

反射波法を用いた非破壊試験のコンクリート構造物 空隙調査への適用性に関する研究

横山 好幸¹・熊野 賢二¹・宮川豊章²・野村 勝義³・今田 和夫³

¹正会員 日本道路公団 四国支社 高松技術事務所 (〒760-0065 高松市朝日町 4-1-3)

²フェロー会員 工博 京都大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授 (〒606-8317 京都市左京区吉田本町)

³正会員 (株)フジエンジニアリング 調査設計部 (〒532-0032 大阪市淀川区東三国 5-5-28)

コンクリート構造物における非破壊試験は、現在各関係機関で研究・開発が進められているものの、歴史が浅いこともあり、明確な評価基準が確立されないまま損傷状況の把握や品質管理に用いられているのが現状である。そこで、本文では踏掛版下およびトンネル覆工背面の空隙調査手法として、簡便に調査が行える衝撃弾性波あるいは超音波を用いた非破壊試験に着目し、供試体を対象に実施した試験結果から空隙調査への適用が可能であることを確認した。さらに、実構造物を対象にこれらの手法を適用し、実測データを分析・評価することにより、周波数の大きさや卓越周波数あるいは波形の相違から空隙調査に対してこれらの手法が適用可能であることを明らかにした。

Key Words: *nondestructive test, impact elastic wave, void, ultrasonic pulse wave, tunnel lining, concrete structure*

1. まえがき

日本道路公団では、年間150~200kmの高速道路を建設し、平成11年11月末現在、6,559kmを管理している。その道路構成比をみると、平成11年3月で、橋梁が14.4%、トンネルが8.9%を占めており、これらの比率はさらに増加する傾向にある。これらの構造物に対しては、建設時の品質管理・出来形管理、さらには維持管理の観点から、管理手法として適用できる非破壊検査手法の開発の重要性は益々高まるとともに、各手法の適用範囲や判定基準の確立が急務と言える。

トンネルに例を取ると、トンネル工事における吹付けコンクリートの施工時において、吹付けコンクリートと地山との境界や吹付けコンクリートと覆工コンクリートとの境界に空隙の残る可能性が考えられる。これらの境界面に空隙が発生すると、地山の弛みや覆工の耐力低下、コンクリートの剥離など劣化の原因となる。そのため、空隙の発生状況を把握し、必要に応じて裏込め注入等により空隙を充填することが道路管理上、また耐久性を確保する上で必要である。

一方、道路土工部における橋台背面の裏込め部や路体・路床の締固めが不十分な場合、踏掛版下に空隙が生じ、供用後の繰返し荷重により不等沈下や段差が発生し、舗装の損傷につながる事例が報告されている¹⁾。したがって、施工段階における品質管理を十分に行うことに加え、踏掛版下の空隙の有無を確認し、適切な措置を講じることが、舗装の耐久性や良好な交通環境維持のために重要であり、空隙検査手法の確立が必要となる。

既往の研究によれば、JRではトンネル覆工コンクリートを対象に空隙や浮きの探査法として、台車にヒーターを乗せ、コンクリート覆工を加熱し、赤外線を利用する手法を開発している²⁾。また、踏掛版下やトンネル覆工背面における空隙検査手法としては、電磁波を利用したレーダー探査が比較的有効とされ、トンネル内調査用に探査用アンテナおよび計測器を搭載した測定車が既に開発されている³⁾。また、踏掛版下に対する空隙調査の場合、踏掛版中の鉄筋により電磁波が反射したり減衰するため、ボックスカルバートにおいて実施された実証実験から、鉄筋間隔が10cm以下の

表-1 検討に用いた非破壊試験法

入力波による区分	センサー	仕様	本論文での呼称
ハンマー打撃による衝撃弾性波	圧電型加速度計	0.3Hz-30kHz	衝撃弾性波法(A)
	A Eセンサー	0Hz-150kHz	衝撃弾性波法(B)
超音波パルス波	チタン酸バリウム振動子	40kHz	超音波反射法

場合、明確な空隙反応が得られない場合がある⁴⁾ことが確認されている。また、レーダー探査では、入射するレーダーのエネルギー、波長や周波数により検出できる深度が異なることから、探査対象深度が大きくなると探査アンテナが大型化し、狭隙部の探査が困難となるなど、適用上の制約を受けることとなる。

そこで、本論文ではこれら踏掛版下およびトンネル覆工背面の空隙調査手法の確立を目的として、簡便かつ迅速に調査が可能な非破壊試験として衝撃弾性波を用いる方法、および超音波パルス波を用いる方法に着目し、空隙調査手法としての適用性について検討を行った。検討に当たり、まず供試体により各手法の適用性の評価・確認を行った後、実構造物に適用し、本検査手法が空隙調査法として適用可能であることを明らかにした。

2. 反射波法を用いた非破壊試験の概要

(1) 概説

踏掛版やトンネル覆工コンクリート内あるいはその背面に発生または存在する空隙を把握するためには、コンクリート表面からその内部を調査する必要がある。したがって、調査方法としては表面から入力した弾性波の反射波を計測し、解析する方法が有効である。そこで、本論文においては、入力波とセンサーの種類として表-1に示すように、

- ① 衝撃弾性波を用いて加速度計によりコンクリート厚さ等を測定するシステム(Concrete Thickness Measurement System: 略称CTM法)を適用する方法(本論文では衝撃弾性波法(A)と呼ぶ)
- ② A Eセンサー(Acoustic Emissionの略)により測定する方法(衝撃弾性波法(B)と呼ぶ)
- ③ 超音波パルス波を用いて発・受振動子により測定する方法(超音波反射法と呼ぶ)

の3種類の調査手法を選定し、各調査法の適用性の評価を行うこととした。

(2) 衝撃弾性波法(A)

衝撃弾性波法(A)は、オランダ応用科学研究所で開

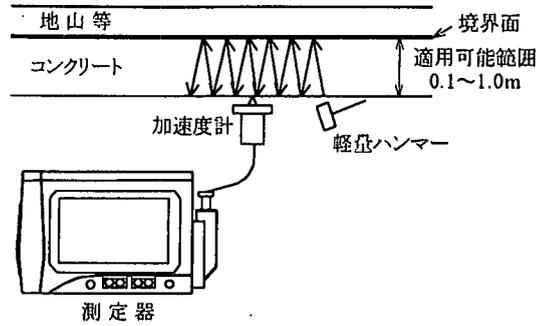


図-1 衝撃弾性波法(A)測定要領

発・実用化されたCTM法を用いて空隙調査を行う方法で、奥行きに対して十分な広さを有する板状のコンクリートを、厚さ0.1~1.0mまでの範囲で測定するものである。測定器が比較的小型軽量であることから、作業性や移動性に優れ、床版増厚に伴う床版一体化確認調査や舗装上面からの床版損傷状況確認調査などに近年多く利用されている⁵⁾。

衝撃弾性波法(A)は、図-1に示すように測点に加速度計を押し当て、その近傍を軽量ハンマーで打撃することにより発生する衝撃弾性波を加速度計を受信子として計測するものである。打撃により発生した衝撃弾性波は、打撃面と反射面との間で重複反射するため、測定した衝撃弾性波を高速フーリエ変換(FFT)すると、重複反射波による卓越周波数を求めることができる。こうして求めた卓越周波数(f)と、材質等によって決まる伝播速度 c を用いて式(1)により長さ L (厚さ)に換算し表示することができる。

$$L = c / 2f \quad (1)$$

ここに、 L :コンクリート厚さ(m)、 c :波動伝播速度(m/s)、 f :卓越周波数(Hz)である。

ただし、使用する加速度計の周波数領域が0.3Hz~30kHzであることから、コンクリートの伝播速度を4000m/sと仮定した時、加速度計の周波数特性より計測できる最小厚さ L_0 は0.067mとなる。また、コンクリート表面に設置した加速度計の近傍を軽量ハンマーによって打撃するため、打撃後約0.0005秒間は打撃に伴う直接波(ホワイトノイズ)の影響が大きく、反射波を明確に確認することが困難となる。このため、衝撃弾性波法(A)による測定対象範囲は0.1m以上としている。

