論文　道路橋 RC 床版の水平ひび割れ面の形状が衝撃弾性波法により得られる周波数スペクトルに与える影響

内田　慎哉[*1]・鎌田　敏郎[*2]・前　裕史[*3]・山本　健太[*4]

要旨：本研究では，道路橋 RC 床版の内部で発生する水平ひび割れ面の凹凸形状を模擬した RC 供試体を作製し，凹凸の幅や高さの違いが衝撃弾性波法により得られる周波数スペクトルに与える影響についての検討を行った。その結果，入力する弾性波の周波数や凹凸の幅や高さにより，凹凸部で波の拡散反射が生じ，得られた周波数スペクトルにおいて，供試体上面と底面の多重反射に相当する縦波共振周波数が減衰し，その他の周波数範囲の成分が出現する現象を把握した。周波数スペクトルがこの特徴を有する場合でも，マルチテーパ法により，多重反射相当の縦波共振周波数を明瞭に生成させることが可能であることを明らかにした。

キーワード：道路橋，RC 床版，衝撃弾性波法，水平ひび割れ面の凹凸，高速フーリエ変換，マルチテーパ法

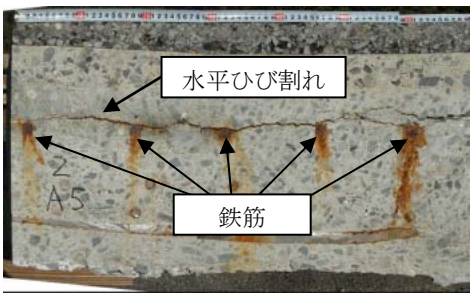
1. はじめに

近年，供用中の道路橋 RC 床版において，床版の表面からは確認することが難しい水平ひび割れ（**写真－1** 参照）が発生する損傷事例が顕在化している。

著者らは，この水平ひび割れを衝撃弾性波法により検知する手法についての研究を行っている。これまでに，「水平ひび割れ」を「表面がフラットな発砲スチロール（人工欠陥）」により模擬した供試体を作製し，衝撃弾性波法により得られた周波数スペクトルのピークから人工欠陥を評価する方法についての検討を行ってきた[1)]。しかしながら，床版に発生する実際の水平ひび割れは，**写真－1** に示すように，ひび割れ面が凹凸しているケースがほとんどである。水平ひび割れ面に凹凸がある場合，ひび割れ面で反射する弾性波は，凹凸が無い場合における波の反射（これ以降，正反射と呼ぶ）とは異なる反射形態（本研究では，便宜上，拡散反射と定義する）となる。このような拡散反射は，周波数スペクトル上において，水平ひび割れに相当するピーク周波数よりも高い周波数領域の成分を出現させる可能性がある。そのため，ピーク値のみを頼りにして水平ひび割れを評価することが困難になると考えられる。

そこで，本研究では，道路橋 RC 床版の内部で発生する水平ひび割れ面の凹凸形状を模擬した RC 供試体を作製し，凹凸の形状や寸法の違いが衝撃弾性波法により得られる周波数スペクトルに与える影響についての検討を実験および解析により行った。

2. 衝撃弾性波法による水平ひび割れまでの深さ評価の原理



写真－1　水平ひび割れの発生状況

2.1 ひび割れまでの深さ評価の原理

衝撃弾性波法による RC 床版の内部に発生する水平ひび割れまでの深さ評価の原理を**図－1** に示す。この手法は，鋼球を用いて床版表面を打撃することにより床版内部に弾性波を伝播させ，床版表面と水平ひび割れで多重反射する波を，表面に設置したセンサにより受信し，この受信波に対して高速フーリエ変換することにより得られる周波数スペクトル上のピーク周波数（**図－1** 中の $f_{ひび割れ}$）に基づき，水平ひび割れまでの深さ：d を評価する手法である。なお，図中の床版厚さおよび水平ひび割れに相当する理論上の縦波共振周波数は，以下の式[2)]により算出される。

$$f_{厚さ} = C_p / 2T \tag{1}$$

$$f_{ひび割れ} = C_p / 2d \tag{2}$$

ここで，$f_{厚さ}$：床版厚さに相当する縦波共振周波数，$f_{ひび割れ}$：水平ひび割れに相当する縦波共振周波数，C_p：コンクリート中を伝播する波の速度，T：床版厚さ，d：水平ひび割れまでの深さである。

