

弾性波法による外壁タイルの剥離 およびコンクリートのひび割れ 評価に関する解析的研究

山田 和夫

Analytical Study on Evaluation of Tile Separation and Crack Depth of Concrete by Elastic Wave Method

K a z u o Y A M A D A

In this study, the relationships between frequency responses and defects in concrete, such as the tile separation and the crack, were discussed analytically by using a 2-dimensional finite element method, as the fundamental investigation to establish a new non-destructive technique predicted from the frequency characteristics of elastic wave propagating through concrete. The analysis of elastic wave propagation and the frequency response analysis were applied. Following results were obtained in this study:

1) The frequency responses calculated by using the results of analyses on elastic wave propagations are in good agreement with the results of frequency response analyses, except a slight difference of response in the high frequency range.

2) The situations of tile separation can be predicted exactly from the changes of frequency characteristics in the whole frequency range, and especially in the low frequency range.

3) The frequency components in the high frequency range significantly diminish with the increase of crack depth. The general frequency characteristics, however, are hardly affected by the crack in concrete.

4) The first and maximum resonant frequencies gradually decrease with the increase of crack depth. But there are several resonant frequencies independent of the crack depth and the amplitudes at those resonant frequencies are stable to crack depth.

1. まえがき

筆者は、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劣化度診断方法、いわゆる超音波スペクトロスコピー法¹⁾による劣化度診断方法の確立を目的として一連の実験的研究^{2)~7)}を行ってきた。本報では、こ

建築学科

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、2次元有限要素法による弾性波動伝播解析および周波数応答解析を実施し、まず外壁タイルの剥離およびコンクリートのひび割れ状況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 $\alpha = 5 \times 10^{-9}$ 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 法を使用 ($\theta = 1.4$) し、入力した外力は幅が $2.5 \mu \text{sec}$ の単位パルス外力、時間刻みは $0.5 \mu \text{sec}$ として $2,000 \mu \text{sec}$ まで解析を行った。また、周波数応答解析では、周波数刻みを 0.2kHz とした単位調和外力が入力された場合の定常応答を 90kHz まで解析した。

2.2 解析モデル

本研究では、上記の目的に応じて以下に示す 2 シリーズの解析を行った。

(1) 解析-I：本解析は、外壁タイルの剥離状況と検出弾性波の周波数特性との関係を調査するための、タイルの剥離幅 ($d = 0, 2$ および 6cm の 3 種類) 並びに伝播弾性波の検出位置 (タイルの剥離部および接着部の 2 種類) を解析要因として取り上げた。解析モデルは、別報³⁾で示したモデル実験用試験体のうち、 $10 \times 10 \times 10 \text{cm}$ のコンクリート立方体と厚さが 0.4cm で断面が 10cm 角のタイルとの間に 3mm 厚の接着用モルタルを挿入したものを対象とした。解析-I で使用したモデル試験体の要素分割、支持条件、弾性波の入力・検出位置などの一例を図-1(a)に、また解析モデルを構成する材料の各種力学特性を表-1(a)に示す。

(2) 解析-II：本解析は、コンクリートに生じた

ひび割れと検出弾性波の周波数特性との関係を調査するためのもので、媒体の種類(モルタルおよびコンクリートの 2 種類)、ひび割れ深さ ($d = 0, 2, 4, 6$ および 8cm の 5 種類) 並びにひび割れ幅 ($w = 0.5$ および 4mm の 2 種類) を解析要因として取り上げた。解析モデルは、別報³⁾で示したモデル実験用試験体に準じて、 10 (高さ) $\times 8$ (奥行き) $\times 40$ (長さ) cm の直方体とし、試験体中央に所定の人工ひび割れの入ったものとした。解析-II で使用したモデル試験体の要素分割、支持条件、弾性波の入力・検出位置などの一例を図-1(b)に、また解析モデルを構成する材料の各種力学特性を表-1(b)に示す。

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

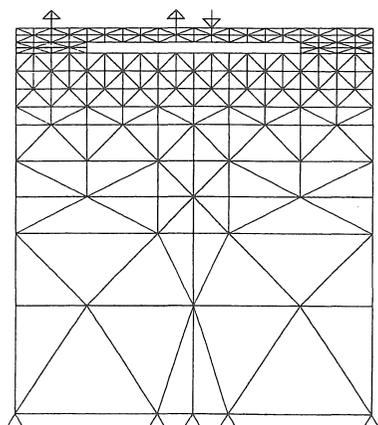
図-2は、解析-IIのひび割れ入りコンクリート試験体(ひび割れ幅 = 4mm)を対象とした波動伝播解析の結果で、変位応答結果を用いて算定した周波数伝達関数の振幅スペクトルの例を示したものである。また、図-3は同じ試験体に対して行った周波数応答解析の結果を、図-2と同様の方法で整理したものである。これらの図によれば、周波数応答解析の結果の方が波動伝播解析の結果よりも高周波数成分を若干多く含む傾向にあるが、各試験体における卓越周波数の出現状況、周波数伝達関数に及ぼす

Table 1 Mechanical properties of constituent materials.
(a) Analysis-I.