(3) 衝撃弾性波法(B)

衝撃弾性波法(B)は、測定箇所にてA Eセンサーを密着させ、衝撃弾性波法(A)と同様に、その近傍を軽量

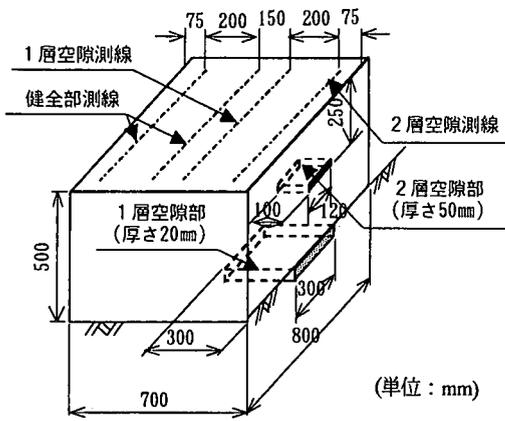


図-2 供試体形状寸法

ハンマーで打撃することにより発生する衝撃弾性波をAEセンサーを受信子として測定するものである。AEセンサーにより受信した衝撃弾性波について、波形の減衰特性や周波数特性を記録・分析することにより空隙の有無による変化を評価し、空隙検査手法の適用性について検討を行うこととした。

衝撃弾性波法(B)は、1探触子法で、しかもハンマー入力による衝撃弾性波を用いる点で、衝撃弾性波法(A)と入力波の条件が同じである。両者の相違は、センサーの周波数特性であり、衝撃弾性波法(A)が0.3Hz～30kHzの圧電型加速度計を用いるのに対し、衝撃弾性波法(B)では0～150kHzのAEセンサーを用いている点にある。

(4) 超音波反射法

超音波法は、表面波法によるコンクリートのひび割れ深さや透過法によるコンクリートの品質調査法として実績が多い手法⁶⁾である。ここでは、反射波を用いた超音波の伝播波形やスペクトルの変化から空隙の有無の評価を行う。

超音波反射法の測定システムは、超音波発・受振動子としてチタン酸バリウム振動子(固有振動数40kHz)を用いて、超音波測定器により超音波伝播時間を測定するとともに、記録器に超音波伝播波形を記録する。

超音波反射法は、超音波伝播経路中に欠陥等がある場合、超音波がそこで回折して進行したり、反射する性質を利用するものである。ここでは、同一面に超音波発・受振子を設置し、発振子から入力した超音波パルスが測定対象物の裏面あるいは欠陥部において反射し、受振子に到達するまでの伝播特性(伝播波形や周波数スペクトル)から空隙検査手法への適用性について検討を行うこととした。

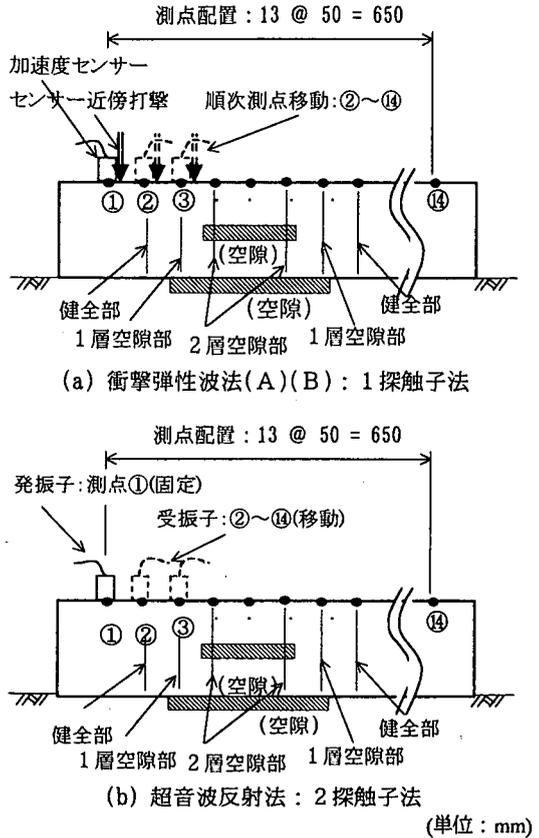


図-3 供試体試験 試験方法

3. 供試体による適用性確認試験

(1) 供試体試験の概要

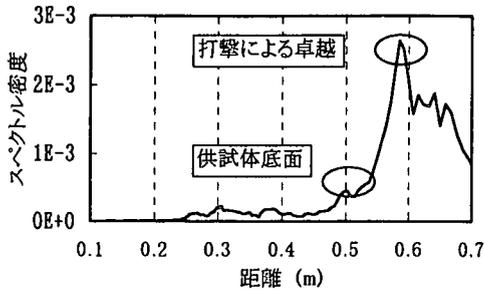
人工的に空隙を設けた供試体を用いて、前述した3手法で測定した実測波形に基づき、空洞の有無がどのように判定できるかを確認するための試験を実施した。

供試体の形状寸法は、図-2に示すように幅700mm×奥行き800mm×高さ500mmとした。この供試体高さは実際の踏掛版の厚さを想定しており、さらに、実構造物においては空隙が2境界面存在することも考えられ、空隙が1層となる箇所(図中、1層空隙部)と2層となる箇所(同、2層空隙部)とを設けている。

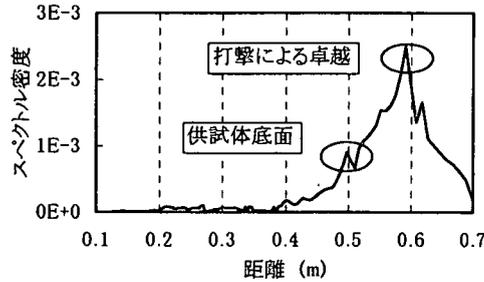
なお、供試体は十分に締め固めた地盤上に水平に設置し、供試体下端の空隙として地盤と縦波伝播速度の異なる厚さ50mmの発泡スチロールを敷いた。

(2) 試験方法

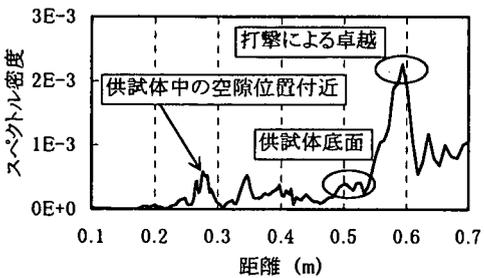
試験方法は、健全部および空隙部(1層部および2層部)の比較が行えるよう、図-2に併記した測線上の図-3に示す測点において行った。1探触子法となる衝撃弾性波法(A)および(B)は、各測点位置で実施した。また超音波反射法は、発・受振子を固定すると表面波



