

低周波弾性波を用いたトンネル覆工 コンクリート内部の劣化診断手法

松井精一¹・山田裕一²・長田文博³

¹正会員 西日本旅客鉄道株式会社 技術部 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田2丁目4番24号)

²正会員 工修 西日本旅客鉄道株式会社 技術部 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田2丁目4番24号)

³正会員 工修 西日本旅客鉄道株式会社 技術部 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田2丁目4番24号)

山陽新幹線でのトンネル覆工コンクリートが剥落するなどコンクリート構造物の剥落が多発しており、このためコンクリート内部の欠陥を検出できる手法の開発が求められている。コンクリート内部のひび割れなどの欠陥の検出方法には、これまでいくつかの手法が提案されているが、いずれも試験段階のものが多く、実績のあるものは少ないのが現状である。そこで本研究では、覆工コンクリート内部欠陥、特にひび割れの検出に適する診断手法を検討するための診断装置を製作し、実トンネルでの計測により、欠陥の有無判定および深さ推定が可能な手法を開発した。さらに、コンクリートモデルや解析モデルを用いて手法の検証、考察を行った。

Key Words: *non-destructive test, tunnel lining concrete, magnetostriction, low frequency elastic wave, existence of interior defect, depth of interior defect*

1. はじめに

1999年6月、山陽新幹線の福岡トンネルにておいて、走行中の列車に覆工コンクリート塊が落下し、パンタグラフなど車両を損傷させる事故が発生した。また1999年10月、山陽新幹線の北九州トンネルでも、側壁部のコンクリート塊が落下した。幸い、落下した場所が側壁部であったため、列車に影響はなかったが、落下したコンクリート塊の重量は200kgにも及んだ。

これらの剥落事故の原因を詳細に調査した結果、発生機構は、施工時もしくは施工直後に覆工内部に生じたひび割れ等が、その後広がっていき、最終的に3次元的に囲まれた状態となり落下に至ったのではないかと推定され、このことから、検査方法としては、覆工表面に生じたひび割れ等を観察し、3次元的に囲まれる恐れのあるものについては、何らかの方法(例えば打音検査)で内部のひび割れ等の状態を診断することが有効であると考えられた。

トンネル覆工コンクリートの内部欠陥を対象とした検査方法は、現在、ハンマリングによる打音検査が一般的である。しかし、検査の結果に個人差が生じる、定量的な結果が残らない等の問題がある。さらに欠陥の範囲は

わかるもののその深さまでは把握が困難であり、さらにある程度深くなると欠陥の有無判定も出来なくなる。

覆工内部状況を直接的に把握できる方法として、コアボーリングがある。この方法は破壊検査であることから覆工に部分的に損傷を与えること、さらにコスト面や作業時間の面で、数多くの実施が困難である。したがって、ひび割れやジャンカの分布などの覆工内部の状況を、打音検査より定量的に、またコアボーリングより簡易に検査できる検査手法が求められていた。

そこで、覆工コンクリートの内部欠陥、特にひび割れの検出に適する入力や応答の受信方法を検討し、合理的な非破壊検査手法の開発を行った。検討結果を反映した診断装置を製作し、診断装置を用いた実トンネルでの計測により、欠陥の有無判定および深さ推定が可能な劣化診断手法を開発した。次に、コンクリートで作製されたモデル供試体(以下「供試体」という)および解析モデルを用いた解析によりその劣化診断手法の有効性を検証した。本論文ではこれらについて報告する。

2. 非破壊検査手法の検討

(1) 求められる診断機能

剥落事故を防止するには、剥落の恐れのあるコンクリートの部分がひび割れなどの内部欠陥で3次元的に囲まれる危険性について把握することが重要である。そのためには、打音検査で抽出した濁音箇所を囲むように計測点を配置し、計測点ごとの欠陥深さを把握することにより、それらの深さ推定結果を結んでひび割れ等が閉合化しそうなのか、それとも閉合化せずに覆工奥に伸びているだけなのかを推定する必要がある。

このような観点、ならびに空洞の把握よりもひび割れの把握のほうが困難であることを考慮し、非破壊検査手法の選定に当たり、求められる診断機能として、

- 欠陥、特にひび割れの有無が判定できること
 - 欠陥、特にひび割れの深さが推定できること
- とし、この機能を満たす診断手法の選定を行った。

(2) 従来からの試験・研究と課題

トンネル覆工コンクリートのひび割れなどの内部欠陥を対象とした非破壊検査手法では、従来から電磁波レーダー法や超音波診断法、衝撃弾性波法、打音法などが研究されてきた。以下に代表的なものについての原理と特徴を述べる。

a) 電磁波レーダー法

レーダーを用いた電磁波法は、電磁波が空気層のようなコンクリートと比誘電率が異なる物質の境界で反射する性質を利用し、ジャンカなどの欠陥の有無とその深さを判定するものである¹⁾。すでに鉄道トンネルの覆工厚や覆工背面の空洞の把握などに適用されている。しかし、実際に覆工コンクリート内部に存在するひび割れは、ひび割れの幅が空洞の大きさよりもかなり小さいため、電磁波レーダーの分解能では検出が困難であり、十分な精度も得られていないため、この点をクリアするための研究が進められている²⁾。

b) 超音波法

超音波法を用いた非破壊検査手法としては、板厚やひび割れ深さの推定に用いるパルス反射法があり、主な解析手法として伝播時間および周波数によるものがある¹⁾。鉄道分野においてはパルス反射法を用いたレール内部探傷技術に広く実用化されている。しかし、コンクリートは骨材やモルタルなどの複合材料であるため、コンクリート中を伝播する際に骨材などで大きく散乱し、そのため減衰が大きくなり、深い位置のひび割れが検出できないという問題がある。