床版の厚さや水平ひび割れまでの深さのいずれの場

*1 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻(日本学術振興会 特別研究員 PD)　博士(工学)　(正会員)
*2 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻教授　博士(工学)　(正会員)
*3 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻　(正会員)
*4 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻　(正会員)

合においても，本手法は，床版表面と反射源との多重反射に相当する縦波共振周波数に着目したものである。そのため，この手法では，如何にしてこの縦波共振周波数を出現させ，またそれを如何にして抽出するかが問題となる。

2.2 入力する弾性波の周波数と波長および鋼球直径との関係

打撃によって生じる弾性波の周波数は，使用する鋼球の直径に影響を受けることが知られている。Sansalone らが定義した関係式[2]を以下に示す。

$$f_{max} = 291/D \tag{3}$$

ここで，f_{max}：入力される弾性波の上限周波数，D：鋼球直径である。

入力する弾性波の波長の最小値は，上限周波数：f_{max} とコンクリート中を伝播する波の速度：C_p から，以下の関係式により求めることができる。

$$\lambda = C_p / f_{max} \tag{4}$$

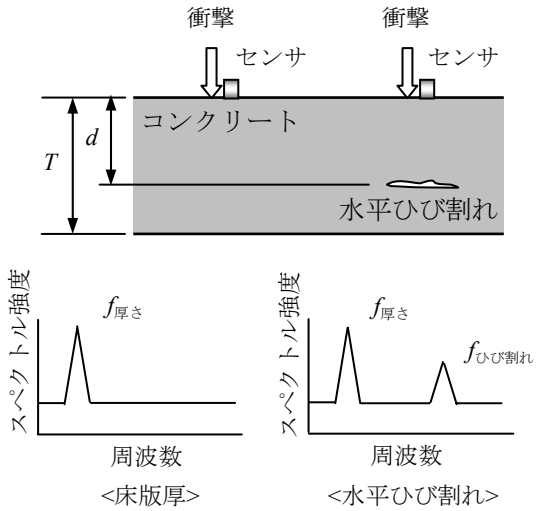
ここで，λ：入力される弾性波の上限周波数に対応する波長の最小値である。

上記式(3)および式(4)を用いて，鋼球直径から計算される上限周波数および波長の計算結果を**表－1** にまとめて示す。なお，表に示す鋼球直径は，本実験で使用したものである。

3. 実験概要

3.1 供試体

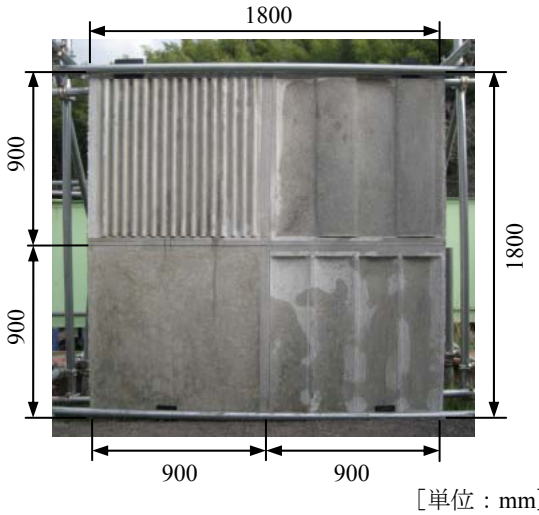
供試体は，側面における弾性波の反射の影響を極力小さくするため，長さ（1800mm）と幅（1800mm）を十分に大きくした。一方，供試体の高さは，既往の研究[2]を参考に決定した。すなわち，多重反射による縦波共振周波数を明瞭に発現させるためには，供試体の高さは長さおよび幅に対して 1/5，あるいはそれよりも小さくする必要がある。この成果に基づき，各供試体の平均的な高さは，200mm に設定した。このような寸法の供試体を 2 体作製した。その一例を**写真－2** に示す。各供試体の一表面（1800mm×1800mm の一面）には，4 ケースの異なる凹凸形状を設けている。1 ケースあたりのコンクリート表面での寸法は，900mm×900mm である。供試体を 2 体作製しているため，凹凸形状は合計で 8 ケースとなるが，本研究で対象とした凹凸形状は，**図－2** に示す 3 ケースである。各ケースにおける凹部および凸部の幅：a（**図－2** 参照）は，道路橋 RC 床版で発生する実際の水平ひび割れの形状に基づき決定した。すなわち，**写真－1** を参考にすれば，水平ひび割れの形状は，鉄筋の間隔ごとに，凹部と凸部を繰り返しているように見える。鉄筋の間隔は，道路橋示方書[3]に 100～300mm と規定されているため，凹部および凸部の幅：a は 100mm とした。