(a) 健全全部測定波形



(b) 1層空隙部測定波形



(c) 2層空隙部測定波形

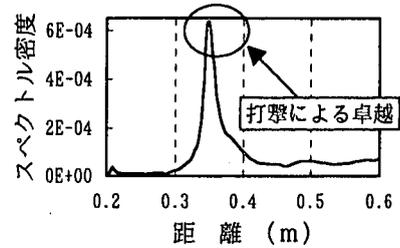
図-4 衝撃弾性波法(A)による供試体試験結果

が優勢となり空隙の検出が難しくなるため、発振子を固定し受振子を各測点上を移動させる要領で測定を行った。なお、ハンマー打撃時のバラツキを少なくするために、衝撃弾性波法(A)では同一測点で採取した3つのデータのスペクトル傾向がほぼ等しいことが確認できるまで繰り返し測定を行っている。また、衝撃弾性波法(B)では同一測点で再現性のある加速度波形が得られるまで繰り返し測定を行った。超音波反射法は入力波のエネルギーが安定しているためデータの再現性がよい。したがって、明瞭な波形をデータとして採取している。

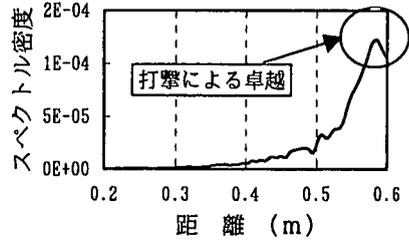
(3) 適用性確認試験結果

a) 衝撃弾性波法(A)

衝撃弾性波法(A)により得られた測定波形を、図-4に示す。図-4に示すとおり、衝撃弾性波法(A)による測定波形の横軸は、式(1)により周波数を長さに変換したものと表しており、以降衝撃弾性波法(A)に



使用ハンマー：スチールハンマー



使用ハンマー：プラスチックハンマー

図-5 ハンマーの違いによる
打撃固有スペクトルの違い

よる測定波形の横軸は長さとして表示する。使用するハンマーは、後述するように材質により打撃時の固有スペクトルが異なる。この打撃固有スペクトルと測定対象物から得られる卓越周波数のピークが近似すると両者の区別が困難となる。したがって、ここでは軽量ハンマーとしてプラスチックハンマー(打撃固有周波数3000Hz)を用いて衝撃弾性波を入力し、供試体の厚さから想定される卓越周波数4000Hzと差を持たせることとした。反射波は底面や空洞部のみならず側方部の影響を受けて複雑な波形を呈する。そこで、衝撃弾性波法(A)の測定結果は、供試体底面に着目した波形として表示した。厚さの換算は伝播速度を3700m/sとして行っている。この値は健全全部における測定結果から逆算した伝播速度の平均値を採用したものである(標準偏差 $\sigma=0.015$, 変動係数 $V=0.028$)。ここで、水平方向のひずみが拘束された状態でのコンクリートを鉛直に伝播する波動の伝播速度は、次式により求めることができる。

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{1000\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (2)$$

ここに、 c ：伝播速度(m/s)、 E ：弾性係数(N/m²)、 ρ ：密度(ton/m³)、 ν ：ポアソン比である。式(2)において、供試体と同一コンクリートのコア試験結果から得られた、 $E=3.0 \times 10^{10}$ (N/m²)、 $\rho=2.4$ (ton/m³)、 $\nu=0.2$ を

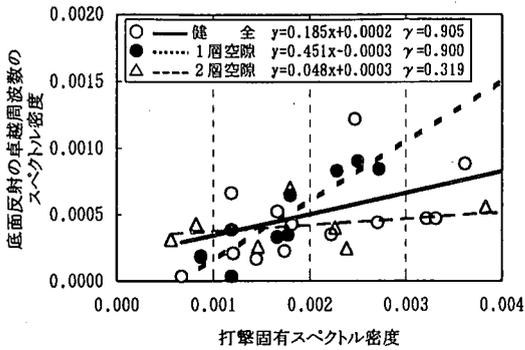


図-6 打撃および底面反射波の卓越周波数のスペクトル密度の大きさの比較

代入すると $c=3730\text{m/s}$ となり、実測データから逆算した値とほぼ一致しており、 3700m/s は妥当な値であると判断できる。

図-4(a)~(c)に示す健全部、1層空隙部および2層空隙部における衝撃弾性波法(A)の測定波形には、共通してスペクトルのピークが 0.5m と 0.6m 付近に現れている。しかも、 0.6m 付近のピークは最も明瞭に現れている。 0.5m のスペクトルのピークは供試体の底面における反射(供試体厚さ)と一致している。また、 0.6m 付近のピークは、ハンマーの材質と1打撃の継続時間により現れる周波数約 3000Hz の固有のスペクトル(以下、打撃固有スペクトルと呼ぶ)を示しているものと考えられる。すなわち、試験に用いるハンマーをプラスチックハンマーからスチールハンマーに変えると、図-5に示すように、材質の相違により卓越周波数のスペクトルは 0.6m 付近には現れず、 0.35m (周波数換算で約 5300Hz)に現れる。これはハンマー打撃時におけるコンクリート表面でのハンマー接地時間が異なり、プラスチックハンマーではスチールハンマーに比べて材質が柔らかいため長くなり、その差が周波数の違いとして現れているものと類推される。したがって、 0.6m 付近にみられる打撃固有スペクトルのピークは、ハンマー打撃によるコンクリート表面の横波の卓越周波数が現れているものと考えられる。

また、 0.5m の位置にみられる波形上の相違点をみると、1層空隙部(図-4(b))は健全部と比較すると、卓越した周波数スペクトルのピークが鋭い形状を呈している。これは、供試体底面部の境界条件が、健全部では地盤と接しているため、弾性波は境界面で一部は地盤へ透過するのに対し、1層空隙部では境界面でほぼ全反射するためであると推察される。一方、2層空隙部(図-4(c))は周波数スペクトルの乱れが大きく、卓越した周波数帯は不明瞭となり、かつ周波数のピークが2つ現れる傾向がみられる。この現象は供試体中

に設けた空隙部でも、 $0.26\sim 0.28\text{m}$ 付近の位置で確認できる周波数スペクトルのピークにも現れている。

ここで、上述したハンマー打撃自体の影響について考察する。ハンマー打撃により出現する卓越周波数のスペクトル密度と、供試体底面や空隙面からの反射波による卓越周波数のスペクトル密度の関係を図-6に示す。この図は健全部、1層空隙部および2層空隙部に区別して描いている。図から明らかなように、両者の関係は、健全部および1層空隙部は共に相関性が高く、直線の勾配が健全部では小さく(0.185)、1層空隙部では大きい値(0.451)を示している。すなわち、入力波の固有スペクトルの大きさを反射波のスペクトルを正規化することにより、健全部と空隙部の相違が定量的に評価できること示唆している。また、両者の相関係数は健全部が $\gamma=0.905$ 、1層空隙部が $\gamma=0.900$ である。なお、2層空隙部は測点数が少ないこともあり相関係数 $\gamma=0.319$ と低く、ここでは除外して考察する。

健全部と1層空隙部における回帰式の勾配の相違から明らかなように、健全部における反射波の卓越周波数のスペクトル密度の変化は、打撃による卓越周波数のスペクトル密度の大きさの変化に比べて小さく、1層空隙部と明瞭に差が確認できる。これは、健全部と1層空隙部の波形の相違でも述べたように、健全部が地盤と接することによる地盤への波動の透過が影響しているものと考えられ、境界条件の違いが分析波形に現れていることを示している。

以上、衝撃弾性波法(A)を用いて供試体の空隙部を評価した結果より明らかとなった本手法の空隙調査時の特性は以下の通りである。

- ① 空隙部は健全部と比較して、卓越周波数のスペクトルが鋭い形状を示す。
- ② 入力波のスペクトルの高さに対する境界面での反射波のスペクトルの高さの比率は、健全部が小さく(0.185)、空隙部の方が大きい値(0.451)を示す。