また、超音波法には次のような作業面での課題もある。超音波法では一般に20kHz以上の波長の短い弾性波を用いるため、発信・受信センサーとコンクリート表面との間

での信号伝達効率が悪くなる。この問題を解決するために、コンクリートの表面を研磨し、かつセンサーにグリースを塗布することにより、センサーとコンクリート表面との間に空気層が入るのを防いでいる。山陽新幹線での夜間の1~2時間程度の作業時間を考慮すると、準備作業に時間を費やす超音波法の適用には測定時間の短縮が課題である。

c) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法は、コンクリート表面をハンマーや錘球などで打撃した時に生じる弾性波が固体中を伝播することによる波動をコンクリート表面に取り付けたセンサーで受信し、解析する方法である¹⁾。衝撃弾性波法は超音波法と比べてエネルギーが大きいためコンクリートのような減衰の大きい対象に向いているといえる。応答の周波数スペクトルのピーク周波数から内部欠陥の位置を判断するインパクトエコー法においても、理論的に得られるピーク周波数を、実際の計測から得られるピーク周波数から同定することは困難な場合が多い³⁾。

d) 打音法

打音法はハンマーで打撃を行い、コンクリートの表面振動により発生した音響信号（可聴域にある周波数の低い弾性波）をマイクで集音し、解析する方法である¹⁾。受信側が非接触であるので簡便で作業性がよい。しかし、入力エネルギーが一定しないためデータの再現性が悪い、出力である音響信号にハンマーの特性が加わる等の課題がある。また、評価パラメータに受振音周波数分布や振幅値を用いた評価が行われているが、欠陥の定量評価に至っていない⁴⁾。さらには山陽新幹線では、検査現場で保守用車のエンジンを停止できないため、マイクにエンジン音がノイズとして加わる。この周波数帯域は現地の計測では1kHz付近にあり、打音の周波数帯域と一致するため、これらを分離するのが難しい。

(3) 本研究で用いた診断手法

以上のように、それぞれの非破壊検査手法は検査対象等によっては優れた機能を発揮するものの、コンクリート内部のひび割れの診断には解決すべき課題も多い。そのため、これらの診断手法の課題を解消する新しいコンクリートの非破壊診断手法を模索する必要がある。コンクリートの非破壊検査では、主に電磁波と弾性波が用いられているが、電磁波レーダーはひび割れ検出の実績が少なく、一方、打音検査は検査者の技量や経験が検査精度に大きく影響したり、記録が数値で残らないといった課題があるもののひび割れの検出に広く用いられていることから、弾性波を用いることとした。手法に求められる条件としては、b)、c)、d)の弾性波を用いた各手法の課題から、①測定毎の入力エネルギーが一定でデータの再現性がよい、②コンクリート内部での入力波の減衰が

小さい、ことが挙げられた。

①の再現性に関しては、トンネル壁面に接触させた発振子を用いて一測定毎の入力エネルギーを一定にし、さらに受信波を壁面から直接受信する受信センサーを用いる方法を採用することとした。

また、②の減衰に関しては、超音波法で一般に用いられている20kHz以上の周波数帯より低い周波数帯を用いること、超音波法よりも高エネルギーで発振すること、センサーとコンクリートとの境界でのコンクリート表面の凹凸などによる信号の伝達ロスを抑えるためにセンサーをコンクリート表面に圧接した状態で加振すること、などの方法を採用することとした。

上記①、②を満たすものとして、金属系磁歪素子の発振子・受信子を用いることにした。磁歪素子は磁界中で伸縮する性質が強い強磁歪材を用いて、振動を発生させる。磁歪素子は、次のような特徴を有している⁵⁾。

- 圧電素子と磁歪素子を比較した場合、磁歪素子がより効率良く弾性波を発振できる。
- 1MHz程度以上の高周波発振は困難で、もっぱら低周波用に限定される。
- 機械強度が大きいので、圧接した状態で高エネルギーの振動を発生させることが出来る。

次に、受信子から得られたデータの評価方法について以下のような検討を加えた。

ひび割れで囲まれた浮き箇所をハンマーで打音すると濁音がる。また健全な箇所を打音すると清音がる。この音はコンクリートの応答音であるのか、ハンマー自身の共振音であるのか議論のあるところではあるものの、欠陥部と健全部とでは打音の際の音質が異なることが多い。このことは打撃等によりコンクリートにエネルギーを与えた場合、健全部と欠陥部では各々の応答が周波数特性や大きさで差異があると考えられる。著者らはこの考え方に基づき、コンクリートの測定対象部分を加振する周波数と大きさを常に一定にした振動エネルギーをコンクリートに与えた場合のその部分のコンクリートの応答特性を定量的に評価することにより、内部欠陥の有無、深さ等の状況を非破壊で推定することを試みた。すなわち磁歪素子を用いた発振子により測定部分のコンクリートに振動エネルギーを与え、その部分のコンクリートの応答を磁歪素子を用いた受信子によりとらえ、得られた応答の特性を解析することにより欠陥の有無、深さ等の評価、判定をすることとした。

応答の特性の評価、判定にあたっては、前述の打音検査で見られる現象を考慮し、特に応答波の大きさ、周波数特性に着目することとし、応答波を周波数領域において検討することとした。

3. 試験概要

(1) 装置の概要

前章にもとづき、磁歪素子を用いて低周波弾性波を一定エネルギーで入力できる装置を製作し、診断手法を確立するための試験を行った⁶⁾。装置の外観を写真-1に示す。本装置は、探査子と本体部から構成される。

探査子内には発振子及び受信子が内蔵されている。また本体部では発振する振動の制御、受信した振動波形の解析、記録などを行う。以下に本装置の特徴的な仕様を述べる。

a) 発振周波数帯域

コンクリート中の減衰を極力小さくするために発振周波数帯域は概ね可聴領域とし、1kHz～10kHz および10kHz～24kHzの周波数帯域を発生する2つの探査子を製作した。

b) 周波数掃引方式

入力方式はすべての周波数において連続的に同じ振幅で入力できる周波数掃引方式を採用し、一測定毎の入力エネルギーが一定となるようにした。

c) 吸着機構

センサーとコンクリートとの境界での表面の凹凸などによる信号の伝達ロスを抑えるためには、センサーをコンクリート表面に圧接した状態で加振する必要がある。そのため、探査子内を真空に近い状態にして探査子をコンクリート表面に吸着させる機構とし、吸着時の空気圧を管理することとした。また、対象面の凹凸の吸収や圧接時の剛性（圧接により粉体特性から剛体特性へ変化）の実現が可能であり、さらに消耗性が低いことなどから、磁粉を発振子・受信子の先端に塗して隙間を埋める機構としている。この吸着機構と磁粉により、再現性の良いデータの取得を可能とした。