図－1　衝撃弾性波法による水平ひび割れの評価原理

表－1　鋼球直径から計算される弾性波の上限周波数および波長

鋼球直径：D（mm）	3.2	9.6	11.0	12.8	19.1
上限周波数：f_{max}（kHz）	90.8	30.3	26.4	22.7	15.2
波長：λ（mm）	42.9	128.8	147.6	171.7	210.6



写真－2　供試体概要

一方，凹凸部の高さ：b（**図－2** 参照）は 15mm とした。これをケース A と呼ぶ。続いて，ケース B では，ひび割れは骨材を迂回するように進展すると考え，骨材の最大寸法を a とした。骨材の最大寸法は，道路橋示方書[3]に従って 25mm（$=a$）とした。凹凸部の高さ：b は 12.5mm である。また，比較用に，凹凸がないケース C も併せて設けた。

3.2 衝撃弾性波法による計測

写真－3 に衝撃弾性波法による計測状況を示す。弾性波の入力および受信位置は，いずれのケースにおいても，凹凸を設けていないコンクリート表面の中央部で行った。弾性波の入力には直径の異なる 5 種類の鋼球（3.2，9.6，11.0，12.8 および 19.1mm）を使用した。

弾性波の受信には，0.003～30kHz の間でフラットな応答感度を有する加速度センサを使用した。センサで受信した信号は，波形収集装置に記録した。記録した波形に対して，高速フーリエ変換（FFT）を行い，周波数スペクトルを算出し，波形収集装置に波形とともに記録した。

コンクリート中を伝播する波の速度は，凹凸面のないケース C において，衝撃弾性波法によって得られた周波数スペクトル上のピークから算出した。波の速度は，複数箇所で算出した値を平均して，3936m/s とした。

3.3 供試体の凹凸寸法および入力する弾性波の波長から推定される拡散反射の有無

凹凸部において波が拡散反射する条件は，まず，入力される弾性波の波長: λ が，凹部あるいは凸部の幅: a（**図－2** 参照）よりも小さい必要がある。この条件式を以下に示す。

