). Although several testing methods have been developed to measure the concrete crack depth, their performance is not satisfactory. Herein, a new testing technique is proposed to monitor the cracking depth and progress through detecting the propagation of energy flow density of Rayleigh wave. Field experiments have demonstrated that this new method provides more accurate estimation of the depth of concrete crack than those by existing methods.

Key Words: tunnel, non-destructive-testing method, Rayleigh wave, depth of crack, concrete

1 はじめに

コンクリート構造物のひび割れ深さを把握することが出来れば、その耐力をよりの確に推定することが可能になる。山岳トンネル覆工のひび割れ及びその進行性は、トンネルの安全性に対して重大な影響を及ぼす可能性があるため、ひび割れの状態を適切に把握することが重要である。しかしながら、ひび割れの重要なパラメータの一つである深さについては、有効な非破壊探査手法がないのが現状である。

我々は、ひび割れの深さに対して精度よく計測できる非破壊探査方法を開発した。従来の超音波などの手法とは異なり、表面で発振した衝撃弾性波中のレイリー波に注目し、そのエネルギーの伝達率を利用してひび割れの深さを推定する手法である。この探査方法はひび割れ面が接触している場合や、充填物（水・粉・遊離石灰など）がある場合でも探査が可能である。また、その位相速度を計測することによって、コンクリートの強度を推測することも可能と考えられる。

ひび割れの状況、すなわちその幅、長さ及び深さを把握するとともに、特にその進行性を監視することによって、トンネルなど土木構造物の健全度評価の精度向上が図れるものと考えている。

2 ひび割れ深さを推定する方法

2-1 既存の方法

ひび割れ深さの測定方法については、種々の方法が提案されているが、探査原理から分類すると、以下の3

-
- | | | |
|---------|-------------|-----|
| 1) 正会員 | 東京電力株式会社 | 工務部 |
| 2) 正会員 | 東京電力株式会社 | 工務部 |
| 3) 正会員 | 東京電力株式会社 | 工務部 |
| 4) 正会員 | 株式会社セントラル技研 | |
| 5) 工学博士 | 株式会社セントラル技研 | 技術部 |

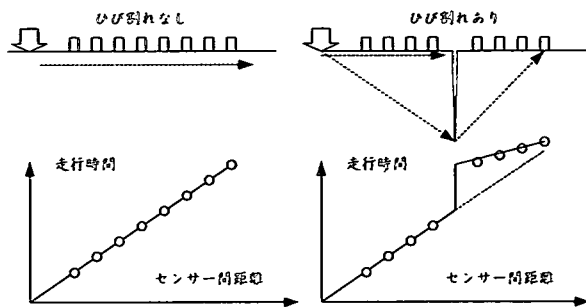


図-1 T法の概念

上記各方法においては、ほとんどで超音波が使われている。理論的には、ハンマー打撃等の発振機構で発振した衝撃弾性波も使えるが、初動波の立上りが鈍いために、波動スタート時刻設定及び走行時間の確定が困難であることなどから、現状ではあまり使われていない^[1]。

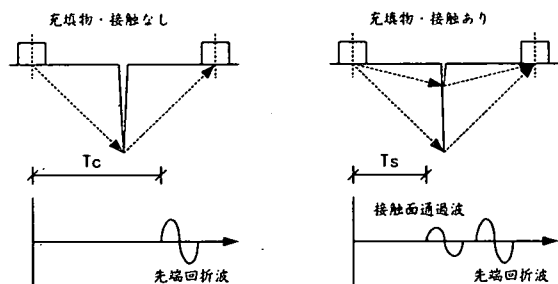


図-2 充填物及び接触などによる影響

には、現在のところ次に示すような問題があると考えられる。

- ・ 厚み寸法オーダーの違い：金属材料の厚みは一般的に小さく、数 mm～数 cm の場合が多い。一方コンクリート構造物の場合ではトンネルの覆工、ダムなど、数十 cm か又はそれ以上の厚みを持つ。
- ・ 材料性質の違い：金属材料は割合に均一であり、その中で伝播する波の減衰は小さい。コンクリートは複合材料であるので、波の散乱などが多くて減衰も大きい。
- ・ ひび割れ状態の違い：金属材料中のひび割れには、水、粉じんなど充填物がほとんどない。コンクリートの場合にはこれらのものを含んでいることが多く、さらにコンクリート壁には、鉄筋が埋設されている場合もあり、ひび割れ面が接触していることも多い。