また、探査子は吸着すると解除するまでは作業員が手で押さえなくともコンクリート表面に吸着しているので、作業面での負荷が軽減される。

(2) 試験内容

診断手法を確立するのに必要なデータ収集のために山陽新幹線トンネルで試験を行った。試験装置を用いた試

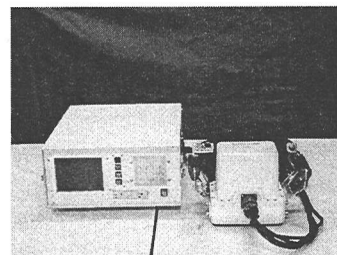


写真-1 試験に用いた装置



写真-2 試験状況

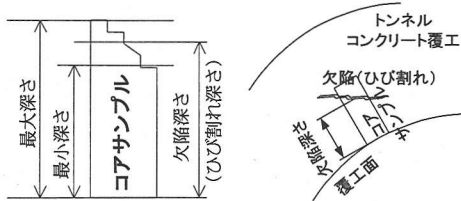


図-1 欠陥深さ

表-1 コアサンプル数

種類	サンプル本数
健全	26本
欠陥	21本
合計	47本



図-2 サンプル位置

試験状況を写真-2に示す。試験方法は、試験箇所を本装置で計測後、計測箇所のコアサンプリング(φ100mm)を行い、抜き取ったコアサンプルにより欠陥の有無を確認し、その深さを測定した。この場合に作業により折損したものは破断面を確認し、本来の欠陥と区別した。欠陥がコアサンプルに対して斜めに入っている場合は、図-1のように最大深さと最小深さの平均値を欠陥の深さとした。計測箇所でのコアサンプル数を表-1、サンプリング位置を図-2に示す。

4. 有無判定評価

(1) 応答特性の評価

山陽新幹線のトンネルで得られた応答波をFFT処理した波形(以下「応答波形」という)を図-3~5に示す。図-3は発振子から1,000~10,000Hzの入力を行った場

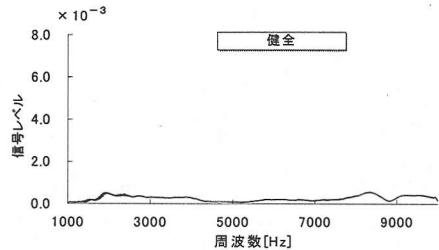
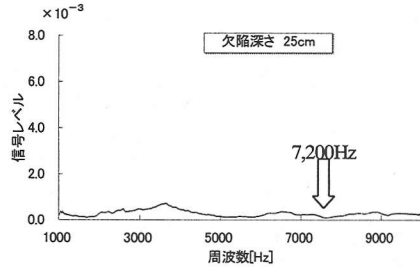
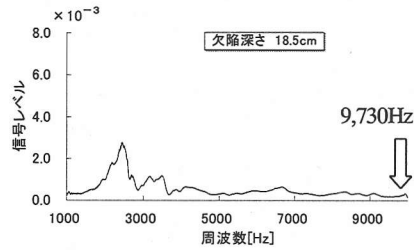
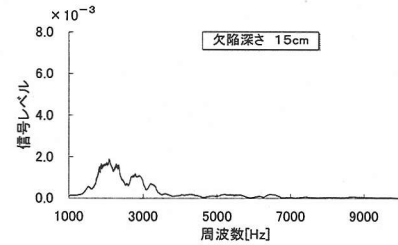
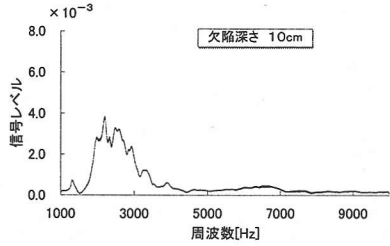
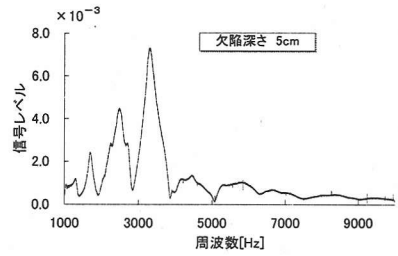


図-3 欠陥部と健全部の応答波形(1,000~10,000Hz)

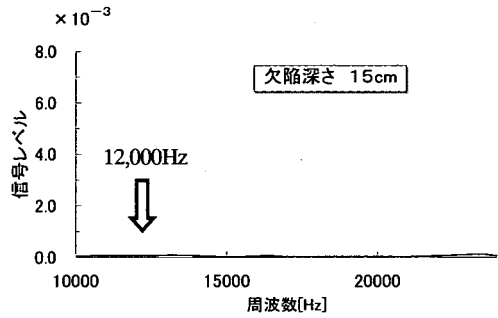
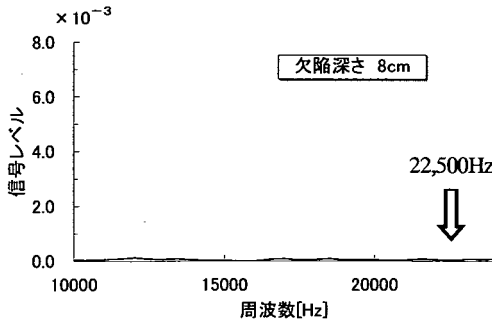


図-4 欠陥部の応答波形 (10,000~24,000Hz)

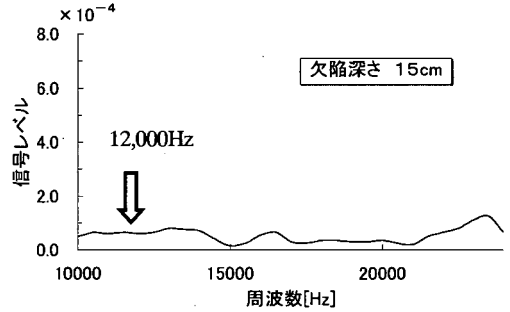
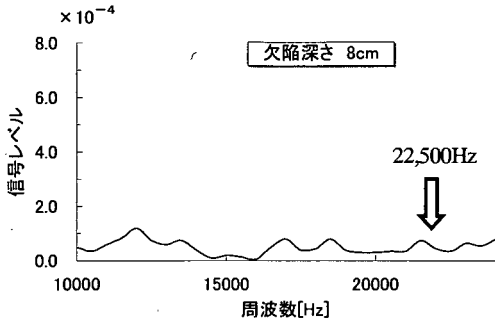


図-5 欠陥部の応答波形 (10,000~24,000Hz) 縦軸拡大

合、図-4は発振子から10,000~24,000Hzの入力を行った場合の応答波形であり、図-3との比較を容易にするために縦軸のスケールを同じにしたものである。また図-5は、図-4の縦軸を10倍し、ピーク周波数が明瞭に判別できるようにしたものである。