$$\pi a/2 > \lambda \tag{5}$$

さらに，凹凸部の幅：a に対して高さ：b が 15%以上大きくなければならない。

$$b/a > 0.15 \tag{6}$$

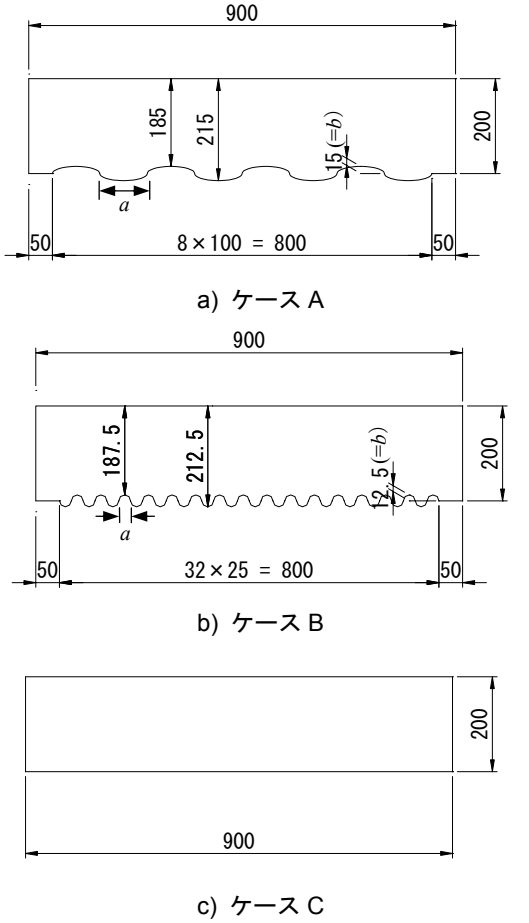
上記式(5)および式(6)の両条件を満足する場合に，波は拡散反射する。

表－2 に，使用した鋼球直径から計算される上限周波数および波長（式(3)および式(4)参照）と各ケースでの拡散反射の有無の関係を示す。表における○印は，拡散反射が生じる場合であり，×印は拡散反射が生じないことを示している。

4. 解析概要

ケース A および C を対象に，3 次元動的応答解析を行った。ここでの解析の目的は，水平ひび割れ面の凹凸による波の反射状況を確認することである。そのため，解析モデル側面からの波の反射の影響を考慮する必要がない。これより，モデルの寸法は，供試体の各ケースの寸法と同じく 900mm×900mm×200mm とした。要素には 8 節点ソリッドを使用した。要素の代表長さは，ケース A で 10.75mm，ケース C で 10.00mm である。ケース C を想定した解析モデルを**図－3** に示す。モデルの支持は，**図－3** に示す 900mm×200mm（図中の点線部分）の 1 面とした。支持面の境界条件は，全ての節点に対して，全方向の変位を固定した。

衝撃荷重は，**図－4** に示す波形を入力した。図中に示す荷重の継続時間（47.3μs）および最大荷重（486.7kN）は，それぞれ既往の研究 [2), 5)] を参考に，鋼球直径が 11.0mm として算出した値である。荷重の入力位置は，**図－3** に示すモデル中央の 1 接点とした。出力位置は，入力位置より支持面側へ 50mm 移動した点である。なお，モデルの材料定数は，コンクリートの物性値として，密度：2.2g/cm^3，ポアソン比：0.2，弾性係数：30GPa を与えた。



［単位：mm］

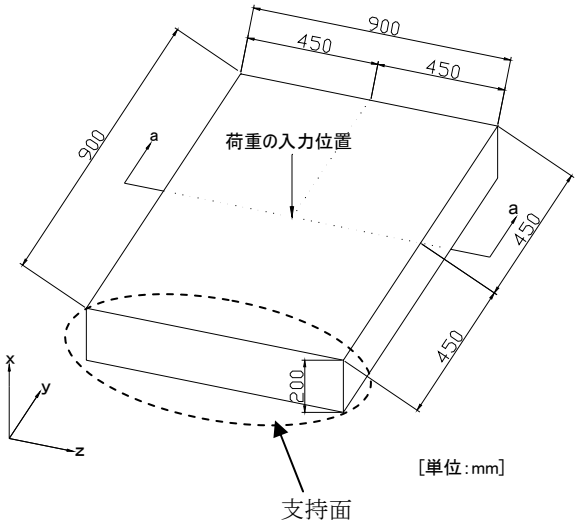
図－2　各ケースの断面図

写真－3　衝撃弾性波法の計測状況

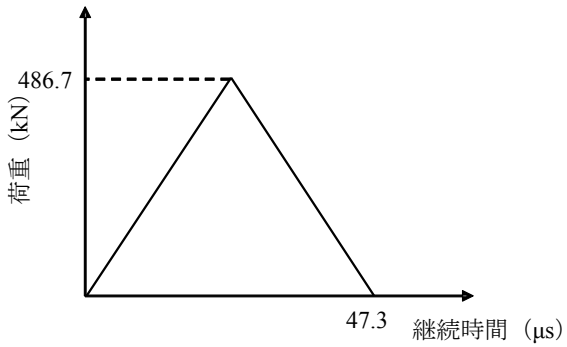
表－2　使用した鋼球直径から計算される弾性波の上限周波数および波長と各ケースでの拡散反射の有無の関係