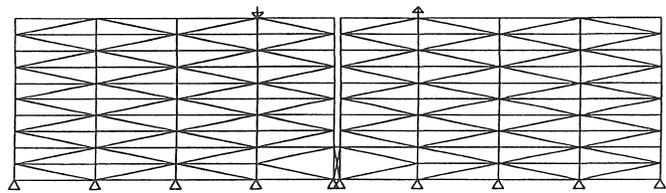
Materials	Young's modulus ($\times 10^6 \text{kgf/cm}^2$)	Poisson's ratio	Density (g/cm^3)
Concrete	3.34	0.18	2.31
Mortal	2.51	0.18	2.07
Tile	0.20	0.18	2.13

(b) Analysis-II.

Materials	Young's modulus ($\times 10^6 \text{kgf/cm}^2$)	Poisson's ratio	Density (g/cm^3)
Mortal	2.96	0.18	2.16
Concrete	3.34	0.18	2.31



(a) Analysis-I.



(b) Analysis-II.

Fig.1 Example of analytical model.

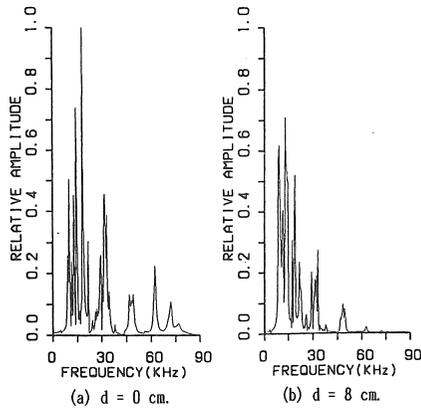


Fig. 2 Frequency responses calculated by using detected waveform.

ひび割れ深さの影響などについては、両者の解析結果はよく一致しているといえる。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。

3. 2 外壁タイルの剥離評価

図-4は、試験体中央から右左に0.5cm離れた位置で、それぞれ調和外力を入力および定常応答の検出を行った（いずれもタイル剥離部）場合の解析結果を、タイルの剥離幅別に示したものである。ただし、図の縦軸はタイルの剥離幅が6cmの試験体で観察された最大応答振幅値（図-4(c)の12.4kHz時）で除して無次元化してある。図から明らかなように、タイルに剥離が生じていない場合には、周波数が65kHzのときに著しく卓越した応答を示し、これ以外の周波数帯では若干の卓越周波数の存在も認めらるが、大局的には比較的フラットな周波数特性となっている。図-5は、この卓越周波数に対応する試験体の振動モードを示したものであるが、基本的な振動モードは表面波による振動となっていることがわ

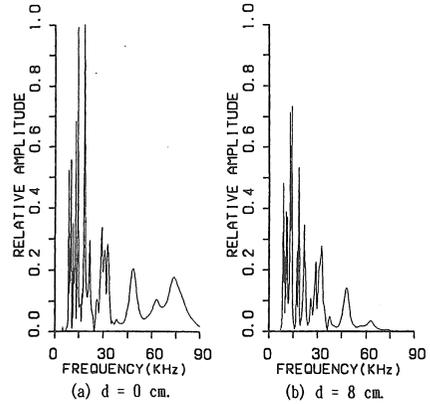


Fig. 3 Results of frequency response analysis.

かる。これに対して、タイルが剥離している場合には、応答振幅が著しく増大するとともに約40kHz以下の低周波数成分が卓越するようになり、周波数特性も非常に複雑な様相を呈している。また、タイルの剥離幅が大きくなるほど、より低周波数成分が卓越するようになり、かつ卓越周波数の出現する周波数間隔も小さくなっている。図-6および図-7は、それぞれタイルの剥離幅が2cmおよび6cmの試験体で観察された代表的な卓越周波数に対応する試験体の振動モードを示したものであるが、基本的な振動モードは剥離部タイルの膜振動であることがわかる。以上のことから、対象周波数全域の周波数特性および低周波数領域における卓越周波数の出現状況に注目することによって、タイルの剥離状況をかなりの精度で予測できる可能性のあることがわかる。なお、紙数の関係で図には示していないが、試験体中央から右に0.5cm離れた位置（タイル剥離部）で調和外力を入力し、試験体左側から1cmの位置（タイル密着部）で定常応答を検出した場合の解析結果では、定性的な傾向は前掲の図-4に示した傾向と同様で

