

論文

[1081] 弾性波法を適用したコンクリート内部の空隙および鉄筋位置の推定に関する解析的研究

正会員 ○ 山田 和夫 (愛知工業大学建築学科)

正会員 山本 正岳 (愛知工業大学大学院)

1. はじめに

筆者らは、従来からコンクリート中を伝播し検出された弾性波の周波数特性に着目したコンクリートの非破壊試験方法の確立を目的として一連の実験的研究[1-6]を行ってきたが、本論文はこれらの実験結果を理論的な観点から考察することを目的として行った解析的研究の一成果である。筆者らは、先に差分法を適用した3次元波動伝播解析プログラムを開発し、その妥当性および適用性を確認した[7]が、このプログラムには、コンピュータの占有メモリーを少なくできるという利点がある反面、解析モデルの境界条件の取扱いが煩雑で複雑な解析モデルに適用する際の制約が多いという欠点があった。そのため、本報では境界条件の取扱いが比較的簡単な2次元有限要素法を適用した弾性波動伝播解析および周波数応答解析を実施し、コンクリート内部に存在する空隙および鉄筋と検出弾性波の周波数特性との関係について解析的に検討を行った。

2. 解析方法

2.1 解析の概要

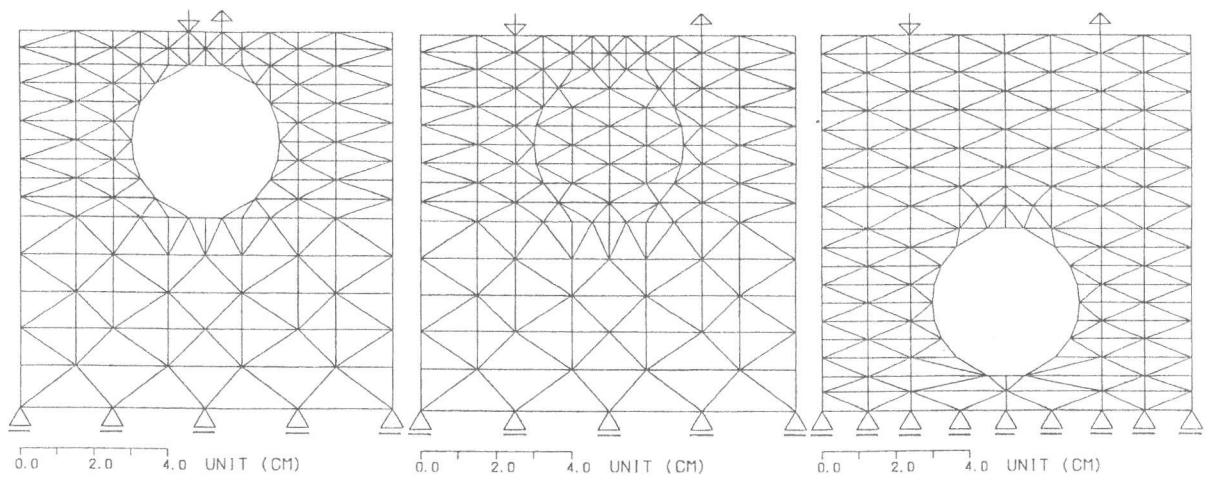
本解析では、速度比例型の減衰項を有する波動方程式を採用した。減衰マトリックス[C]としては、 $\alpha[M] + \beta[K]$ で表される比例減衰(ここに、[M]:質量マトリックス、[K]:剛性マトリックス)を使用し、いずれの解析の場合も $\alpha = 5 \times 10^{-8}$ および $\beta = 2 \times 10^{-7}$ とした。波動伝播解析に際しては、運動方程式の解法にウィルソンの θ 法($\theta = 1.4$)を使用し、外力としては幅が $2.5 \mu s$ の単位パルスを入力して、解析時間増分を $0.05 \mu s$ として $1,024 \mu s$ まで解析を行った。また、周波数応答解析では、周波数増分を $1.0 kHz$ に設定して単位調和外力を入力した場合の定常応答を、解析対象に応じて $150 kHz$ または $300 kHz$ まで解析した。