これら金属材料とコンクリート材料の差異によって、既存手法ではコンクリート部材に対しては、不具合を生じることが想定される。超音波発振のエネルギーは非常に弱いことから、寸法と減衰が大きいコンクリートのひび割れに関しては、先端を回折伝搬してくる波は次第に弱くなり、S/N (信号/ノイズ比) が顕著に落ちてしまう。縦波は、その特性上、ひび割れの接触面や粉じん・水及び鉄筋をも通過する。この通過波のエネルギーが、ひび割れ先端にて回折してくる波のエネルギーに近づくか、もしくはそれ以上になると、ひび割れの深さを実際より浅く判断してしまうことになる(図-2)。特に、ひび割れが深くなるほど回折波のエネルギーが弱くなり、判断誤差の可能性が増えてくる。つまり実際の診断においては、このような判断は危険側となってしまふ。

つタイプに分類できる^[1]。

- ・ タイプ-1：波の走行時間、距離を測定し、幾何的な関係によってひび割れの深さを測定する方法。このタイプが最も多く使われている。主な方法は、 $T_c - T_0$ 法 (L-L 方式)、T 法 (その概念を、図-1 に示す)、BS (英国方式)、デルタ方式、近距離迂回波方式、S-S 方式、R-S 方式、レスリー法などがある。
- ・ タイプ-2：位相変化を利用する方法
- ・ タイプ-3：周波数解析 (受信した波の卓越周波数など) による方法。

上記のような各手法では、次のような共通点がある。

- ・ 伝搬した波の初動成分に注目する。初動波の到達時間もしくは位相角と、ひび割れの幾何関係によって、ひび割れの深さを推測する。
- ・ 超音波発振と受信装置を使う。
- ・ 縦波を利用する場合が多い。

これらの手法は操作が簡単であることから、特に金属探傷などの分野において発展している。しかし、これらの手法を土木・建築分野に適用する

2-2 レイリー波を用いた新技術

2-2-1 レイリー波の特性

レイリー波は、媒体(土、アスファルト、コンクリート等)の表面に発振した弾性波の種類である。レイリー波は、媒体表面より一定深度の範囲内にしか存在しないことから、表面波に属する。

レイリー波は、次のような特性を持っている。

- ・ レイリー波は媒体表面に衝撃を与えたときに発生する波の中では、エネルギーが最大である。

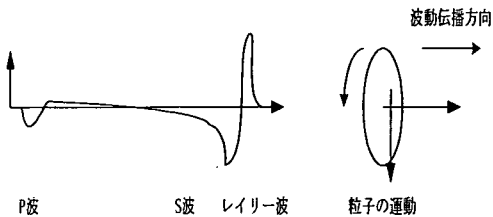


図-3 レイリー波の特性

この原因については次の二つが考えられる。一つは、発振した弾性波の中では、元々レイリー波の成分が最も多い。理想半無限弾性体表面に点振源を置いたとき、各成分弾性波の分配率はおおよそ、P波(縦波)が7%、S波(せん断波)が26%に対して、レイリー波が67%を占めている^[3]。もう一つは、P波とS波(いわば実体波)に比べ、レイリー波の減衰が少ないことである。弾性体表面に注目すると、レイリー波の減衰が $\sqrt{1/r}$ (r は入力源からの距離)に比例する一方、実体波の減衰は $1/r^2$ に比例する(弾性体内部では、 $1/r$ に比例する)。すなわち、伝播する波のエネルギーはレイリー波が最も大きいことが分かる(図-3)。このため、表面に沿って種々の測定を行う場合には、レイリー波は信号が最も採取しやすく、非破壊検査を行うには優れた波といえる。