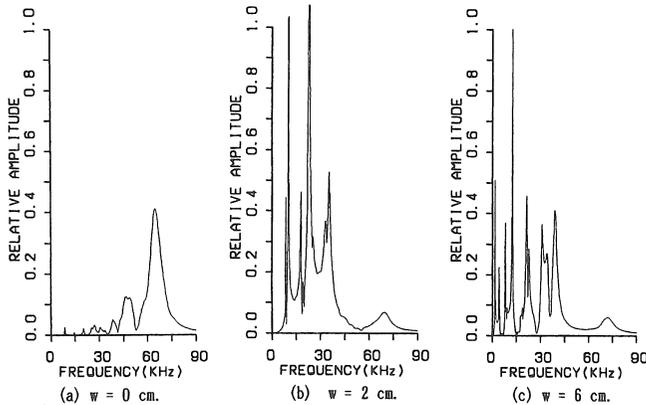


Fig. 4 Frequency responses for separate portion of tile.

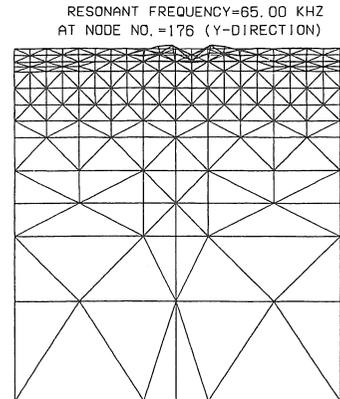


Fig. 5 Typical mode of responses (w=0 cm).

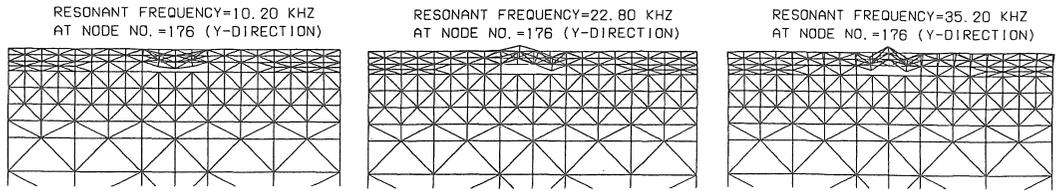


Fig. 6 Typical modes of responses (w=2 cm).

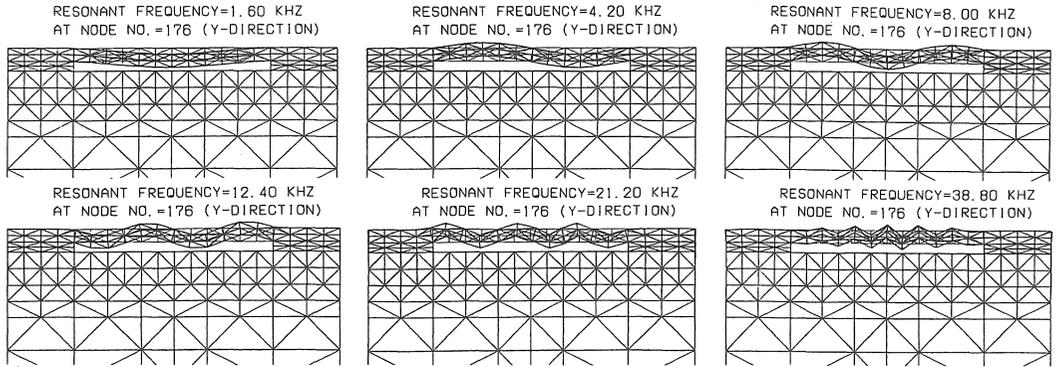


Fig. 7 Typical modes of responses (w=6 cm).