2.2 解析モデル

解析の概要を表-1に示す。本解析では、別報[8]の実験で取り上げた要因のうち、介在物の種類(介在物が無し、空隙および鉄筋の3種類)、介在物の直径($d = 22$ および $40 mm$ の2種類)、かぶり厚さ($d = 22 mm$ の場合:9および $69 mm$ の2種類、 $d = 40 mm$ の場合:9および $51 mm$ の2種類)並びに入・出力間隔(間隔を介在物を中心として $5 cm$ とした場合および入・出力位置を介在物の頂点となす角度(頂角)が 54 度となるようにした場合(かぶり厚さが $9 mm$ の場合: $0.9 cm$ 、 $51 mm$ の場合: $5.2 cm$ 、 $69 mm$ の場合: $7.0 cm$)の2種類)を解析要因として取り上げた。また、解析モデルは、本解析手法では波動伝播特性に及ぼす粗骨材の影響を考慮することができないため、別報[8]で示したモデル試験体に準じて、 $10(縦) \times 10(横) \times 9(奥行き) cm$ のモルタル直方体とし、試験体中央に所定

表-1 解析の概要

介在物の種類	介在物の直径 (mm)	かぶり厚さ (mm)	変換子の設置間隔
無し 空隙 鉄筋	22	9、69	5 cm、 頂角=54°
	40	9、51	



(a) 空隙(かぶり厚さ=9mm) (b) 鉄筋(かぶり厚さ=9mm) (c) 空隙(かぶり厚さ=51mm)

図-1 解析モデルの概要

のかぶり厚さと直径(表-1参照)を有する空隙および鉄筋の入ったものとした。本解析で利用したモデル試験体の要素分割、支持条件、弾性波の入力・検出位置などを図-1に、また解析モデルを構成する材料の各種力学特性および各種弾性波速度を、それぞれ表-2および表-3に示す。

表-2 構成材料の力学特性

媒 体	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	ポアソン比	密 度 (g/cm^3)
モルタル	2.96	0.18	2.16
鉄 筋	20.39	0.30	7.80

表-3 構成材料を伝播する弾性波速度

媒 体	縦波速度 (km/s)	横波速度 (km/s)	表面波速度 (km/s)
モルタル	3.82	2.39	2.15
鉄 筋	5.88	3.14	2.93

3. 解析結果とその考察

3.1 波動伝播解析結果と周波数応答解析結果との比較

図-2は、介在物が無い場合の解析モデルを対象とした波動伝播解析の結果で、変位応答結果を用いて算定した周波数伝達関数の振幅スペクトルの例を示したものである。また、図-3は同じ解析モデルに対して行った周波数応答解析の結果を、図-2と同様の方法で整理したものである。これらの図によれば、試験体共振時の応答振幅の値に若干の相違は認められるが、共振周波数の出現状況および周波数応答の全体的な特徴は極めてよく一致している。したがって、以下では波動伝播解析に膨大な計算時間が必要であることも考慮して、計算時間が比較的短くてすむ周波数応答解析の結果を用いて考察することにする。なお、

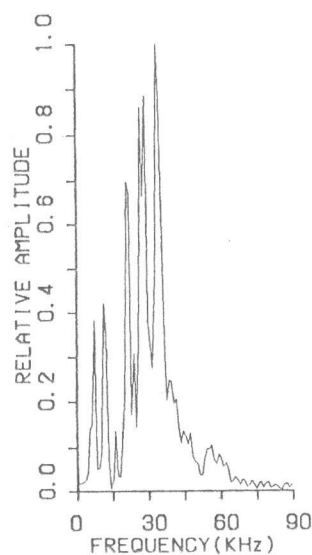


図-2 周波数応答 (伝播解析結果)

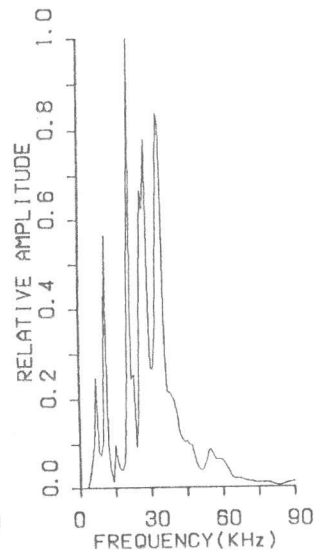


図-3 周波数応答 (応答解析結果)