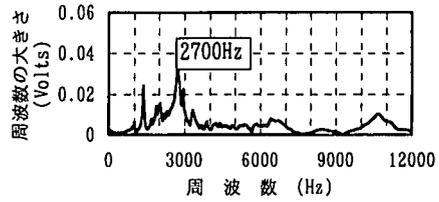
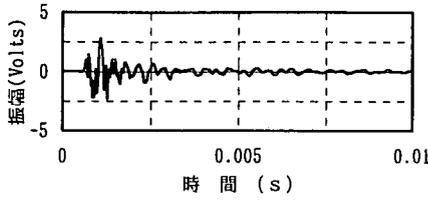
したがって、衝撃弾性波法(A)による空隙判定は、境界面における反射波の周波数スペクトルの形状と、打撃固有スペクトルの大きさとの比率を求めることにより可能となる。

b) 衝撃弾性波法(B)

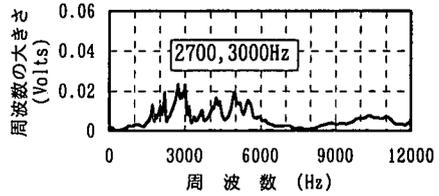
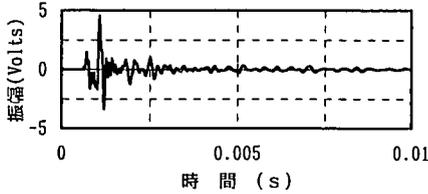
衝撃弾性波法(B)における測定波形を図-7に示す。

図の左側に示した最大加速度波形の振幅に着目すると、健全部の振幅は電圧表示で、 3Volt 以下に分布するが、空隙部では $3\sim 5\text{Volt}$ に分布していることから、空隙が存在すると波形振幅が大きくなる傾向がみられるが、空隙の有無を判定する明確な差違を示すものとはいえない。また、周波数スペクトルにおいては、健

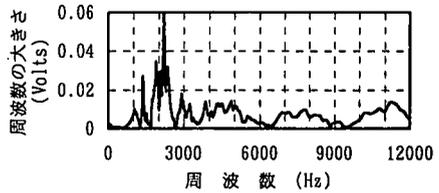
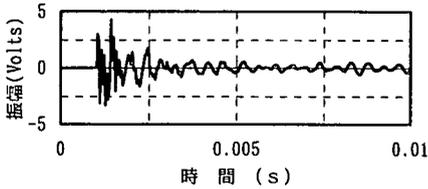
《健全部》



《空隙1層部》



《空隙2層部》



(a) 加速度波形振幅の変化

(b) 周波数スペクトルの変化

図-7 衝撃弾性波法(B)による供試体試験結果

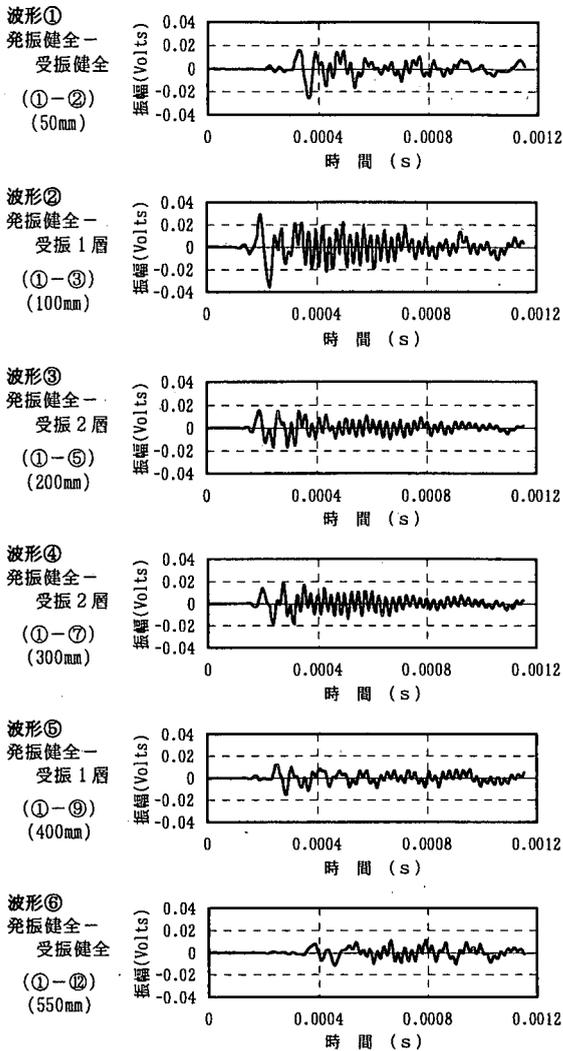
全部および空隙1層部では2700~3000Hzの周波数帯が卓越する。さらに、空隙1層部では、3000Hz周辺の卓越周波数以外に4000~5500Hzの高い周波数帯でもスペクトルが卓越している。また、空隙が2層存在する場合、上記の周波数帯以外に7000~8000Hzの高い周波数帯が卓越する傾向を示している。なお、11000Hz前後の高い周波数帯は健全部においても確認されていることから、考察の対象としない。ここで、卓越周波数の発生理由を検討すると、健全部および空隙1層部に現れている卓越した周波数2700~3000Hzは、衝撃弾性波法(A)における測定結果同様、衝撃波の固有周波数と考えられる。また、空隙1層部に見られる4000~5500Hzの周波数を長さに変換すると、供試体の版厚(0.5m)とほぼ一致する。さらに空隙2層部での7000~8000Hzの高い周波数を長さに変換すると0.23~0.26mとなり、供試体中に設置した空隙位置とほぼ一致することが判る。したがって、衝撃弾性波法(B)における供試体での測定波形から、周波数スペクトルを求めることにより空隙や版厚にほぼ対応した卓越周波数が確認できるといえる。

c) 超音波反射法

図-8は、超音波発振子を健全箇所固定し、受振子を5cm間隔で移動させて測定した結果を抜粋したもの

である。超音波反射法では、超音波発・受振子間が短い場合は表面波が優勢となり、逆に発・受振子間が長い場合は供試体底面を伝播することから、伝播時間が長くなる。したがって、ここでは超音波伝播速度の変化ではなく、超音波伝播波形および周波数スペクトルの相違により、空隙の有無に対する評価を行った。

超音波伝播波形に着目した場合、健全部での波形振幅は発・受振子の間隔に比例して減衰するが(波形①と⑥)、空隙部を挟んだ位置における波形の振幅は大きくなり(波形②)、空隙部でも健全部と同様、発・受振子の間隔に比例して振幅は小さくなる傾向を示している。空隙部では、空隙の影響と考えられる第一波の立ち上がりが大きくなるだけでなく、さらに共鳴波形(波形の繰返し)が存在する。しかし、空隙1層の場合と2層の場合との波形による判別は難しい。周波数スペクトルに着目すると、健全部では全体的に卓越した周波数の大きさが小さいのに対し、空隙部が存在する場合、超音波の固有振動数(40kHz)が明瞭に卓越する傾向にある(図-9参照)。ここで、空隙が1層存在する場合、この超音波の固有振動数以外の供試体の共振周波数と考えられる低い周波数帯でのピークが大きく、また空隙が2層存在する場合は空隙が比較的浅い位置にあり、薄い版厚となることにより超音波固有周波数



超音波伝播波形の変化

図-8 供試体における超音波反射法測定結果

のみが大きく卓越し、1層の場合にみられた低い周波数帯でのピークが小さくなる傾向にある。

超音波反射法では入力は安定しているが、発・受振子間の距離により減衰するため、受振波の大きさをもとに、空隙部あるいは版厚を定量的に評価することは難しい。したがって、空隙部を判定するには、相対的な振幅の大きさを比較することが有効である。

ただし、超音波を用いた場合、表面波の影響が大きく現れるため空隙や版厚の検出が難しい。超音波反射法による伝播波形および周波数スペクトルの変化により空隙の有無の判定を行うには、表面波の影響を取り除くことに加え、相対的な波形振幅の大きさを比較することが必要となる。