それぞれのグラフの横軸はFFT変換後の周波数、縦軸は信号レベルである。

著者らはまず、応答波形のピーク周波数に着目し、これより欠陥の有無と相関して有意な差が存在するかについて検討した。これはコンクリートの応答波形に縦波共振のピーク周波数が表れるという考え方に基づくものであり、たとえばこの手法の例として、版厚やかぶり深さ、空隙までの深さを推定する場合の二探触子・表面走査法による測定方法(FFT方式)⁷⁾がある。この測定方法は、送受両探触子をコンクリートの同一面に当て、周波数を変えながら縦波弾性波を送信し、受信波をFFTアナライザでフーリエ解析し、得られたFFT波形のピーク周波数 f (1次共振)から欠陥深さ d を式(1)により算出するものである。

$$d = \frac{v}{2f} \quad (1)$$

ここで v はコンクリート中の縦波伝播速度である。

本研究の場合、欠陥までの深さ d は当該箇所のコアボーリングにより既知であるから、入力波がコンクリート

中を伝播する速度 v (3,600m/sec:抜き取ったコアサンプルの伝播速度の測定値の平均値)を用いて縦波共振のピーク周波数 f を式(2)により算出し、図中に矢印で示した。

$$f = \frac{v}{2d} \quad (2)$$

この場合欠陥深さが18cmより浅い場合はピーク周波数は10,000Hzを越える帯域に存在することとなる。しかし、図-4では波形のレベルそのものが、図-3の欠陥がある場合の10,000Hz以下の帯域のレベルに比べ、かなり低いレベルにあるとともに、欠陥深さ15cmの場合には、縦波共振のピーク周波数である12,000Hzを示す矢印の付近には明瞭なピークが見られない。また、欠陥深さ8cmの場合には、縦波共振のピーク周波数である22,500Hz付近にピークは存在するものの他にもピークが複数存在するため、実際の測定では欠陥の有無、深さが既知でないことを考えると、どれが縦波共振に相当するピークかを判別することは極めて困難な波形となっている。また、図-3に示す欠陥深さが25cmの場合においても、縦波共振のピーク周波数である7,200Hzを示す矢印付近に明瞭なピークは存在しない。したがって、縦波共振による応答波のピークに着目して欠陥の有無等を判定に用いないこととした。

一方、10,000Hz以下の帯域における応答波形(図-3)

は、欠陥が 18.5cm より浅い場合はおおむね 1,000～5,000Hz の帯域のレベルが健全な場合に比べて高く、いくつかのピークを持つことが特徴的である。また欠陥深さが 25cm 程度になると 1,000Hz～5,000Hz 付近の成分は健全な場合に近くなる。

これらは、欠陥がある場合は、覆工表面とクラック等の欠陥とはさまれた部分が、式(2)で推定される各々の欠陥深さに応じた縦波共振のピーク周波数より低い周波数帯域で、特定のモードで振動することにより、振動が卓越するものと考えられる。このような比較的低い周波数帯域での振動を「たわみ振動」と呼ぶこととした。たわみ振動は、欠陥があれば、健全な場合に比べて応答も大きく両者の応答エネルギー相関量（以下「エネルギー量」という）に有意な差が認められる可能性がある。磁歪素子では、磁束とひずみが比例関係にあり両者を微分した信号レベル（電圧）と応答速度も比例関係にあることから、応答速度の 2 乗に比例するエネルギー量を式(3)で示す値とした。

$$E = \int_{f_1}^{f_2} \{L(f)\}^2 df \quad (3)$$

ここで、

E：エネルギー量

L(f)：周波数 f での信号レベル

f1：上限周波数

f2：下限周波数

このことから 1,000～5,000Hz において、エネルギー量と欠陥の有無の相関を調べるために表-2 のパターンに分類し統計的に分析した。

図-6 は、周波数帯域ごとのエネルギー量を、健全箇所と欠陥箇所とに区分したヒストグラムである。1,000～1,500Hz では、欠陥の有無がエネルギー量で区別されているが、他のパターンでは欠陥の有無がおおむねエネルギー量と区別されているものの、一部のデータは区分されていない。そこで 1,000～1,500Hz を有無判定に用いる周波数帯域に選定し、健全と欠陥を 2 分しているエネルギー量

表-2 周波数帯域パターン

パターン	周波数帯域(Hz) (f1～f2)
1	1000～1100
2	1000～1300
3	1000～1500
4	1000～2000
5	1000～3000
6	1000～4000
7	1000～5000

ギ一量 1.0×10^5 を閾値とした。

以上の結果から、欠陥有無判定のフローを図-7 のようにした。

有無判定に用いる周波数帯域に 1,000～1,500Hz を選定することとしたが、これはデータの統計的処理によるものであるため、さらにこの方法の妥当性について

確認するために、供試体による検証ならびに数値シミュレーションによる検証を行った。

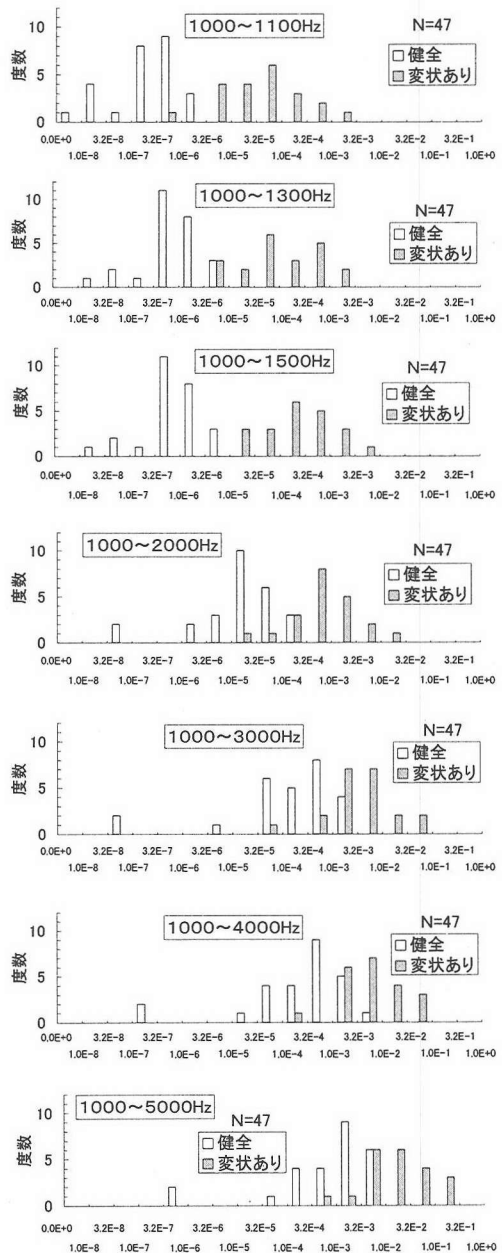


図-6 欠陥部と健全部のエネルギー量の分布

(2) 供試体による検証

あらかじめ内部に欠陥が作られている供試体を用いて、欠陥有無判定フローの妥当性を確認した。なお、欠陥は鉄板にはく離剤を塗布したものにコンクリートを打設し、硬化後に下方に引き抜いて作製されている。供試体の諸元を図-8および表-3に示す。健全部、欠陥部を含め、233点を計測し、実トンネル計測と同様、ヒストグラムを作成した結果を図-9に示す。計測ポイント233点中危険側（欠陥部を「健全」と判定）に判定した4点の例外を除くと、正しく判定あるいは安全側（健全部を「欠