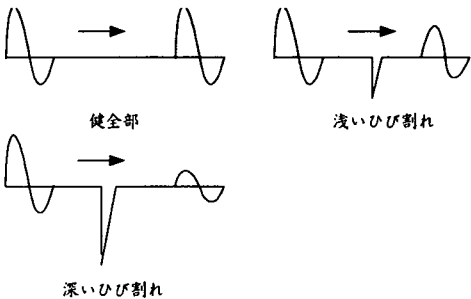


図-4 レイリー波によるひび割れ探査の概念

・ レイリー波は、媒体のせん断特性にも依存している。

図-3に示したように、レイリー波による媒体粒子の動きは、波動の伝播方向とほぼ垂直であるので、レイリー波は媒体のせん断剛性に依存していることが分かる。

・ レイリー波の振幅は、表面からの深度の増加とともに、急激に減少していく。ほとんどのエネルギーは、表面から1倍波長の範囲内に収まる。

このようなレイリー波の性質を用いることによって、ひび割れの深さを探査する技術を開発した。

2-2-2 基本原理

表面波の伝播過程では、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していく。また、コンクリートには粘性による減衰もわずかに存在する。これらの減衰を補正することにより、波の振幅すなわち

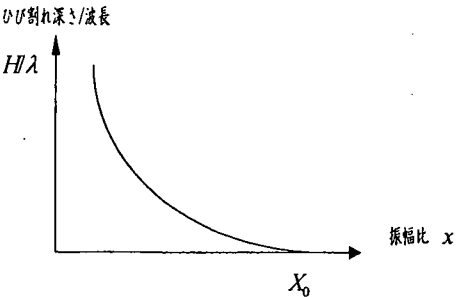


図-5 ひび割れ深さ、波長と振幅比との関係

エネルギーを常に一定な値に保つことができる。ただし、ひび割れがある場合には、表面波がある程度遮断され、ひび割れ以後では波のエネルギーが減少する。したがって、ひび割れの存在によってその前後における波のエネルギーは変化する。またひび割れが深くかつ表面波の波長が短くなるほど、その変化度合いは大きくなる。これにより、ひび割れの有無および深さを推定することが可能となる。

この概念を図-4に示す。

ひび割れ深さ H と振幅比 x の関係を理論的に算定することは非常に難しいので、ここでは、図-5 に示すように対数関係と仮定すると式(1)となる。 C と C_0 は常数パラメータである。 x はひび割れ後の各センサーで取った波信号の振幅の平均値とひび割れ前の振幅平均値との比である。

$$H = C \ln(x) + C_0 \tag{1}$$

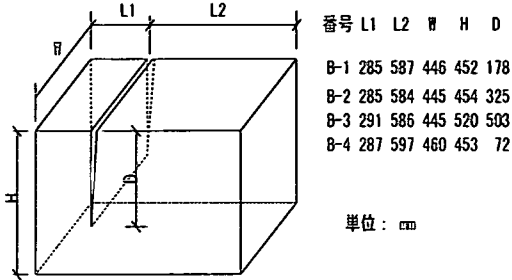


図-6 室内試験供試体

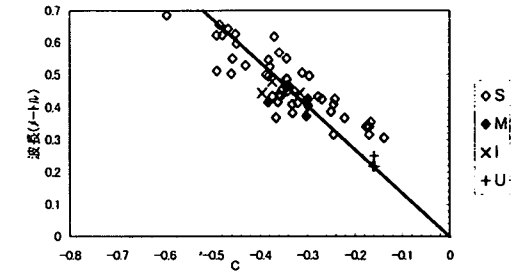


図-7 C と波長 λ との相関関係

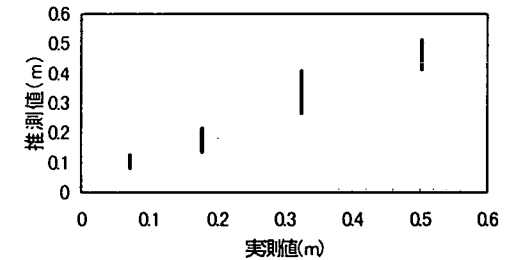


図-8 供試体の推測値と実測値の対比

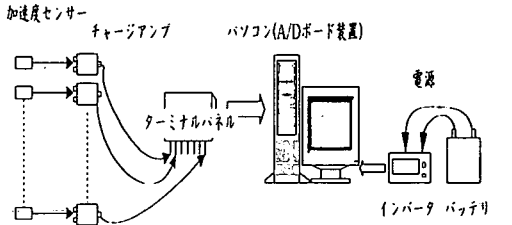


図-9 ハードウェアの構成

図-5 の中に一つのコントロール点があり、すなわちひび割れがない場合で、 $H=0$ 、補正済の振幅比 X_0 は 1 になるはずである。したがって、 $C_0=0$ となることが分かる。なお、室内でコンクリートブロックを作成し、室内試験により C を求めた。コンクリートブロックには、幅 1.5mm の人工的なひび割れを入れた。