鋼球直径：D（mm）	3.2	9.6	11.0	12.8	19.1
上限周波数：f_{max}（kHz）	90.8	30.3	26.4	22.7	15.2
波長：λ（mm）	42.9	128.8	147.6	171.7	210.6
ケース A	－	－	○	×	×
ケース B	×	×	－	－	－
ケース C	×	×	×	×	×

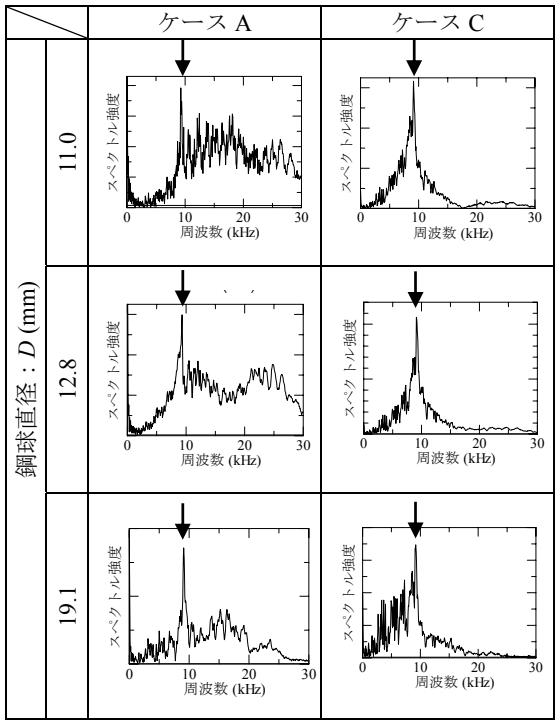
○：拡散反射が生じる，×：拡散反射は生じない，
－：未計測，



図－3　ケース C の解析モデル



図－4　入力波形



図－5　ケースＡおよびケースＣでの周波数スペクトル

5. 結果および考察

5.1 実験で得られた周波数スペクトル

図－5 に，ケース A で得られた周波数スペクトルを鋼球直径ごとに示す。図中には，凹凸が無いケース C での周波数スペクトルも併せて示している。また，供試体厚さに相当する縦波共振周波数：$f_{厚さ}$ を矢印で図中に示している。ケース A に着目すると，鋼球直径が 19.1mm の場合は，$f_{厚さ}$ の位置に明瞭なピークを確認することができる。しかしながら，鋼球直径が小さくなると，$f_{厚さ}$ が減衰し，それよりも高い周波数領域の成分が相対的に出現する傾向を示した。これに対して，ケース C では，いずれの鋼球直径の場合においても，$f_{厚さ}$ の近傍のみにピークが出現している。ケース A と C とを比較すると，鋼球直径が 19.1mm では周波数スペクトルのピーク位置や分布形状はほぼ同じであるものの，11.0 および 12.8mm では大きくことなっている。これより，拡散反射か正反射かの境界は，鋼球直径 12.8 と 19.1mm との間にあるものと考察できる。そこで，拡散反射が生じる鋼球直径について検討するため，**表－2** に示す鋼球直径と拡散反射の有無との関係を参照する。表によれば，理論的には鋼球直径が 11.0mm 以下の場合に波は拡散反射する。したがって，拡散反射により周波数スペクトルが変化する鋼球径は，理論上の鋼球直径と異なる結果となった。通常，入力された弾性波は，コンクリート中の骨材などにより散乱や反射し，伝播過程で波長は変化する。これが，実験と理論値との差違を生じさせたと考えられる。