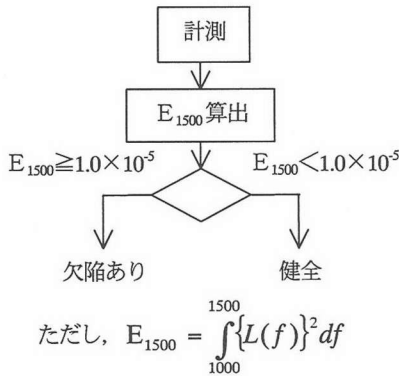


図-7 欠陥有無判定フロー

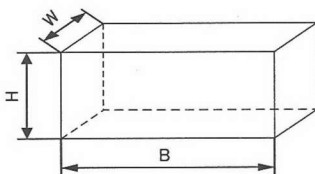


図-8 供試体寸法

表-3 供試体の緒元

項目	寸法、大きさ (cm)
幅(B)	200
高さ(H)	150
厚さ(W)	10, 20, 30, 40, 50, 60
欠陥の大きさ	50×50, 30×30, 25×25
欠陥の深さ	5, 10, 20, 30, 40

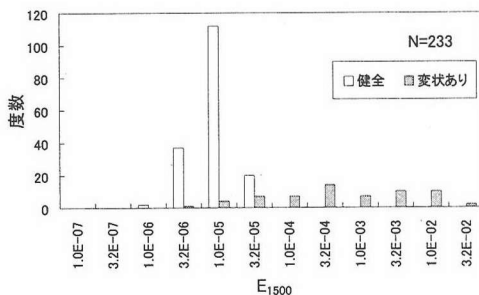


図-9 供試体を用いた欠陥部と健全部のエネルギー量の分布

陥」と判定)に判定している。なお、実測によれば、欠陥の端部を計測した場合には欠陥部を「健全」と判定することがあり、上記の4点は、これに該当していた。

以上の結果から、供試体においても1,000~1,500Hzの帯域で有無判定が可能ということがわかった。

また、有無判定の再現性については、健全部（厚さ50cm）と欠陥部（大きさ50cm×50cm、深さ10cm）についてそれぞれの同一個所40回の測定による検証の結果、エネルギー量E₁₅₀₀のばらつきもほとんどなく、すべてを正しく有無判定し、本手法による計測の再現性が確認された。

(3) 解析による検証

a) 目的

前章までに述べた有無判定フローを理論的に裏付けることは診断方法の妥当性、および診断装置の信頼性を確保する上で非常に重要である。コンクリートの表面を本装置の探査子により強制加振させた場合、コンクリート内部に欠陥がある場合と無い場合において、コンクリートがどのような挙動を示すか、また両者の挙動にどのような差異があるかを数値解析により確認し、欠陥有無判定フローを理論的に検証した。

表-4 数値解析条件

ソフトウェア名	LS-DYNA
解析手法	動的陽解法FEM
固有値解析ソフト	NASTRAN
メッシュ分割サイズ	10×10mm
厚み方向	10mm (平面ひずみ)
要素数	20,000要素
節点数	20,703
質量密度	2300kg/m ³
ヤング率	25500 N/mm ²
ポアソン比	0.20
入力波	スウィープ波 (掃引周波数1000~10000Hz)
スウィープ時間	1.3秒間