試験結果の C と波長 λ との相関は、図-7 に示すとおりである。最小二乗法により

$$C = -0.7429\lambda \tag{2}$$

が得られる。よって、ひび割れの深さは、次のとおりとなる。

$$H = -0.7429\lambda \ln(x) \tag{3}$$

図-7 の中には発振方式の変化（ミニ、小、中ハンマー、超音波発振子、図中それぞれ M、S、I、U で表す）、発振距離の変化（0.025m、0.10m と 0.20m）、センサー間隔の変化（5cm と 10cm）などが含まれている。なお、式（3）に基づいて計算したひび割れ深さと実際の深さとの関係は、図-8 に示すとおりであり、比較的に良好な結果を得られた。

なお、ひび割れ面に砂、水などを入れた状態で計測した結果は、それにほとんど影響されないことを示した。

この手法を、表面波の一種レイリー波を用いることから、“表面波法”と称する。

2-2-3 計測及び解析システムの概要

システムはハードウェア部分とソフトウェア部分（計測ドライバと解析及び処理ソフト）から構成される（写真-1 参照）。そのハードウェアの構成は、図-9 に示すとおりである。計測した信号データを用い、解析・処理ソフトによりノイズを除去して分析し、開口深さおよびひび割れの深さを計算する。その処理過程を、図-10 に示し、主な計算、補正は下記に示すとおりである。

- 計測信号の積分処理と基線補正：表面波によるひび割れ深さを測る手法には、基本的に打撃による発生したエネルギーの変化に着目している。このエネルギーは、材料粒子の動きのスピードに依存している。ただし、直

接に粒子のスピード信号を計測するには困難な面がある。そこで、加速度ピックアップで波の加速度を拾い、採取した信号を積分して速度信号に変換させ、積分計算により発生したずれも補正する。

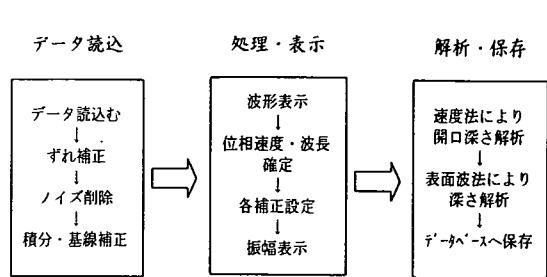


図-10 解析処理の過程

2) 幾何減衰補正：センサー及び発振位置によって補正する。

3) 材料減衰補正：不同材質の材料に対して、材料減衰を補正する。この補正計算によって、材質の変化による影響を無くす、アスファルトコンクリートや、他の材料にも本方法が適用できるようになってきた。

4) 壁厚補正：ひび割れの深さが同じでも、壁厚が変化すれば、一定の条件で振幅比も変化する。この影響を取り除くために壁厚補正を行う。

2-2-4 計測誤差を低減する手法

1) 誤差の原因と種類

コンクリートは、金属材料とは異なり不均一である。更にトンネル内では、湿気、覆工表面に水垢などがあり、作業環境が厳しい場合が多い。したがって、いかに測定誤差を除去し、探査精度を向上させるかが大きな課題である。特に表面波法の場合には、ひび割れ前後のセンサーで取った信号の大きさ（振幅）を比較するために、誤差の低減が一層必要となる。その測定誤差は、単純に波の到達時間のみ使う手法（例えば速度法）に比べると大幅に増えてくる。これらの誤差の原因とその対策を表-1に示す。

表-1 測定誤差の種類、原因及びその対策

誤差種類	誤差の特徴	主な誤差の原因	対策
ランダム誤差	不規則な誤差	・ 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（理論的には、 n 回計測した場合の信号ノイズ比 (S/N) は、 $\sqrt{n}$ 倍上昇する）。
固定誤差	規則な誤差 影響が大きい	・ システムの固有誤差 ・ センサーの貼付による誤差	・ 計測システムのキャリブレーションを行なう。 ・ “双方向発振”手法により固定誤差を低減する。