周波数応答振幅値で観察される上記の相違は、波動伝播解析の結果と比較して周波数応答解析の場合の周波数刻みが若干大きかったためと思われる。

3.2 かぶり厚さが小さい場合の評価

図-4(a)および(b)は、介在物の直径が40mm、かぶり厚さが9mmの解析モデルで、頂角が54度となるように入・出力位置を設置した場合(間隔:0.9cm、図-1(a)参照)の周波数応答解析の結果を、介在物の種類別に示したものである。ただし、図の縦軸は介在物が鉄筋の解析モデルで観察された最大応答振幅値(図-4(b)の137kHz時の値)で除して無次元化してある。図-4(a)によれば、介在物が空隙の場合には、

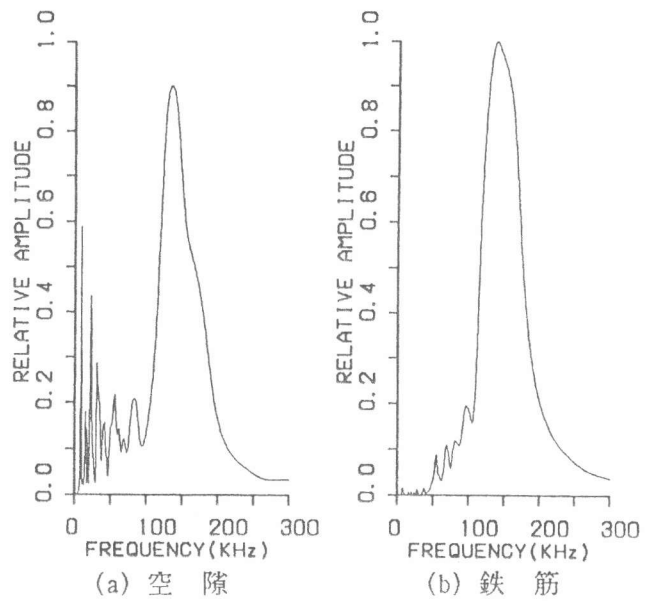
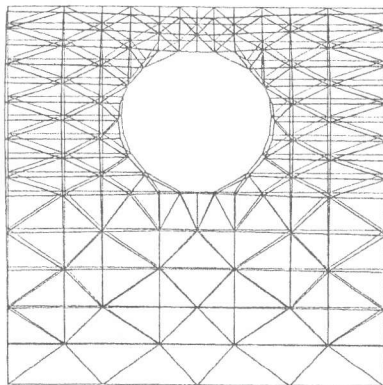


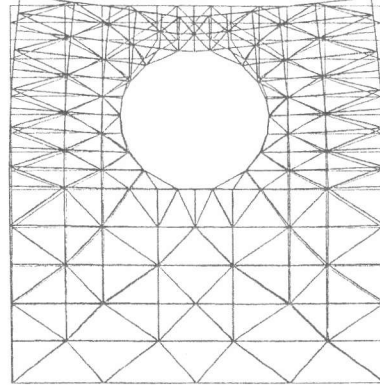
図-4 周波数応答 (直径=40mm、かぶり厚さ=9mm、間隔=0.9cm)

1-ST RESONANT FREQUENCY=9.00 KHZ
AT NODE NO. =78 (Y-DIRECTION)



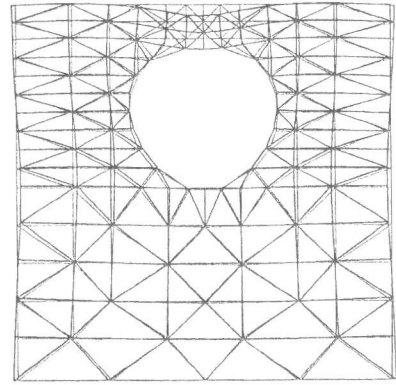
(a) 周波数=9kHz

3-RD RESONANT FREQUENCY=15.00 KHZ
AT NODE NO. =78 (Y-DIRECTION)