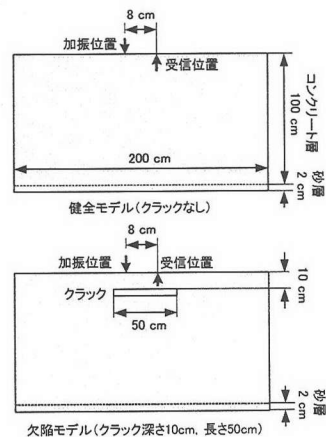


図-10 解析に用いたモデル

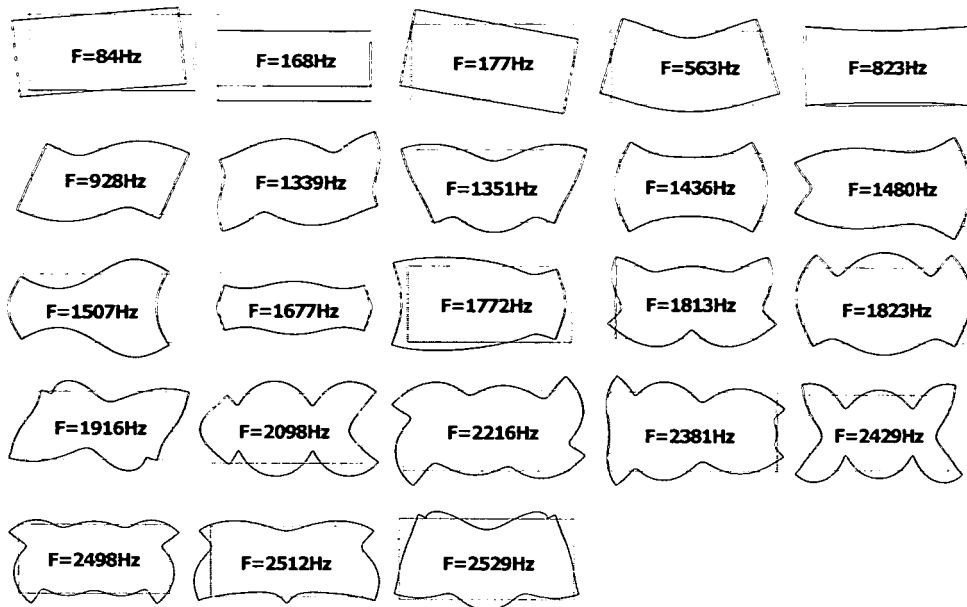


図-11 健全モデルの固有値解析による振動モード

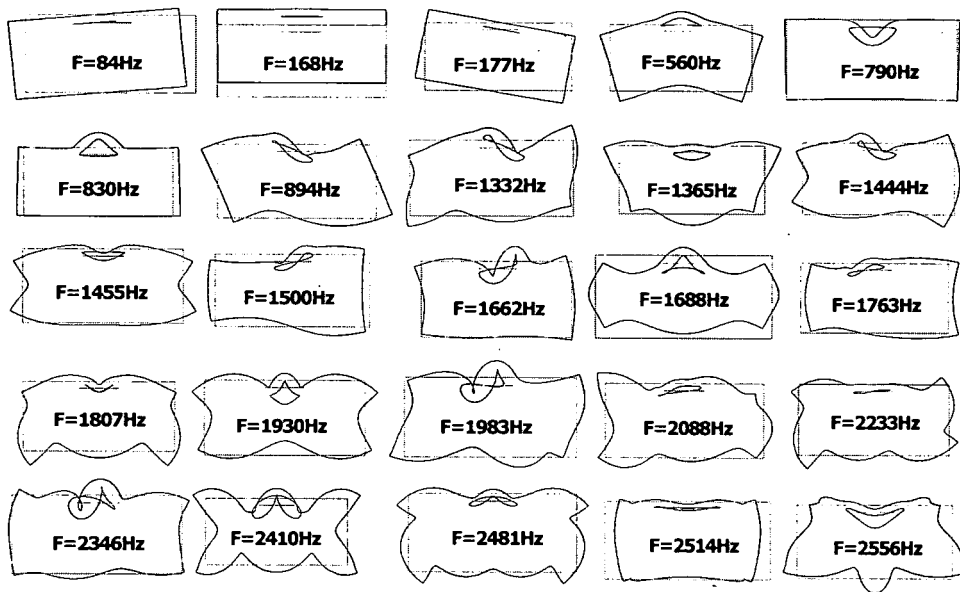


図-12 欠陥モデルの固有値解析による振動モード

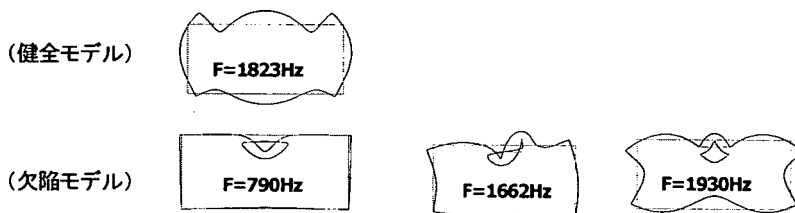


図-13 健全および欠陥モデルの特徴的な振動モード

b) 解析内容

解析は、供試体を2次元の有限要素法によりモデル化し、これに装置と同じ入力波を入力することによりその応答を評価した。表-4に数値解析条件を示す。解析に用いるモデルは、図-10のように欠陥の無い健全モデルと、表面から10cmの深さに長さ50cmのひび割れが存在する欠陥モデルの2通りとした。実際の探査子の加振と受信状況をできるだけ再現するように解析モデル上で加振位置、受信位置及び加振条件を設定した。メッシュサイズは解析精度の確保のため入力周波数の最大値10,000Hzの場合でも1波長が30メッシュ程度以上対応するよう10mm×10mmに設定した。なお、減衰については考慮していない。

c) 解析方針

- ①固有値解析により、モデルの振動モードとその固有振動数を求め、健全なモデルと欠陥のあるモデルの差異を確認する。
- ②フーリエ解析・モード解析により、各振動モードの大きさを確認する。

d) 固有値解析⁹⁾

構造系の質量マトリックスをM、剛性マトリックスをK、固有円振動数を ω 、そのときの振動モードをXとした場合、固有円振動数 ω と振動モードXは、減衰を考慮

していない場合には式(4)により求められる。

$$KX = \omega^2 MX \quad (4)$$

ここで、健全モデル、欠陥モデルそれぞれの固有振動数および振動モードを計算した結果を図-11, 12に示す。図-11と図-12を比較した場合、84Hz, 168Hz, 177Hzでは全く同じ振動モードが発生している。また、例えば健全モデルの563Hz, 823Hz, 928Hzと欠陥モデルの560Hz, 830Hz, 894Hzは、モデル全体が振動するモードとして同一の振動モードが表れていると考えられ、同様の共通する振動モードはより高周波でも数多く存在する。一方、健全モデルにおける1,823Hzでのモード、欠陥モデルにおける790Hz, 1,662Hz, 1,930Hzのモードについては対応する共通のモードが見られず、各々のモデルに特有の振動モードと考えられる。図-13はこれらを抽出したものである。特に欠陥モデルの790Hzにおける振動モードは明らかにモデル全体ではなく、ほぼ欠陥部のみがたわみ振動しているモードと確認できる。さらに、欠陥モデルでは、表面と欠陥によってはさまれる部分の形状から、たわみ振動による1次振動モード(790Hz)、2次振動モード(1,662Hz)、3次振動モード(1,930Hz)が発生していることがわかる。これは、欠陥がある場合はたわみ振動が発生しているものと考えられる。一方、