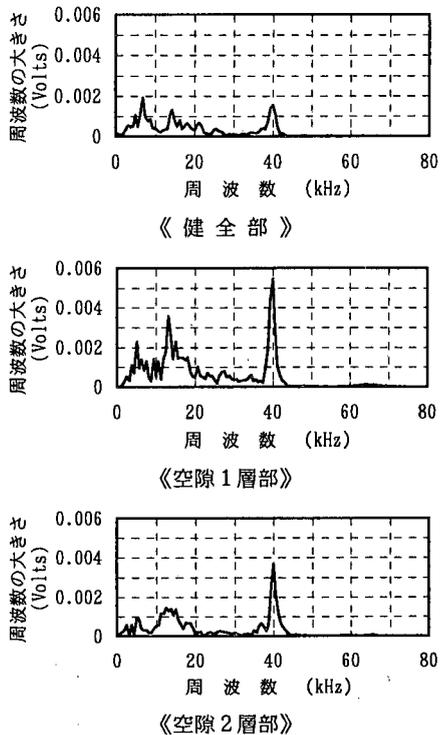


図-9 超音波反射法 周波数スペクトル

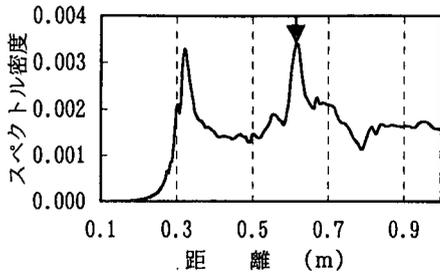
4. 実構造物への適用性の検証

(1) 実構造物における非破壊試験の実施要領

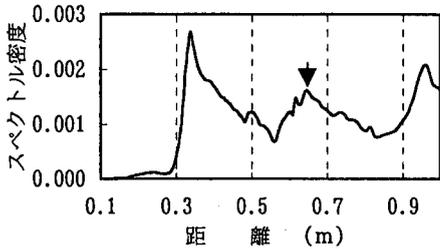
3種の非破壊試験の供試体試験結果から得られた成果を基に、実構造物への適用性について検討を行う。

実構造物に関する調査は、完成系のコンクリート構造物を対象としているため、踏掛版下の空隙検査に関する現地調査は、舗装上面からの調査(図-10参照)、また、トンネル覆工背面の空隙検査に関する現地調査は、覆工コンクリート面から調査を行うこととした(図-11参照)。

舗装上面から踏掛版下の空隙を探查する場合、『舗装面と踏掛版』、『踏掛版と上部路床』の材質の異なる境界面が2層存在する。また、トンネル覆工コンクリート面から空隙を探查する場合においても、『地山と吹付けコンクリート』、『吹付けコンクリートと覆工コンクリート』の2つの境界面が存在する。そこで、これら境界面は、舗装面あるいは覆工コンクリート面上からの空隙探查結果に基づき評価するものとした。



①踏掛版下(64cm付近)でスペクトル密度の卓越が顕著に現れる



②踏掛版下(64cm付近)でスペクトル密度の卓越はみられるが顕著でない

図-14 踏掛版下の空隙調査 衝撃弾性波法(A)調査結果

スペクトルの卓越が確認され、しかも、その傾向は以下の2種類に大別できる。

- ① 踏掛版下(路面より0.64m)でスペクトル密度の卓越が顕著に現れる。
- ② 踏掛版下でスペクトル密度の卓越が現れるが、①ほど顕著ではない。

スペクトルの卓越が顕著に現れる①は、弾性波が踏掛版下面において明瞭に反射していることを示しており、空隙の影響で明瞭な反射波が現れたものと推察される。これは供試体試験と同じ傾向を示しており、1層空隙部と判定される。

また、スペクトルの卓越が顕著でない②も小さいながら、踏掛版底面の厚さを表している。供試体試験と同様、踏掛版が路床と接しているため、弾性波は踏掛版と路床との境界部で一部が透過するため、周波数の卓越が若干不明瞭になったものと考えられ、②は健全部と推察される。

なお、これらスペクトル曲線に共通してみられる0.30~0.35m付近のスペクトルの卓越は、軽量ハンマー(スチールハンマー)打撃による入力波の卓越周波数と舗装部との境界における反射が重なった結果と考えられる。つまり図-14における横軸の距離は、伝播速度を3700m/sとして換算しているため、舗装部を実測した伝播速度2000m/sで換算すると、スペクトルの第1ピークは0.16~0.19mで発生することになり、舗装

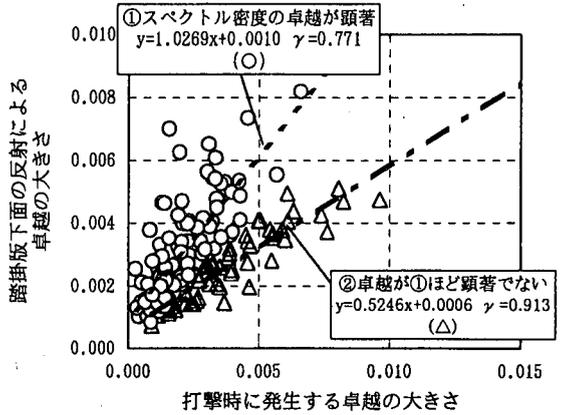


図-15 踏掛版下の空隙調査における衝撃弾性波法(A)による卓越周波数の大きさの比較

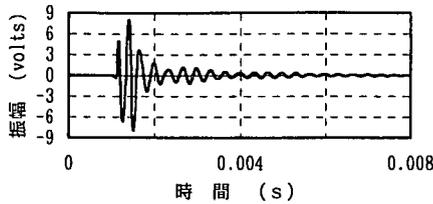
厚とほぼ一致することが判る。このように見掛けの合成伝播速度を3700m/sとしたときの測定値と舗装表面から踏掛版下までの厚さ(0.64m)、ならびに舗装部の伝播速度を2000m/sとしたときの測定値と舗装厚(0.18m)が各々、ほぼ一致していることは踏掛版自体の波動の伝播速度が、材齢の差によるものか供試体よりも速く、4360m/sであると考えられる。

この卓越周波数帯について、打撃による入力波の卓越周波数の大きさと踏掛版下における卓越周波数の大きさとの関係を図-15に示す。健全部と1層空隙部を比較すると、回帰式の勾配は健全部に比べて1層空隙部が大きい。この傾向は供試体試験結果と同様である。供試体結果との勾配の相違は、実構造物が舗装上面からの調査であること、入力用にスチールハンマーを用いていること、およびコンクリートの強度が実構造物の方が大きいこと等が起因しているものと推察される。また、供試体試験結果同様、踏掛版下の空隙調査結果においても相関係数 $\gamma=0.771\sim0.913$ と強い相関関係にある。したがって、実構造物において卓越する周波数の位置(深度)、形状および打撃による卓越周波数の大きさに対する反射波の卓越周波数の大きさの比率を求めることにより、空隙の有無を評価することができるものと判断した。

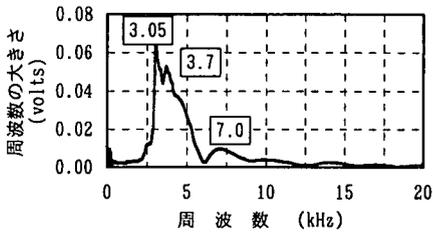
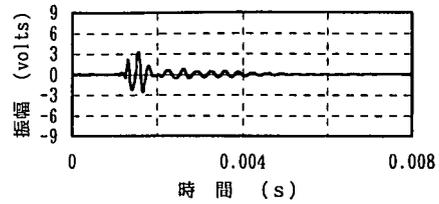
b) 衝撃弾性波法(B)