あるが、タイル剥離部で弾性波を入力しても入力弾性波のエネルギーが剥離部タイルの膜振動によって殆ど吸収されてしまうため、応答振幅は著しく小さくなってしまったことがわかった。したがって、タイルの剥離状況の評価に際しては、入力・検出用変換子の設置位置も重要な要因であるといえる。

3.3 ひび割れ深さの評価

図-8は、ひび割れの中心から左右に5 cm離れた位置を、それぞれ調和外力の入力点および定常応答検出点とした場合の周波数応答解析の結果を、ひび割れ幅が0.5mm のモルタル試験体について、ひび割れ深さ別に示したものである。ただし、図の縦軸はひび割れの存在しない試験体で観察された最大応答振幅値(図-8(a)の17.4kHz時)で除して無次元化してある。図によれば、ひび割れ深さの増加とと

もに全周波数領域において振幅値が減少するが、特に高周波数成分の減少が著しいことがわかる。ただし、振幅値の比較的小さい領域において卓越周波数の出現状況に若干の相違は認められるものの、周波数特性の全体的な特徴は、ひび割れ深さにそれほど影響を受けない。表-2は、図-8に示した結果をさらに詳細に検討するために、卓越周波数と相対応答振幅値との関係を一覧表にして示したものである。この表によれば、第1次卓越周波数の値は、ひび割れ深さが0、2、4、6および8 cmと大きくなるに従って徐々に減少する(それぞれ4.6、4.4、4.2、3.6および3.0kHz)こと、並びに最大卓越周波数の値も、それぞれ17.4、13.6、13.0、12.4および12.4kHzと減少することがわかる。ところで、紙数の関係で図には示していないが、これらの第1次および最大卓

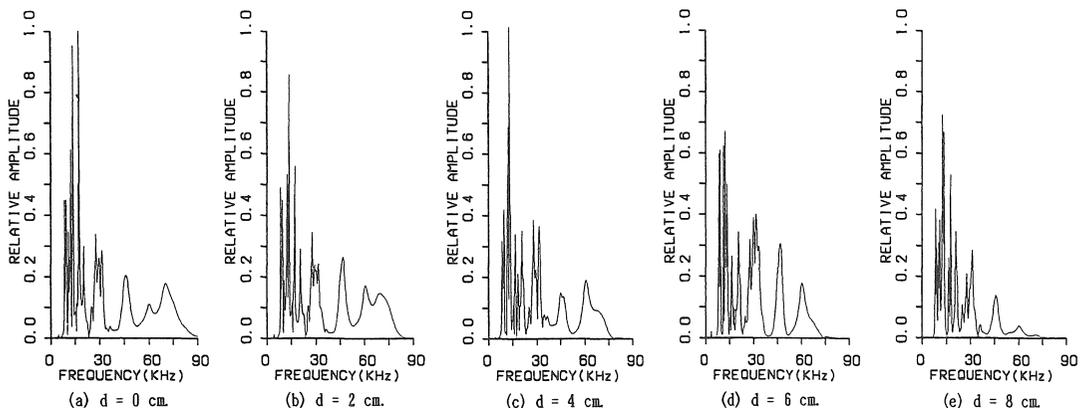


Fig. 8 Frequency responses of cracked mortar

Table 2 Result of analysis for frequency response (Crack width=0.5mm, mortar).

Order	Depth = 0 cm		Depth = 2 cm		Depth = 4 cm		Depth = 6 cm		Depth = 8 cm	
	f q	Rs								
1	4.6	0.0108	4.4	0.0129	4.2	0.0057	3.6	0.0198	3.0	0.0028
2	8.2	0.4473	8.2	0.4903	8.0	0.3150	8.0	0.3869	8.0	0.3412
3	8.8	0.1985	8.8	0.2057	8.6	0.2556	8.6	0.5966	8.4	0.4186
4	9.2	0.4481	9.4	0.4495	9.4	0.4189	9.2	0.6088	9.0	0.2905
5	--	----	--	----	9.8	0.3048	9.8	0.2296	--	----
6	10.8	0.3464	10.6	0.1889	10.6	0.0227	10.6	0.0161	10.2	0.3095
7	--	----	--	----	11.8	0.5310	11.2	0.6238	10.8	0.3838
8	12.2	0.6132	12.2	0.5332	12.2	0.6867	--	----	--	----
9	13.6	0.9526	<u>13.6</u>	<u>0.8564</u>	<u>13.0</u>	<u>1.0160</u>	<u>12.4</u>	<u>0.6696</u>	<u>12.4</u>	<u>0.7248</u>
10	--	----	--	----	13.6	0.4355	13.6	0.4980	13.4	0.6672
11	15.4	0.0865	15.4	0.1155	15.4	0.1072	15.4	0.0853	15.4	0.0141
12	16.2	0.1130	--	----	--	----	--	----	--	----
13	<u>17.4</u>	<u>1.0000</u>	17.0	0.5589	16.6	0.3386	16.4	0.2639	16.4	0.2602
14	--	----	18.6	0.0539	18.2	0.2107	17.8	0.0954	17.6	0.5314
15	--	----	--	----	19.4	0.1092	19.0	0.0912	--	----
16	20.6	0.2980	20.6	0.2905	20.8	0.3510	20.8	0.3425	20.8	0.3446
17	--	----	22.4	0.0797	21.8	0.1961	--	----	--	----
18	--	----	23.8	0.0170	--	----	--	----	23.6	0.0289
19	24.8	0.1022	25.4	0.1059	25.0	0.1036	24.8	0.0688	24.8	0.1071
20	27.8	0.3377	27.8	0.3450	27.8	0.3858	27.8	0.3175	27.6	0.2098
21	29.6	0.2614	29.2	0.2392	29.2	0.2245	30.0	0.3897	29.6	0.1602
22	--	----	30.0	0.2236	--	----	--	----	--	----
23	31.4	0.2865	31.4	0.2434	31.4	0.3649	31.6	0.4000	--	----
24	34.0	0.0336	33.0	0.0992	34.4	0.0776	33.2	0.2973	31.2	0.2859
25	36.2	0.0386	36.2	0.0300	36.4	0.0744	--	----	36.2	0.0439
26	--	----	--	----	39.4	0.0439	--	----	--	----
27	--	----	--	----	41.2	0.0464	--	----	--	----
28	--	----	--	----	45.2	0.1491	--	----	--	----
29	46.2	0.2054	46.6	0.2638	46.8	0.1379	46.6	0.3057	46.0	0.1398
30	--	----	--	----	--	----	--	----	54.4	0.0186
31	60.2	0.1113	60.6	0.1722	60.8	0.1902	60.6	0.1781	60.2	0.0411
32	70.4	0.1786	69.8	0.1483	67.6	0.0929	--	----	70.8	0.0111
33	--	----	--	----	--	----	75.8	0.0051	--	----
34	--	----	--	----	80.4	0.0037	82.0	0.0010	81.2	0.0008
35	--	----	94.2	0.0006	95.2	0.0003	--	----	--	----