以上のことから，入力されていると考えられる弾性波の波長，すなわち，鋼球直径の大きさによっては，凹凸部により波が拡散反射し，周波数スペクトルの分布形状に影響を及ぼすことが明らかとなった。したがって，道路橋 RC 床版において発生した水平ひび割れの形状や衝撃弾性波法によって使用する鋼球の直径によっては，多

重反射に伴うピーク周波数を明瞭に出現させることが困難な場合があることを明らにした。

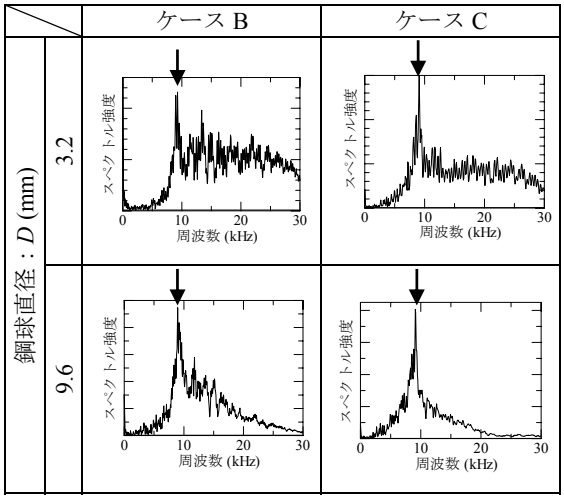
続いて，**図－6** に，ケース B および C での周波数スペクトルを，鋼球直径ごとに示す。図には，供試体厚さに相当する縦波共振周波数：$f_{厚さ}$ を矢印で示している。鋼球直径ごとに各ケースの周波数スペクトルを比較すると，$f_{厚さ}$ の位置や分布形状は，いずれもほぼ同じであることがわかる。ケース B の条件では，理論上，拡散反射が生じないため，ケース B と C で得られた両者の周波数スペクトルは類似したものと考察できる。これより，骨材を迂回して進展する水平ひび割れを対象にした場合では，拡散反射の影響は極めて小さいと考えられる。

5.2 解析による水平ひび割れ面における波の反射状況の確認

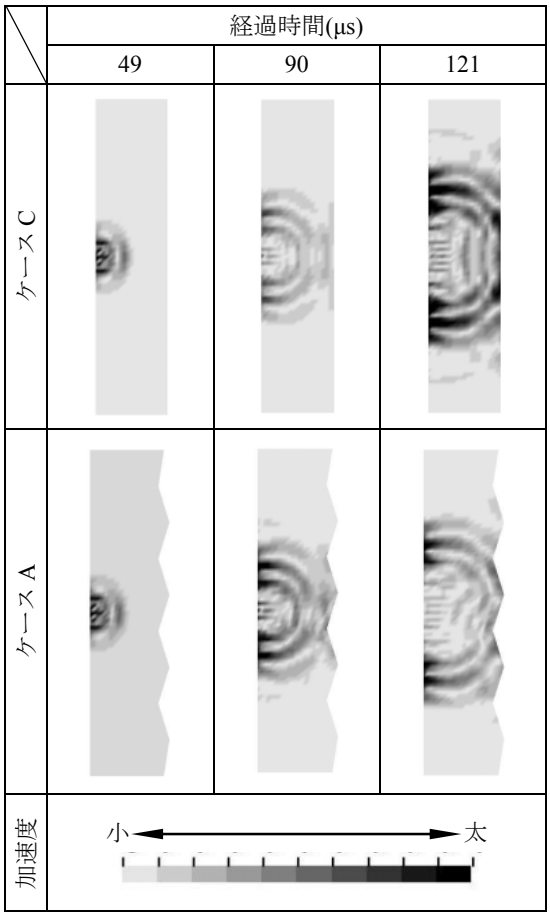
図－7 に，ケース A および C をモデル化した解析における鋼球直径が 11.0mm での波の伝播状況をそれぞれ示す。ここでは，衝撃入力位置の断面（**図－3** 中 a-a 断面）における，49，90 および 121μs 経過した時点での加速度分布を，コンター図として表している。ケース C では，コンクリート中を球面波として伝播し（経過時間：49μs），90μs 後には底面で正反射，その後，正反射した波が球面波として衝撃入力面側へ伝播（経過時間：121μs）している。これに対して，ケース A は，底面において反射した波が同心円上に伝播せず，凹凸部によって散乱した後，波が干渉しあっていることがわかる。したがって，弾性波伝播シミュレーション解析の結果，ケース A では，拡散反射していると考えられる。