踏掛版における衝撃弾性波法(B)による調査結果を、図-16に示す。振幅や周波数スペクトルの大きさに差がみられるが、いずれの測点においても3000Hz付近の周波数帯が卓越していることが確認できる。

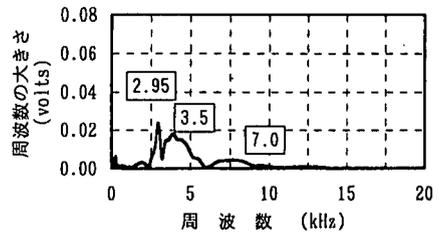
ここで、伝播速度を衝撃弾性波法(A)の分析で設定した見掛けの合成伝播速度3700m/sとして版厚を求めた場合、式(1)より版厚 $L=0.62\text{m}$ となり、ほぼ路面から踏掛版下までの距離と一致する。したがって、この周波数帯は踏掛版下の反射による卓越であるといえる。



《加速度波形》



《周波数スペクトル》

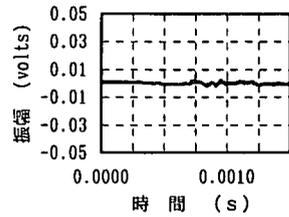
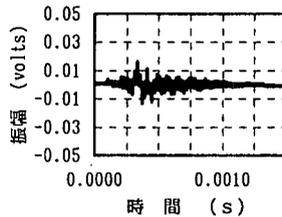
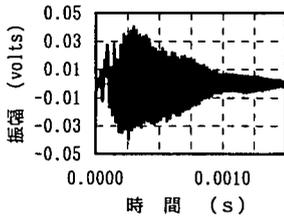


①衝撃弾性波法(A)調査結果において、踏掛版下でスペクトル密度の卓越が顕著に現れる

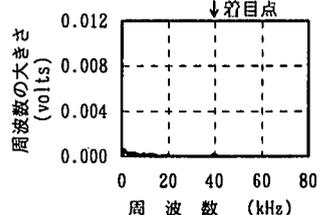
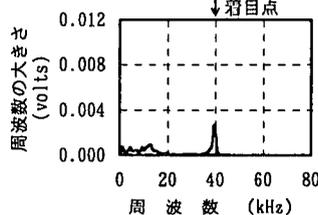
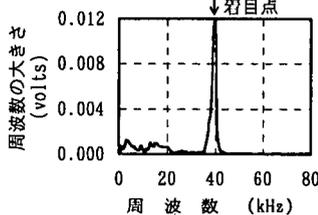
②衝撃弾性波法(A)調査結果において、踏掛版下でスペクトル密度の卓越はみられるが顕著でない

図-16 踏掛版下の空隙調査 衝撃弾性波法(B)調査結果

《超音波透過波形》



《周波数スペクトル》



超音波発・受振子間 0.5m

超音波発・受振子間 1.0m

超音波発・受振子間 2.0m

図-17 踏掛版下の空隙調査 超音波反射法調査結果

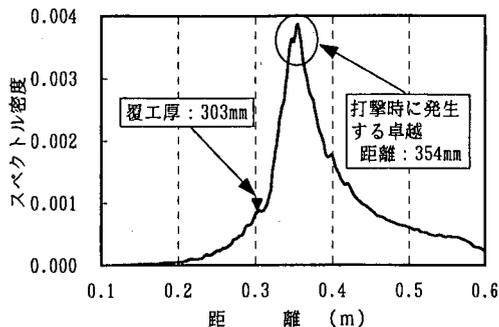
この3000Hz前後の周波数帯に着目し、前述の衝撃弾性波法(A)による調査結果から得られた2分類のうち、①踏掛版下の卓越越が顕著に現れると②卓越はみられるが顕著ではないとを比較した場合、周波数スペクトルにおける卓越の大きさは、空隙が存在すると推定される①の場合の方が大きくなり、衝撃弾性波法(A)の空隙位置における周波数の卓越と同様の傾向を示す。さらに、波形振幅では、空隙が存在すると推定される①の方が、振幅が大きいかつ波形減衰時間が

長くなる傾向にある。

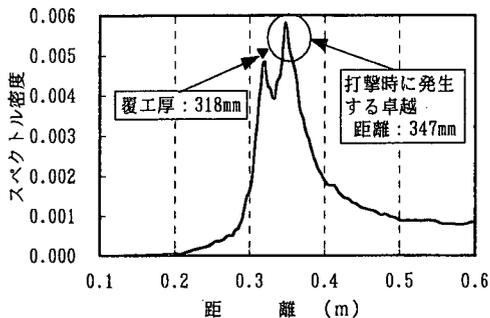
以上のことより、衝撃弾性波法(B)においては、衝撃弾性波における振幅と周波数スペクトルの卓越の大きさや卓越する周波数帯の違いなどから、踏掛版下の空隙の有無に対する推定が可能となる。

c) 超音波反射法

踏掛版下の空隙調査に関する超音波反射法について、超音波透過波形および周波数スペクトルをまとめたものを図-17に示す。超音波の発・受振子間が2.0mを越



(a) 空隙がない場合



(b) 空隙がある場合(10mm)

図-18 空隙の有無による衝撃弾性波(A)の測定波形例

えると超音波の透過が非常に弱くなり、超音波透過波形が乱れるとともに、波形振幅が非常に小さくなり、さらに、透過した超音波固有の卓越周波数(图中、40kHz)が現れなくなる。これは、超音波反射法を舗装上面から行っているため、舗装の影響が大きいものと推察される。コンクリートに比べると舗装は減衰が大きく、舗装上面からの適用は難しいものと言える。

したがって、超音波反射法においては、踏掛版下面の反射を確認することが困難であると言え、空隙の検知には、透過エネルギーを大きくする等の対策が必要であると考えられる。

(3) トンネル覆工背面の空隙調査への適用性の検討

トンネル覆工背面の空隙調査方法としては、覆工背面の空洞の有無が覆工コンクリートの耐荷力やトンネル自体の耐久性に影響を与えることから、ボーリング、超音波法、電磁波法、打撃・打診法が推奨されており、これらの手法により空隙の位置(範囲)および大きさを把握し、対策工を設計する際の情報とすることが必要であるとされている⁸⁾。本稿では適用性確認試験より、トンネル覆工背面の空隙調査に有効と考えられた衝撃弾性波法(A)および(B)の2種類の非破壊調査を用いた。なお、トンネル覆工背面の空隙に関する現地調査は、トンネルクラウン部に設けられた検査孔において、覆工コンクリート背面に空隙が確認されている箇所(空隙幅が5, 10, 15, 30mmの4種類)を対象に実施し、空隙が確認されなかった箇所との比較を行った。

a) 衝撃弾性波法(A)

空隙調査への適用性の検討に際し、対象トンネル覆工コンクリート中の波動伝播速度を推定する。推定方法としてはデータの母数が少ないため、空隙がないと想定される箇所での衝撃弾性波法(A)による実測値(伝播速度を4000m/sとして測定した)の平均値(302mm)が、検査孔において確認された実測寸法(305mm)に整合するように決定するものとした。すなわちデータ分析に

おけるトンネル覆工コンクリート中の波動伝播速度は $c=4000 \times 305/302=4040\text{m/s}$ を用いて、空隙あるいは反射面までの距離の評価を行うこととした。