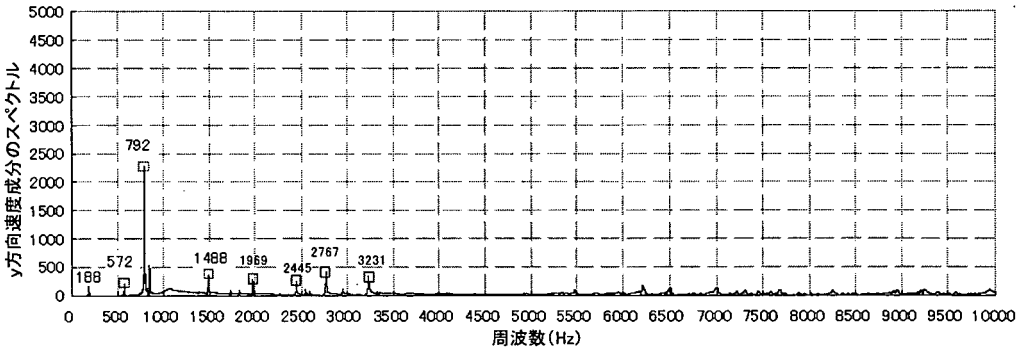


図-14 欠陥モデルのフーリエ解析結果

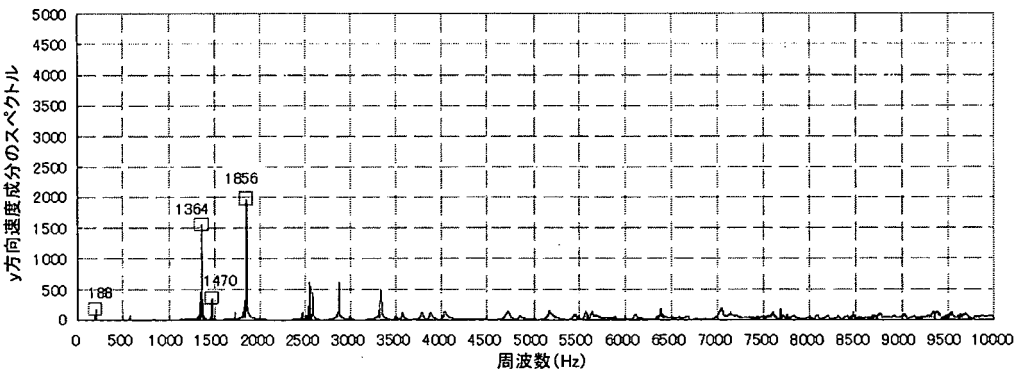


図-15 健全モデルのフーリエ解析結果

健全モデルに見られる振動モード (1,823Hz) は、縦波による共振現象と思われる。

e) フーリエ解析⁹⁾

図-14は、欠陥モデルに探査子により振動を与えた場合の受信子の位置での速度履歴のフーリエ解析結果である。792Hzでの成分が卓越しており、このことから792Hz付近でのモードが他のモードに比べて際立って高い応答レベルであることがわかる。また図-15に健全な場合のフーリエ解析結果を示す。ここでは1,856Hzが卓越している。

f) 考察

以上の解析結果から、加振されたコンクリート覆工に欠陥がある場合は、低周波域で欠陥部と表面ではさまれた部分のコンクリートのみがたわみ振動する特有の振動モードで応答し、かつその応答レベルも他のモードに比べ卓越していることがわかる。

本解析における応答周波数はモデルが2次元であることを考慮すると、3次元の実際のモデルやトンネル覆工では拘束力が大きくなるため、これより応答周波数が高くなると考えられる。

ここで、3次元での応答周波数を推定するため1つの方法として、平板の振動を示す式(5)⁹⁾の4辺固定の正方形板の1次固有振動数(3次元の振動数に相当)と棒の横振動を示す式(6)⁹⁾の両端固定ビームの1次固有振動数(2次元の振動数に相当)の比、約1.7倍を用いた場合には、2次元モデルで最大応答の792Hzを3次元の等価な周波数に換算すると1,300Hz~1,400Hzとなる。また、平板の振動を示す式(7)⁹⁾の4辺支持(ヒンジ)の正方形板の1次固有振動数と棒の横振動を示す式(6)⁹⁾の両端支持ビームの1次固有振動数の比、約2.1倍を用いた場合は、同様に3次元での等価な周波数は1,500Hz~1,600Hzとなる。3次元での等価な周波数を定量的に高精度で推定することは困難と考えられるが、このことからおおむね1,300Hz~1,600Hz程度に、欠陥がある場合の特有の振動モードが発生することが推定される。したがって、内部欠陥の有無判定にFFT波形における1,000Hz~1,500Hzのエネルギー量を用いることは合理的であると考えられる。

$$f_{p1} = \frac{\lambda_p \pi h}{2\ell^2} \sqrt{\frac{Eg}{3(1-\mu^2)\nu}} \quad (5)$$

$$f_b = \frac{\lambda_b^2}{2\pi d^2} \sqrt{\frac{EIg}{\nu A}} \quad (6)$$

$$f_{p2} = \frac{\pi h}{\ell^2} \sqrt{\frac{Eg}{3(1-\mu^2)\nu}} \quad (7)$$

ここで、 ℓ : 4辺の辺長 (cm)

h : 板厚 (cm)

E : 縦弾性係数 (cm)

μ : ポアソン比

ν : 単位体積の重さ (kgf/cm³)

λ_p : 無次元係数 ($\lambda_p=3.65$)

l : 棒の長さ (cm)

I : 断面二次モーメント (cm⁴)

A : 断面積 (cm²)

λ_b : 無次元係数 ($\lambda_b=4.730, \pi$)

$g=981\text{cm/sec}^2$

5. 深さ推定評価

(1) 応答特性の評価

図-3に見られるように欠陥深さが深くなるにつれ、おおむね波形の信号レベルが小さくなっていく傾向がある。このことから入力波が欠陥深さに応じて拡散または減衰によりそのエネルギーが小さくなる傾向にあることが推測される。また、振動エネルギーが距離とともに広がっていくことによる単位面積あたりのエネルギーの減少によるもの(幾何減衰)と、内部粒子の動きによる減衰(内部減衰)とにより、一般に振動は距離とともに減衰すると考えられる¹⁰⁾。このことからコンクリート表面を加振することにより発生した波動は、伝播に従い距離の

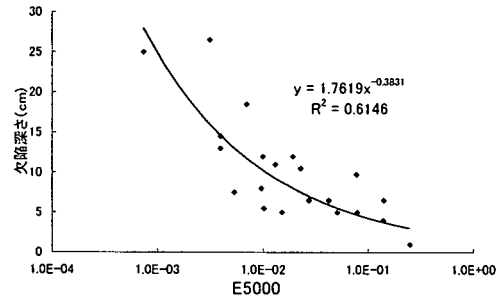


図-16 E_{5000} と欠陥深さとの関係(実トンネル)

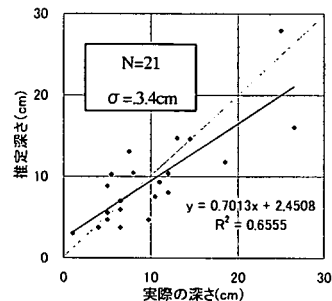
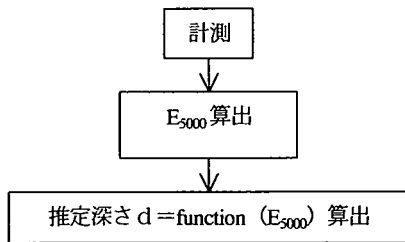


図-17 推定深さと実際の深さとの関係(実トンネル)



ただし、 E_{5000} は式(8)による

図-18 欠陥深さ推定フロー

べき乗で減衰することが考えられる。欠陥深さとの相関を、表-2と同じ周波数帯について累乗近似を用いて整理したところ、式(8)により算出したエネルギー量と欠陥深さの関係式は比較的良好な相関を示した(図-16)。

$$E_{5000} = \int_{1000}^{5000} \{L(f)\}^2 df \quad (8)$$

このような方法を用いて推定した深さと実際の深さとの関係を図-17に示す。実際の深さは、コア採取の結果により判定している。実際の深さは1~26.5cmの範囲にあり、これら欠陥深さの推定値誤差の標準偏差は3.4cmである。

以上の結果から、欠陥の深さ推定のフローを図-18のようにした。

(2) 供試体による検証

あらかじめ内部に欠陥が作られている供試体を用いて、欠陥深さ推定フローの妥当性を確認した。供試体が異なるかまたは同一供試体で計測位置が異なる欠陥部のみ62点を計測し、このフローにより算出された推定深さと実際の深さとの関係を図-19に示した。実際の深さは5cm~20cmに分布している。推定値の誤差の標準偏差は3.7cmであり、トンネルでの場合とほぼ同等の精度であった。