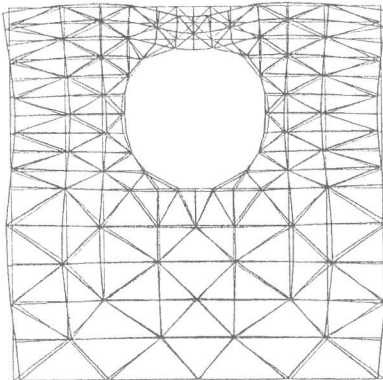
(b) 周波数=15kHz

5-TH RESONANT FREQUENCY=22.00 KHZ
AT NODE NO. =78 (Y-DIRECTION)



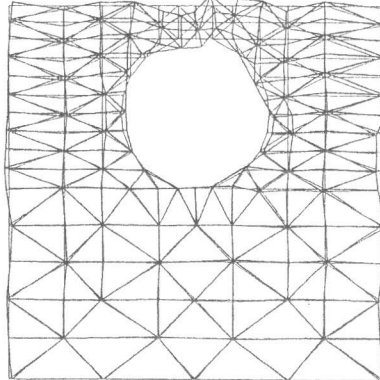
(c) 周波数=22kHz

7-TH RESONANT FREQUENCY=31.00 KHZ
AT NODE NO. =78 (Y-DIRECTION)



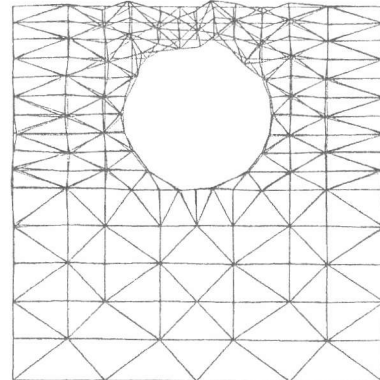
(d) 周波数=31kHz

10-TH RESONANT FREQUENCY=56.00 KHZ
AT NODE NO. =78 (Y-DIRECTION)



(e) 周波数=56kHz

13-TH RESONANT FREQUENCY=83.00 KHZ
AT NODE NO. =78 (Y-DIRECTION)



(f) 周波数=83kHz

図-5 低周波数領域の振動モード例
(介在物=空隙、直径=40mm、かぶり厚さ=9mm、間隔=0.9cm)

周波数が約100kHz以下の周波数領域で数多くの共振周波数が存在し、かつ共振時の応答振幅は低周波数になるに従って大きくなる傾向を示している。図-5は、介在物が空隙の場合に対する100kHz以下の周波数領域における代表的な共振時の振動モードを示したものであるが、この周波数領域における基本的な振動モードは薄いかぶり層の膜振動で

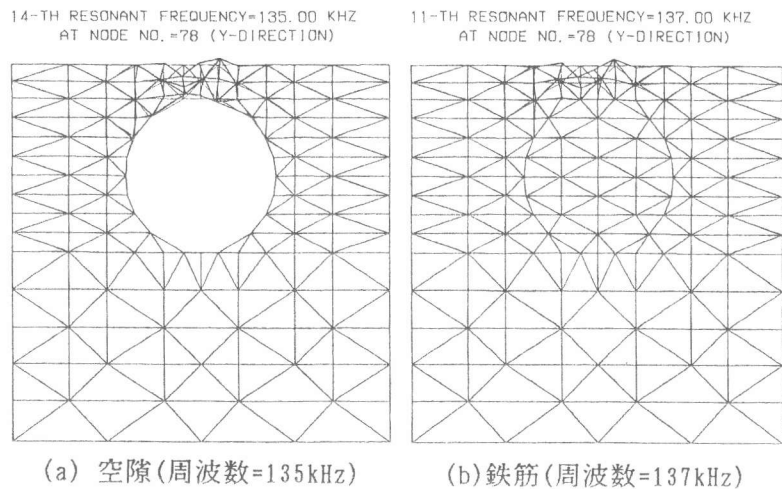


図-6 最大応答時の振動モード
(直径=40mm、かぶり厚さ=9mm、間隔=0.9cm)