図-18(a)(b)にトンネル覆工厚が確認されていて、覆工背面に空隙がある場合と無い場合の衝撃弾性波法(A)の実測波形例を示す。これはスチールハンマーを用いて測定した波形である。図から明らかなように、空隙がない箇所での測定波形では、覆工コンクリート厚を示す波形変化は非常に小さいのに対し、空隙がある箇所では明瞭に現れている。これは、覆工コンクリートと吹付けコンクリートの境界に空隙がない場合は、入力された弾性波のほとんどが吹付けコンクリートへと透過するため境界面での反射が小さくなるのに比して、空隙がある場合は逆に境界面でほとんどが反射するために生じるものといえる。また、打撃固有スペクトルは0.35m付近に見られ、周波数に換算すると約5800Hzとなり、前述した供試体によるスチールハンマー使用時における周波数(5300Hz)と概ね一致しており、スチールハンマーによる衝撃波の固有周波数を表していることが判る。

なお、トンネル覆工部においては防水シートの影響が懸念されるが、空隙のない箇所での測定を行った結果、覆工コンクリート厚さと吹付けコンクリート厚さを示すスペクトル密度の卓越を確認することができ、このことより、打撃エネルギーは防水シートを通過し、吹付けコンクリートへも透過しているといえ、当手法においては防水シートの影響をほとんど受けないものと考えられる。

次に、空隙の大きさと測定波形の変化について考察する。図-19は、各空隙の大きさ毎に測定した結果を打撃固有スペクトルの大きさと覆工厚を示す卓越スペクトルの大きさの関係を示している。回帰直線の勾配に着目すると、空隙がない箇所では勾配は0.225と小さく、空隙がある箇所では0.543~1.00と大きくなっており、空隙が大きくなるほど両者の関係を示す回帰直

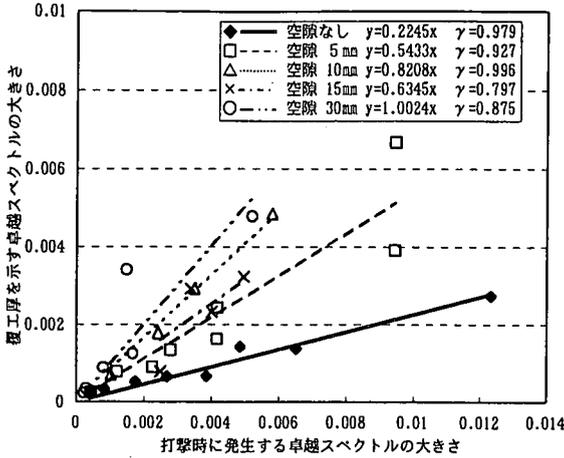


図-19 打撃固有スペクトルと覆工厚卓越スペクトルの関係

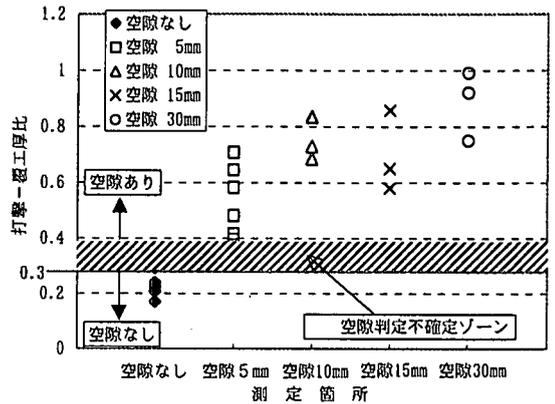


図-20 空隙の有無と覆工厚/打撃比の関係

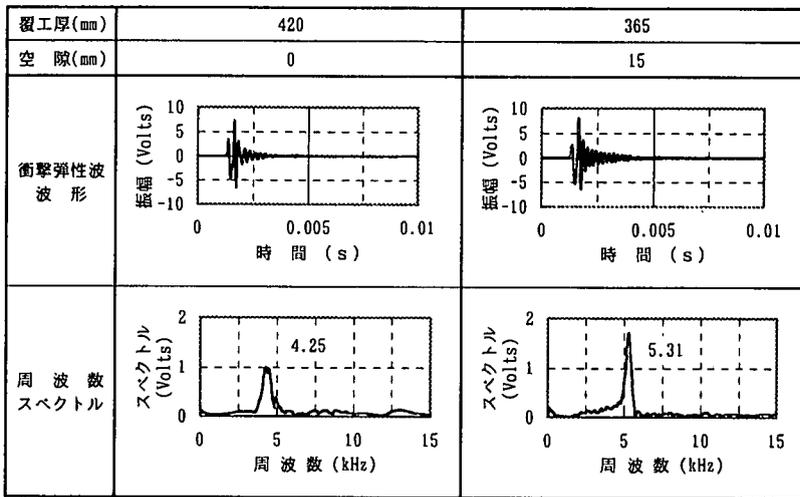


図-21 空隙の有無による衝撃弾性波法(B)測定結果の比較

線の勾配が大きくなる傾向がみられる。また、相関係数は $\gamma=0.80\sim 1.00$ と強い相関が得られていることがわかる。ここで、打撃固有スペクトルの大きさで測定データを除して正規化し、空隙の大きさと覆工厚を示すスペクトルの大きさを比較した結果を、図-20に示す。図において、縦軸は覆工厚を示す卓越スペクトルの大きさと打撃固有スペクトルの大きさの比(以下、覆工厚/打撃比と呼ぶ)を表し、横軸は空隙の大きさである。

図に示すように覆工厚/打撃比は、多少のバラツキは見られるものの空隙がある全ての値が空隙のない場合の値を上回り、大きくなる傾向が確認できる。また、覆工厚/打撃比が0.3未満では空隙なしと推定でき、逆に0.4以上では空隙ありと推定することが可能といえる。この値は、図-6に示した供試体での空隙の有無における直線の勾配(健全部 0.185, 空隙部 0.451)と

符合している。したがって、空隙の有無を判定する境界線は0.3~0.4の範囲にあることが明らかとなった。ただし、これはスチールハンマーを用いた場合の指標であり、打撃固有スペクトルが使用するハンマーで変化することを考慮すると、プラスチックハンマーを用いる場合には別途検討が必要であると言える。さらに、覆工厚/打撃比が0.3~0.4の範囲で、明確に空隙ありと判定することは、これらのデータだけでは難しく、現状では不確定な範囲といえる。また、弾性波エネルギーの空隙の存在による反射に伴うスペクトル密度の卓越が、空隙厚が大きくなるにしたがい明瞭に出現する傾向にあるといえるが、今回は空隙厚5mm以上を対象としており、5mm未満の微薄な空隙に対する評価を行うまでには至っていない。そこで、今後さらにデータの収集を図ることにより、空隙の有無の境界線を明確にし、空隙判定基準を確立することを今後の検討課

題としたい。

b) 衝撃弾性波法(B)

トンネル覆工背面における空隙確認を目的とした衝撃弾性波法(B)の測定結果から、空隙の有無による測定波形の代表例を図-21に示す。上段の衝撃弾性波の波形では、供試体での測定結果同様、振幅等に明瞭な差違はみられない。また、振幅の減衰に関しては空隙がある場合と無い場合で異なり、空隙がある場合の方が減衰に要する時間が長くなる傾向がみられる。これは空隙がある場合は、空隙面で衝撃波がほとんど反射するのに対し、空隙がない場合は衝撃波の一部が透過することにより減衰が速くなるものと推察される。一方、周波数スペクトルに着目すると、空隙がある場合の方がスペクトルは高くかつシャープに卓越していることが判る。また、3(3)b)と同様に各々の卓越周波数から反射位置を求めると、空隙がない場合覆工厚420mmに対して475mm、空隙がある場合で覆工厚365mmに対して380mmと概ね一致した結果が得られている。なお、波動伝播速度は衝撃弾性波法(A)と同様、4040m/sを用いた。