5.3 マルチテーパ法による周波数スペクトルの改善

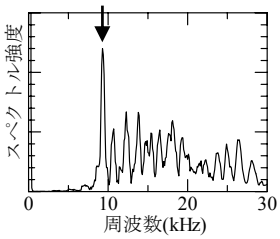
6.1 から明らかな通り，道路橋 RC 床版で発生する水平ひび割れを衝撃弾性波法により得られた周波数スペクトル上のピークから評価することを想定した場合，水平ひび割れの形状や使用する鋼球によっては，ひび割れ面の凹凸の影響により，ひび割れを検知できない可能性がある。そこで，ここでは，**図－5** において，凹凸の影響があると考えられる鋼球直径 11.0mm の時刻歴応答波形に対してマルチテーパ法（以降，MTM）を適用し，周波数スペクトルの改善を試みた。なお，MTM は，サンプリング時間ごとに sinc 関数で近似した箱型ウィンドウを介して，バンド幅ごとにスペクトルを推定する手法である。そのため，FFT と比較して，スペクトル推定における分散の影響をより減少させることが可能な周波数分析手法[6] である。**図－8** に MTM により得られた周波数スペクトルを示す。図中には，供試体厚さに相当する縦波共振周波数：$f_{厚さ}$ を矢印で示している。FFT による周波数スペクトル（**図－5** 参照）と比較すると，およそ 10～30kHz の周波数成分が小さくなり，供試体表面と底面での多重反射に相当する縦波共振周波数が出現してい



図－6　ケース B およびケース C での周波数スペクトル



図－7　波の伝播状況



図－8　MTM による周波数スペクトル

ることがわかる。これより，MTM は，凹凸の影響に伴う波の拡散反射の影響を小さくできることが明らかとなった。

6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 道路橋 RC 床版に発生する水平ひび割れの凹凸を模擬した供試体において，衝撃弾性波法を行った結果，入力する弾性波の周波数や凹凸の幅や高さにより，得られた周波数スペクトルに拡散反射の影響が見られる場合がある。

(2) 波の拡散反射により，周波数スペクトルは，供試体表面と底面での多重反射に相当する縦波共振周波数が減衰し，共振周波数よりも高い周波数領域の成分が出現する傾向にあることがわかった。

(3) 高速フーリエ変換により得られた周波数スペクトルで波の拡散反射の影響が確認できる場合においても，得られた波形に対してマルチテーパ法による周波数解析を行うことにより，供試体上面と反射源との間で多重反射する波の成分を抽出することが可能である。

謝辞

本研究は，国土交通省委託研究事業 新道路技術会議技術研究開発プロジェクト 「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の援助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表します。また，衝撃弾性波法の計測およびデータ整理にあたっては，大阪大学大学院 社会基盤設計学領域の中山和也君にご協力を頂きました。

参考文献

1) たとえば，内田慎哉，鎌田敏郎，藤原規雄，玉越隆史：道路橋鉄筋コンクリート床版の水平ひび割れの検出における弾性波法の適用，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.8，pp.27-34，2008

2) Sansalone, M. and Streett, W. B. : Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.159-166, 1997

3) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書（I 共通編・III コンクリート橋編）・同解説，2003

4) たとえば，石井聖光：建築音響と設計施工，オーム社，pp.72，1960

5) 白鳥雅也，桧貝勇，岡村雄樹：軽い衝撃荷重を受けるコンクリート部材の応答解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.679-684，1992

6) Percival, D. B., and Walden, A. T.: Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques, Cambridge University Press, 1993