あることがわかる。一方、介在物が鉄筋の場合には、上記のようなかぶり層での膜振動は認められないため、図-4(b)に示すように、周波数が約100kHz以下の周波数領域でも比較的滑らかな周波数特性となっている。図-6は、前掲の図-4における最大応答時の振動モードを示したものである。最大応答時の周波数は、介在物が空隙の場合に135kHz、鉄筋の場合に137kHzとなり、介在物の種類の影響をあまり受けていないが、この図からも介在物の影響を受けにくい局所的な振動モードとなっていることがわかる。ところで、これらの最大応答時の周波数は、介在物からの縦波反射波の到達時間から算定した周波数(約140kHz)とほぼ一致しており、図-6に示した振動モードは介在物からの反射波による応答であるものと考えられる。なお、図-7は、介在物の直径が22mmの場合について示したものであるが、定性的な傾向は介在物の直径が40mmの場合の結果を示した前掲の図-4と同様である。

図-8は、介在物の直径が40mm、かぶり厚さが9mmの解析モデルで、入・出力点の間隔を5cmとした場合(図-1(b)参照)の周波数応答解析の結果を示したものである。図によれば、最大応答時の周波数は、介在物が空隙の場合に77kHz、鉄筋の場合に65kHzとなり、前掲の図-4の場

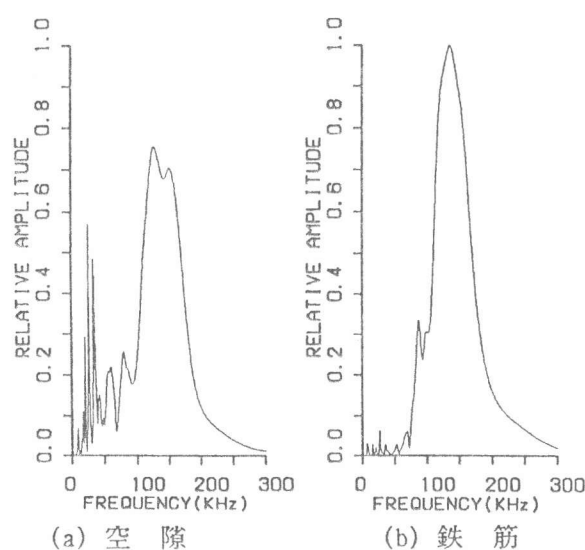


図-7 周波数応答 (直径=22mm、かぶり厚さ=9mm、間隔=0.9cm)

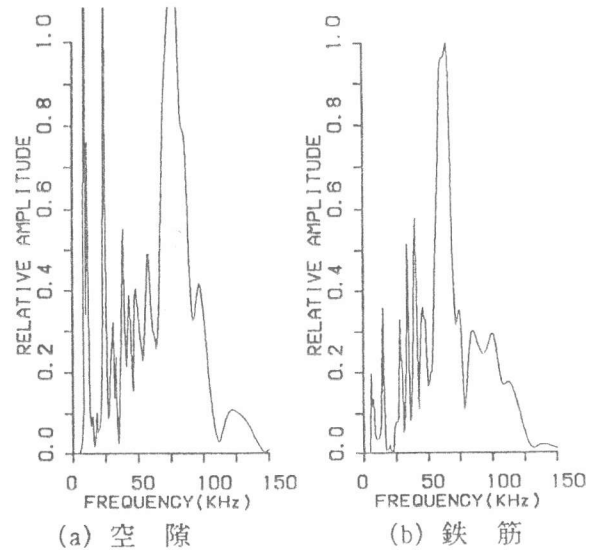
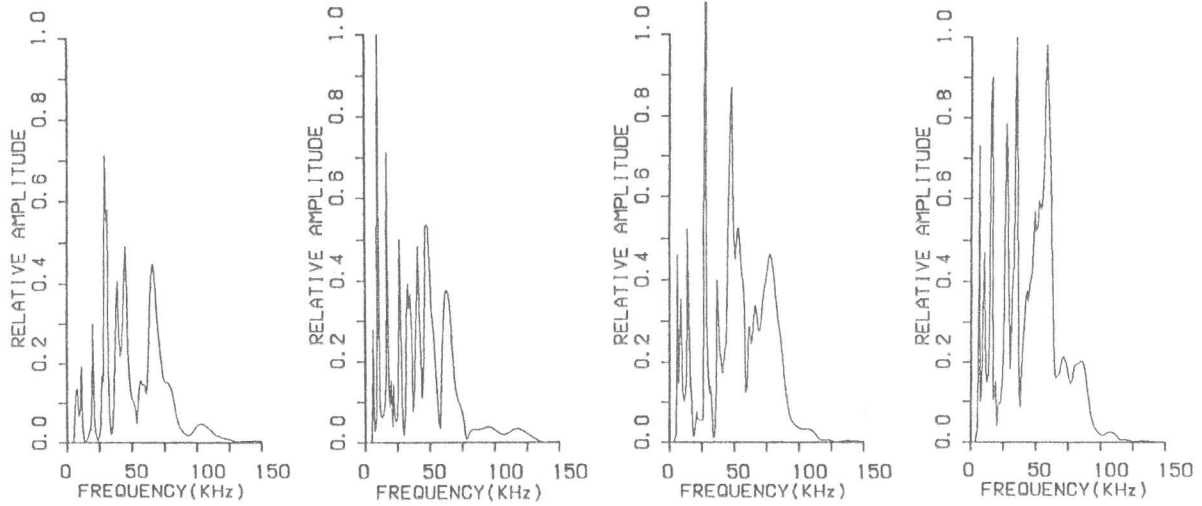