以上、トンネル覆工背面の空隙調査に衝撃弾性波法(B)を用いた場合、加速度波形の減衰時間や周波数スペクトルの卓越の大きさが若干異なる傾向がみられた。すなわち、踏掛版に関する調査結果や供試体試験結果と同様に、トンネル覆工背面の空隙調査に関しても空隙の有無に対する波形振幅の減衰時間や卓越スペクトルの形状に関する定量的な評価が必要となる。

ただし、衝撃弾性波法(B)の測定波形においては、衝撃波の固有周波数のスペクトルが明確に現れていない。これは、衝撃波の卓越周波数が、版厚として卓越するスペクトルと重複していることが考えられる。衝撃弾性波法(B)においては、周波数スペクトルの卓越傾向により空隙の有無の評価が可能であるが、衝撃波による卓越周波数を分離した評価法は今後の課題である。

5. まとめ

本論文は、踏掛版下およびトンネル覆工背面の空隙調査手法の確立を目的として、衝撃弾性波や超音波を用いた非破壊試験に着目し、空隙検査手法としての適用性について検討を加えたものである。

各非破壊調査手法の検討の結果、明らかとなった知見を以下にまとめる。

①踏掛版下の空隙検査手法への適用性の評価

・衝撃弾性波法(A)は、舗装部と踏掛版との合成伝播速度を設定することにより、舗装上より踏掛版

下面までの総厚が評価できる。これに伴い、踏掛版下における空隙の有無など境界条件の相違により、反射波のスペクトルの卓越の仕方が異なることから、空隙に対する評価が可能である。

・衝撃弾性波法(B)も衝撃弾性波法(A)と同様、踏掛版下の境界条件による卓越周波数の大きさと衝撃弾性波の振幅に着目することにより、空隙の有無の推定が可能となる。

・超音波反射法の場合、超音波パルスの周波数が高いため、舗装上面からでは減衰や散乱により、踏掛版底面や空隙部の反射波を検出することは難しいことが判明した。今後、入力エネルギーや周波数の検討が必要である。

②トンネル覆工背面の空隙検査手法への適用性評価

・衝撃弾性波法(A)では、覆工コンクリート厚が評価できるとともに、打撃固有スペクトルの大きさと境界部における反射による卓越周波数スペクトルの大きさととの比、覆工厚/打撃比に基づき空隙の有無が判定可能となる有効な結果が得られた。

すなわち、覆工厚/打撃比が

0.3未満では「空隙なし」

0.4以上では「空隙あり」

0.3~0.4は「空隙の可能性あり」

この判定は、供試体および実構造物の両者において確認されたものであり、一般的なコンクリート構造物にも適用できることを示唆している。ただし、これはスチールハンマーを用いた場合の適用であり、プラスチックハンマーを用いる場合には別途検討が必要となる。

・衝撃弾性波法(B)による空隙調査は、覆工部背面と吹付部背面の各境界層での卓越周波数のピークが得られており、衝撃弾性波の振幅や周波数スペクトルの卓越の大きさが異なる傾向を示すことが確認された。これは、空隙の有無の評価の可能性を示唆しているものの、定量的な評価が可能な状態までには至っていない。

③3手法の適用性の評価

・衝撃弾性波法(A)は、舗装上面からの踏掛版下における空隙評価やトンネル覆工部背面の空隙検査手法として適用可能である。特にトンネル覆工背面の空隙調査に関しては、空隙評価としての指標が提案できた。ただし、判定基準を確立するにはデータとして乏しく、指標として不確定な範囲があることや、5mm未満の微薄な空隙に対する評価を行うまでには至っていないことを考慮すると、今後のデータの収集が必要である。

・衝撃弾性波法(B)も同様に、適用の可能性を示唆しているが定量的な評価を行うには、今後のデー

データの収集が必要である。

・超音波反射法により舗装上面からの評価を行う場合、舗装など複数の伝播速度の異なる層間により超音波透過波形が乱れ、現在のところ空隙検査手法としての適用は困難である。

以上、衝撃弾性波法(A)および(B)による調査手法では、卓越周波数(スペクトル密度)の違いや加速度波形の変化から空隙検査手法として適用可能であることが確認できた。現在、コンクリート構造物の空隙評価手段として実務レベルで用いられているハンマーを用いた“たたき点検”に代わり、コンクリートの空隙をより迅速に、かつ確実に検査できる手法として、本調査手法は有効である。

今後これらの調査法ならびに空隙評価の判定基準の確立を図るために、さらなるデータの蓄積および検討・評価を加えるとともに、実構造物における調査精度の検証を行うことが必要である。それにより、空隙調査手法としての適用性の拡大が図れるものと考えられる。

6: あとがき

衝撃弾性波あるいは超音波を用いた非破壊検査手法が、空隙検査手法として実構造物への適用性が高いことが確認できた。特に、衝撃弾性波法(A)に関しては卓越するスペクトル密度をパラメータとする指標から空隙の有無が判定可能となる有効な結果を得ることができた。このような非破壊試験の調査精度を向上させ、適用範囲を広げるためには、実構造物におけるデータに基づき、キャリブレーションを行うことが必要不可欠である。したがって、今後、さらに実構造物におけ

るデータの蓄積、分析・評価ならびに判定精度の検証を行っていきたい。

一方、ハード面で見れば、測定精度を向上させるには、入力条件を一定にすること、あるいは入力条件を定量的に把握することにより解析精度を高めることが重要である。そこで、打撃力の一定化と打撃力を定量的に計測するシステムの研究・開発が望まれる。

参考文献

- 1) 日本道路公団：土木構造物の補修事例集, pp.27-33, 1987.
- 2) 菊池保孝, 小野田滋, 前川迪弘, 島貞美樹, 佐野力：熱赤外線映像によるトンネル変状調査, 土木学会第45回年次学術講演会, 1990.
- 3) 建設省土木研究所 材料施工部施工研究室：地中レーダの空洞探査への適用性とその評価に関する研究, pp.2-25, 1998.
- 4) 森芳徳, 大下武志, 市村靖光：レーダによる地中構造物周辺地盤の空洞探査への適用性, 土木技術資料, Vol.41, No.2, pp.20-25, 1999.
- 5) 今田和夫, 坂巻広治, 仲田慶正：非破壊による床版損傷調査手法について, 土木学会第51回年次学術講演会, 1996.
- 6) (社)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, 養賢堂, pp.123-139, 1994.
- 7) 林川俊郎, 渡辺 昇, 井上稔康：コンクリート合成鋼床版橋の積雪時における現場振動実験とその注意点について, 第2回橋梁振動に関するコロキウム, pp.155-158, 1989.
- 8) 日本道路公団試験研究所；試験研究所技術資料 第356号 トンネル変状調査マニュアル, pp.43-44, 1998.

(2000.1.14 受付)

APPLICABILITY OF NONDESTRUCTIVE TEST USING REFLECTION WAVE FOR THE VOID-INVESTIGATION OF CONCRETE STRUCTURES

Yoshiyuki MOMIYAMA, Kenji KUMANO, Toyoaki MIYAGAWA, Katsuyoshi NOMURA
and Kazuo IMADA

The nondestructive tests for concrete structures have been conducted for the purpose of quality control and to estimate damages. However, there doesn't exist any precise standards for judgement and estimation of damages. Early establishment of nondestructive tests which are applicable for concrete structures is required from the point of view of the preventive maintenance. Therefore, the nondestructive tests using the impact elastic wave or the ultrasonic pulse wave were applied for the void investigation in concrete structures. Based on the results of tests in model slabs and in real concrete slabs of road structure and tunnel lining, it was confirmed that the nondestructive tests are applicable for the void investigation by observing the wave and analyzing the spectrum of dominant frequency.