“双方向発振”手法は、我々が固定誤差を低減するために考案したものである。わかり易くするために、ひび割れ前後にそれぞれ1個のセンサーを貼付た場合を例として、その原理について簡単に述べる（図-11）。まず左側（図中 ch1）から発振して $ch1 \rightarrow ch2 \rightarrow \dots \rightarrow ch1 \rightarrow ch2$ の順番でデータを採取する。そして、そのままの状態では反対側（図中 ch2）から発振して、逆順番の $ch2 \rightarrow ch1 \rightarrow \dots \rightarrow ch2 \rightarrow ch1$ でデータを採取する。この両

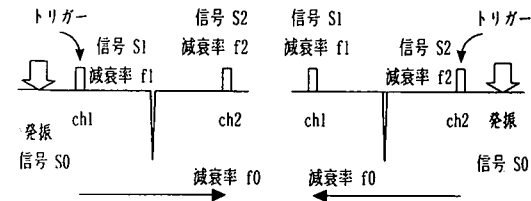


図-11 双方向発振による誤差除去原理

方向で測定した結果を平均すれば、センサーの貼付けの影響や、各チャンネル間の固有誤差などが相当に除去できるものと考えられる。

発振した信号の大きさを S_0 、チャンネル-1 とチャンネル-2 で採取した信号をそれぞれ S_1 と S_2 とし、ひび割れによる減衰率は f_0 、チャンネル-1 とチャンネル-2 センサーの貼付け等による減衰率はそれぞれ f_1 と f_2 にすれば、チャンネル-1 から発振した場合の信号比 η_1 は、次のとおりである。

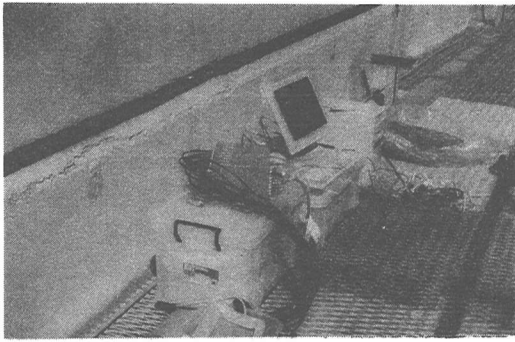


写真-1 探査システム

$$\eta_1 = S_2 / S_1 = f_2 \cdot f_0 / f_1 \quad (4)$$

チャンネル-2 から発振の場合の信号比 η_2 は、同様に次のとおりとなる。

$$\eta_2 = S_1 / S_2 = f_1 \cdot f_0 / f_2 \quad (5)$$

この二つの信号比を、式(6)のように平均処理すれば、真値 f_0 が求められる。

$$f_0 = \sqrt{\eta_1 \cdot \eta_2} \quad (6)$$

すなわち、このように双方向発振技術を用いることにより、表面波法で生じる誤差要因を低減でき、精度の高い探査が可能になると考えられる。

2-2-5 レイリー波を用いたひび割れ深さ探査結果

我々は、実際の土木構造物のひび割れを対象にして、本探査技術の検証試験を行った。探査作業の状況を、写真-2 に示す。

我々は、超音波の代わりに、衝撃弾性波を使って、前述の T 法とほぼ同じ原理でひび割れ深さを探査する手法（“速度法”と呼ばれ）についても開発した。図-1 に示したとおり、ひび割れをはさんで、複数のセンサー（現在 8 個を使って）で取った波動信号の走行時間のずれによって、ひび割れの深さを推測する。T 法に比べ、発振したエネルギーが格段的に大きくなる。なお、スタート時間の確定問題については、パソコンの記憶と処理能力を生かして、初動波形を完全に取りれるようにしたことで、解決した。コンクリートブロックにあるひび割れ深さに対しては、速度法で精度よく探査できることを検証している。



写真-2 探査作業の状況

ここで、水路トンネル覆工ひび割れに対して、コア抜きによる実測値と探査による推定値の比較を図-12、図-13 に示す。速度法の結果は実測値を過小評価しており、本手法の探査精度が高いことがわかる。