図-8 周波数応答 (直径=40mm、かぶり厚さ=9mm、間隔=5cm)



(a) 空隙 (b) 鉄筋
 図-9 周波数応答 (直径=40mm、かぶり厚さ=51mm、間隔=5.2cm)

(a) 空隙 (b) 鉄筋
 図-10 周波数応答 (直径=22mm、かぶり厚さ=69mm、間隔=7cm)

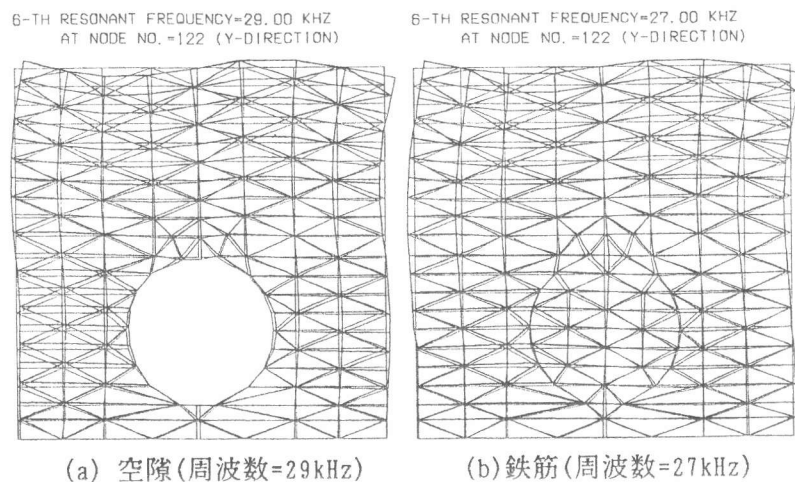
合と同様に、介在物からの縦波反射波の到達時間から算定した周波数（約 72kHz）とほぼ一致している。ただし、このように入・出力点の間隔を大きく設定した場合には、低周波数の振動が生じ易くなるため、前掲の図-4と比較してさらに低周波数領域の応答が助長され、特に介在物が空隙の場合には、約12kHzの周波数成分が極めて卓越した周波数特性となっており、入・出力点の間隔が小さい場合よりも最大応答時の周波数の確認が若干難しくなる傾向にある。

以上のことから、最大共振周波数およびそれよりも低周波数領域における共振周波数の出現状況と振幅値に注目することによって、介在物のかぶり厚さだけでなくその種類も特定できる可能性のあることがわかる。

3.3 かぶり厚さが大きい場合の評価

図-9は、介在物の直径が40mm、かぶり厚さが51mmの解析モデルで、頂角が54度となるように入・出力位置を設置した場合（間隔：5.2 cm、図-1(c)参照）の周波数応答特性を、介在物の種類別に示したものである。これらの図から明らかなように、かぶり厚さが9mmの場合と比較して入・出力点と介在物間の距離が大きいため、約75kHz以上の高周波数成分は著しく減少している