また、深さ推定の再現性については、欠陥部(大きさ50cm×50cm、深さ10cm)の同一箇所40回の測定による検証の結果、実際の深さ10cmからの推定値誤差の標

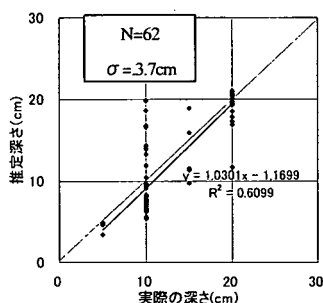


図-19 推定深さと実際の深さとの関係(供試体)

準偏差は1.0cmであり、本手法による深さ計測の再現性が実用的な精度以内であることを確認した。

6. 適用限界

本装置は、非破壊検査装置であるため診断原理等に起因する装置の特性があり、これに基づく適用限界を明確しておくことは、本診断手法を実用化するにあたって重要である。これまでの検討結果から、本装置の適用限界は以下のとおりである。

- ① 診断が可能な欠陥の大きさは1辺が30cm以上のものである。
- ② 同じく欠陥の深さは20cm以下のものである。
- ③ 覆工表面のクラックや凹凸等により探査子が吸着しない箇所では計測できない。

①について

実測によれば、欠陥の端部を計測した場合に、欠陥があるにもかかわらず健全と判定することがあり、この影響範囲は欠陥端部より5cm程度であることがこれまでの計測結果からわかっている。したがって、探査子の大きさ(約20cm)にこの影響範囲を加えた大きさ(約30cm)以上を適用範囲とした。

②について

欠陥の深さについても、深さがある程度大きくなると健全と判定することがある。これまでの計測結果から、深さが20cmまでの欠陥であれば有無判定や深さ推定が可能であることから、適用限界を20cm以下とした。

③について

クラックをまたいで計測する場合や表面に凹凸がある箇所を計測する場合には、探査子の接着面から空気が漏れ十分な圧力で吸着しないため計測ができない。

7. まとめ

コンクリート内部の欠陥、特にひび割れの有無、深さを推定する劣化診断手法を構築することを目的に、非破壊検査手法の開発を行った。開発にあたっては、実トンネルにおける計測結果をもとに欠陥の有無判定、深さ推定の診断手法を構築した。さらに、コンクリートモデル、解析モデルを用いてその診断手法の有効性の検証を行った。本研究結果をまとめると、次のとおりである。

- 1) 10kHz以下の低周波の弾性波を一定のエネルギーでコンクリート表面に圧接しながら入力・出力することにより、コンクリートの内部欠陥、特にひび割れの状態(欠陥の有無、深さ)の推定が可能となった。

- 2) コンクリート内部にひび割れ等の欠陥がある場合は低周波弾性波を入力することによりコンクリート表面と欠陥とではさまれた部分が特有の振動モードで応答する。その応答の発生周波数帯域のエネルギー量を判断基準に用いることより、かなり高い確率で欠陥の有無判定が可能であることがわかった。
- 3) 応答エネルギー量と欠陥深さとの間には、欠陥深さが応答エネルギーのべき乗で表される関係があることが判明し、その関係式を用いることにより実用的には十分な精度で深さ推定が可能であることがわかった。
- 4) 供試体による測定結果から、本装置の欠陥の有無判定および深さ推定の再現性を確認した。

以上のような実トンネル、供試体および解析モデルを用いた検証、確認試験を重ねることにより、本診断手法が実用化可能であることを検証した。

8. おわりに

本装置を用いたコンクリート内部の劣化診断手法は実用化可能であることが検証されたため、平成14年4月に山陽新幹線に導入され、実際の検査に用いられている。本研究の成果が、山陽新幹線のみならず、コンクリート構造物の維持管理技術の向上に資すれば幸いである。

謝辞：本研究を行うに際し、独立行政法人 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センターの亀田弘行センター長（元京都大学防災研究所教授）に懇切なご指導と貴重なご意見を頂きました。ここに記して謝意を

表させていただきます。また、機器の開発、製作に際してご尽力いただいた三菱電機 産業・環境エンジニアリングセンターの服部晋一氏をはじめとする関係者の方に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鎌田敏郎：弾性波法、講習会「コンクリート構造物の診断技術」、日本材料学会、pp.16, 2001.
- 2) 今井博：電磁波による高精度コンクリート内部調査法、土木学会第55回年次学術講演会、V-443, 2000.9.
- 3) 極塚邦夫、野瀬元興、岩野聡史、境友昭：周波数応答解析によるコンクリートの健全性試験、土木学会、構造物の診断に関するシンポジウム論文集、pp.121-128, 1998.7.
- 4) 浅野雅則、鎌田敏郎、国枝稔、六郷恵哲：コンクリートの欠陥評価における打音法のパラメータの感度に関する考察、土木学会第57回年次学術講演会、V-397, pp.794-795, 2001.10.
- 5) 谷腰欣司：超音波とその使い方、日刊工業新聞社、pp.142, 1994.
- 6) 山口義信、松井精一、服部晋一、甲斐公一郎：音響弾性波トンネル診断装置、第37回鉄道サブシンポジウム論文集、pp.335, 2000.
- 7) 石井勇五郎、笠井芳夫：コンクリート非破壊検査試験法、養賢堂、pp.128, 1994.
- 8) 土木学会編：動的解析と耐震設計第2巻動的解析の方法、技報堂、pp.38-45, 1989.
- 9) 日本機械学会編：機械工学便覧、第3編3-52~3-56.
- 10) 公害防止の技術と法規編集委員会：新訂・公害防止の技術と法規（振動編）、丸善、pp.69, 1987.

(2002.6.3 受付)

DIAGNOSTIC METHOD USING LOW FREQUENCY ELASTIC WAVE FOR DEFECT OF TUNNEL LINING

Seiichi MATSUI, Yuichi YAMADA and Fumihiko OSADA

Recently the phenomena have happened in Japan that spalls of tunnel lining concrete fall from its surface. Therefore the method for diagnosing interior defects of tunnel lining concrete has been desired to develop. Several diagnostic methods have been proposed, but most of them are in the test stage and don't come to practical use. In this paper, we describe the development of the diagnostic device with low frequency elastic wave and the results of the tests by this device in real tunnel to verify the method for diagnosing existence and depth of interior defects of tunnel lining concrete. We also describe the results of the tests by this device for concrete models and of dynamic numerical analysis.