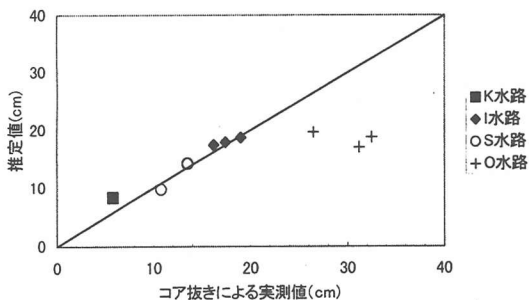


図-12 本手法による結果

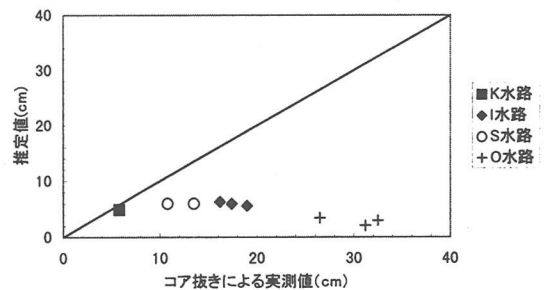


図-13 速度法による結果

一例として、採取したコアの写真を写真-3 に示す。実測ひび割れの深さ 19.0cm に対し、速度法の測定結果は 5.6cm、表面波法は 18.7cm となる（その計測と表面波法の計算パラメータを表-2 に示す、壁厚は実測値、損失係数は健全部でのキャリブレーション値をそれぞれ採用する）。速度法による探査結果は、ひび割れ開口

部の深さと考えられ（図-14）、ひび割れ深さは表面波法により精度よく推定できると考えられる。

表-2

計測状態		計算パラメータ		ひび割れ深さ計算結果		
センサー間隔	打撃点距離	壁厚	損失係数	Ch.0 発振	Ch.7 発振	平均値
10cm	10cm	24cm	0.015	14.8	21.1	18.7

図-12 と図-13 に、+記号で示されたトンネルは鉄筋が配置された圧力水路であり、探査は当然のことながら抜水して行われた。抜水により、鉄筋応力が引張から収縮に転じてひび割れ面を圧縮させ、その結果せん断剛性を部分的に回復させたことにより、探査深さを浅く判定したものと考えられる。これらは、今後の研究課題である。なお、ここで示された例以外にも、いくつかの探査試験を行った結果。ひび割れ面の遊離石灰または鉄筋の影響が少ないことが分かった。

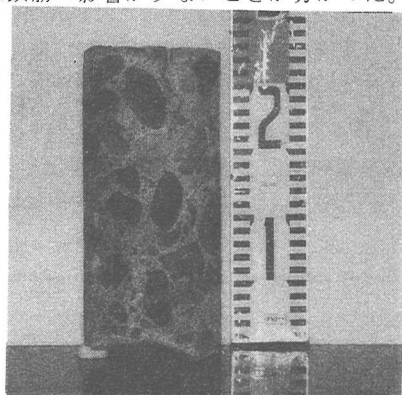


写真-3 採取したコア

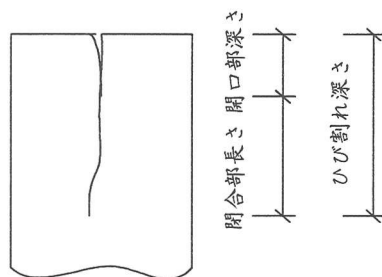


図-14 ひび割れの状況

2-3 本手法の特徴

上述のように、本手法は既存の方法に比べれば、次のような特徴がある。

- ・ 衝撃弾性波を使い、ハンマーの打撃により、発振エネルギーは格段的に大きく、深いひび割れに対しても探査できる。
- ・ レイリー波はひび割れのせん断剛性に依存しているので、理論的には、ひび割れ面の充填物（水、粉塵、遊離石灰など）はせん断剛性がほとんどないために、これらに影響されにくいことが、実測の現場試験により確認できた。更に、ひび割れ面が接触しても、圧縮圧力が作用しない限り、せん断剛性が非常に小さいので、表面波法に対する影響も少ないと考えられる。
- ・ 本手法では、回折波の走行時間、初動波の位相ではなく、伝達エネルギーの変化に着目しており、ひび割れの中に鉄筋があっても、その面積比が少ないので、影響も小さいと考えられる。
- ・ ひび割れ深さの探査精度または探査可能な深度は、発振したレイリー波の波長に大きく依存している。レイリー波の深度方向の伝播範囲はおよそその波長であることから、深いひび割れに対して、波長の長いレイリー波が望ましい。一方、浅いひび割れに対しては、短い波長の方が探査精度が良いと考えられる。