が、75kHz以下の周波数領域における周波数特性は非常に複雑な様相を呈しており、特に介在物が鉄筋の場合には、前掲の図-4で観察されるような明確な共振周波数を観察することが不可能となっている。また、図-10は、介在物の直径が22mmの場合について示したものであるが、定性的な傾向は介在物の直径が40mmの場合の結果を示した前掲の



(a) 空隙(周波数=29kHz) (b) 鉄筋(周波数=27kHz)

図-11 最大応答時の振動モード
 (直径=40mm、かぶり厚さ=51mm、間隔=5.2cm)

図-9と同様である。図-11は、図-9の解析モデルに対して介在物からの縦波反射波の到達時間から算定した周波数(約32 kHz)に対応した共振時の振動モードを介在物の種類別に示したものであるが、介在物の種類にかかわらずよく似た振動モードとなっている。ただし、これらの共振周波数(介在物が空隙の場合:29kHz、鉄筋の場合:27kHz)のうち、介在物が空隙の場合には最大応答時の周波数と一致するが、鉄筋の場合には一致していない。したがって、鉄筋位置の評価は、かぶり厚さが大きくなるとともに介在物が空隙の場合に比べて難しくなる傾向にあるといえる。

4. 結論

本研究では、弾性波法を適用したコンクリートの劣化度評価方法の確立を目的とした基礎的研究の一つとして、弾性波法による空隙および鉄筋位置評価の可能性について解析的に検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようになる。

- 1) 弾性波動伝播解析の結果を用いて算定した周波数応答特性と周波数応答解析による結果とは、周波数応答の全体的な特徴および卓越周波数の出現状況とも極めてよく一致した。
- 2) 介在物からの反射波が明確に捉えられる場合には、最大共振周波数およびそれよりも低周波数領域における共振周波数の出現状況と振幅値に注目することによって、介在物のかぶり厚さだけでなくその種類も特定できる可能性がある。
- 3) 介在物が鉄筋の場合、かぶり厚さが大きくなるとともに介在物からの反射波の特定が難しくなるため、その位置評価は介在物が空隙の場合に比較して困難である。

謝辞

解析および解析結果の整理に際して御助力を得た愛知工業大学学部学生の岡田忠昭君(現:竹中工務店)に対して謝意を表します。なお、本研究費の一部は、内藤科学技術振興財団および石田財団の研究助成金によったことを付記し、謝意を表す。また、数値計算に際しては、愛知工業大学計算機センターのCRAY社製スーパーコンピュータX-MP/14seを使用したことを付記する。

参考文献

- 1) 山田和夫・小阪義夫: 火害を受けたコンクリート中を伝播する超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、pp. 361-366、1988.6
- 2) 山田和夫・土屋宏明・小阪義夫: コンクリートの伝達関数に及ぼす各種要因の影響、セメント技術年報、第42巻、pp. 259-262、1988.12
- 3) 山田和夫・小阪義夫: 極低温下に曝されたコンクリート中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第1号、pp. 331-336、1989.6
- 4) 山田和夫・土屋宏明・小阪義夫: 超音波スペクトロスコピーによるコンクリートの劣化度評価に関する基礎的研究-高温加熱を受けたコンクリートの場合-、材料、第8巻、第431号、pp. 959-965、1989.8
- 5) 山田和夫・小阪義夫: アルカリ骨材反応を生じたモルタル中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻、第1号、pp. 773-778、1990.6
- 6) 山田和夫・小阪義夫: 超音波スペクトロスコピー法によるコンクリートの劣化度評価に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 44、pp. 288-293、1990.12
- 7) 小阪義夫・山田和夫・土屋宏明: コンクリートの超音波波動伝播特性に関する解析的検討、セメント・コンクリート論文集、No. 43、pp. 226-231、1989.12
- 8) 山田和夫・山本正岳: 弾性波法を適用したコンクリート内部の空隙および鉄筋位置の推定に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、1991.6