[Notes] f q: Frequency (kHz), Rs: Relative frequency response.

越周波数に対応した試験体の振動モードを調査した結果、基本的なモードはひび割れの開閉またはずれ変形であり、ひび割れ深さの影響を受け易いモードとなっていることがわかった。このように、ひび割れ深さに敏感な振動モード（周波数成分）に着目することによって、ひび割れ深さをかなりの精度で評価することが可能であるといえる。ただし、8 kHz 近傍の第2次、9 kHz 近傍の第4次、20kHz 近傍の第16次、28kHz 近傍の第20次および46kHz 近傍の第29次卓越周波数は、ひび割れ深さに殆ど影響を受けず、またそれらに対応する相対応答振幅値も、比較的安定した値を示している。なお、図には示していないが、ひび割れ入り試験体の周波数応答特性に及ぼす媒体の種類（モルタルおよびコンクリート）並びにひび割れ幅の影響はそれほど明確には認められなかった。

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、弾性波法による外壁タイルの剝離およびひび割れ深さ推定へ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、高次の振動モードに対応した高周波数領域の応答結果を除けば比較的良く一致した。
- 2) 解析対象周波数全域の周波数特性および低周波数領域における卓越周波数の出現状況に注目することによって、タイルの剝離状況をかなりの精度で推定することが可能である。ただし、検出波形の特性は、入力・検出用変換子の設置位

置によって影響を受けるため、タイルの剥離状況を定量的に評価するに際しては、変換子の設置方法を規定する必要がある。

- 3) ひび割れ深さの増加とともに全周波数領域における振幅値は減少するが、特に高周波数成分の減衰が著しい。ただし、周波数特性の全体的な特徴は、ひび割れ深さにそれほど影響を受けない。
- 4) 第1次および最大卓越周波数は、ひび割れ深さの増加に従って次第に減少するが、第2次、第4次など、いくつかの卓越周波数のうち、ひび割れ深さに殆ど影響を受けない卓越周波数が存在する。また、それらの卓越周波数に対応する相対応答振幅値は、比較的安定した値を示す。

[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大学院生の山本正岳君および愛知工業大学学部学生の田中幸治君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C R A Y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) Brown, A. F.: Ultrasonic Spectroscopy, Ultrasonic Testing, pp.167-215, (1982).

- 2) 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).
- 3) 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).
- 4) 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).
- 5) 山田和夫、土屋宏明、小阪義夫：超音波スペクトロスコープ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).
- 6) 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).
- 7) 山田和夫、小阪義夫：超音波スペクトロスコープ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).
- 8) 山田和夫：弾性波法による外壁タイルの剥離およびコンクリートのひび割れ評価に関する実験的研究、愛知工業大学研究報告、第26号B、専門関係論文集、(1991).

受理 平成3年3月20日