したがって、表面波法としては、ひび割れ面の充填物、鉄筋、ある程度の接触などによる影響が少なく、探査可能な深度も深く（ひび割れ深さ 1m 以上の探査例もある）、土木構造物などに対して有効な探査手法であると考えられる。

3. コンクリートの強度を推定する方法

レイリー波を使って、ひび割れ深さの探査のみならず、コンクリート強度に対する測定も可能と考えられる。

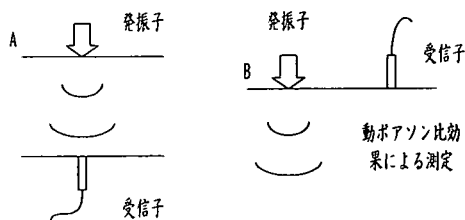


図-15 発振と受信の位置関係

的良いが、ダム、トンネル等同一表面でしか測定できない場合には、P波の特性上測定は非常に難しい(図-15 参照)。

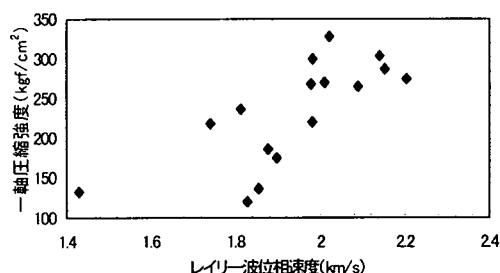


図-16 レイリー波位相速度と一軸圧縮強度の関係

コンクリートの強度や弾性係数を非破壊で推定する方法として広く用いられているのは、シュミットハンマ法（反発度測定法）と超音波の伝播速度を用いた音波法がある。前者は材料表面の局所的な打撃によるもので、打撃面の状態等に大きく影響され、またこの方法はコンクリートのごく浅い部分しか測れないと言われている。超音波法（P波）はコンクリートの動弾性係数の測定及び圧縮強度の推定によく使われているが、試験体を挟んで発振と受信をするときの測定精度は比較

的固体媒質内に微細なクラックが多くあれば、せん断剛性も小さく、また圧縮強度も小さいことは容易に推察できる。前述したレイリー波のせん断剛性の依存性から、レイリー波の伝播特性（例えば位相速度等）によって、コンクリートの強度などを推測することが可能と考えられる。

実際のコンクリート土木構造物から、 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ のコアを抜いて調べた圧縮強度とレイリー波の位相速度との関係は図-16に示すとおりであり、レイリー波の位相速度とコンクリートコアの一軸圧縮強度との相関係数は0.71であり、比較的に良い相関となった。

4. おわりに

本報告では、レイリー波の伝播特性に基づき新しいひび割れ深さを測定する技術に関して紹介した。室内試験及び現地試験において、本手法を適用することにより、ひび割れ深さを精度よく推定できることを確認した。今後はさらにひび割れ深さの情報を得ることで、構造物の健全度評価の精度を向上させていきたい。特に、センサーの取付位置が固定できれば、ひび割れの深さ方向の進行性を監視することが可能となることから、トンネルなど地下構造物の健全度を評価する際に大いに役立つものと考えられる。一方、作業効率を向上させるために、ノートパソコンをベースに、持ち運びが容易で、簡単に計測できるようなシステムを開発している。

なお、本手法“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。

【主要参考文献】

- [1] 社団法人日本非破壊検査協会編：《コンクリート構造物の非破壊試験法》，株式会社養賢堂発行，1994。
- [2] 小林一輔編集：《コンクリート構造物の非破壊検査》，森北出版株式会社，1996年3月。
- [3] F.E. リチャート等著，岩崎敏男訳：《土と基礎の振動》，鹿島出版会，1977。