

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

山田 和夫

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

Kazu o YAMADA

The waveform of elastic wave propagating through concrete contains various informations related to the internal structure of concrete. It may be possible to clarify the defects in concrete, such as tile separations and cracks, by analyzing the detected elastic wave in detail. The elastic wave method was applied to evaluate the tile separation and crack depth, as the fundamental investigation to establish a new non-destructive technique predicted from the frequency characteristics of elastic wave propagating through hconcrete. Following results were obtained in this study:

1) The frequency characteristics of measured wave are very affected by the setting locations of transducers to emit and detect the elastic wave, even if the width of tile separation is same. In general, when both transducers are setted on the separate portion of tile, the measured wave is most sensitively affected by the change of sparating widthof tile.

2) The amplitude and energy of the measured waveform increase, and the frequency components lower than 150 kHz of the frequency transfer function become prominent significantly with the increase of separating width of tile.

3) The amplitude and energy of the measured waveform decrease, and the frequency components lower than 50 kHz of the frequency transfer function become prominent significantly with the increase of crack depth.

1. はじめに

建築仕上げ材の剥離・剥落は、建築物の美観や耐久性を損なうばかりでなく、人身事故を伴う危険性もあり、近年大きな社会問題となっている。また、主に施工不良によって生じるコンクリート中の空隙は、コンクリートの中酸化の促進や水密性の低下 建築学科

ど、コンクリート構造物の耐久性を考える上で問題となることが多い。したがって、これらの構造物内部に存在する欠陥を非破壊的に検査する方法を確立することが急務であるといえる。筆者も、このような社会的状況を踏まえ、従来から弾性波法を適用したコンクリートの非破壊試験方法を確立するための一連の基礎的研究^{1)~5)}を行ってきたが、本報では、弾性波法を用いた外壁タイルの剥離評価およびコン

クリートのひび割れ評価の適用性および可能性について実験的に検討を行った。

2. 実験の方法

2.1 実験の概要

本実験では、タイルの剥離の推定に関する実験（実験-I）、並びにひび割れ深さの推定に関する実験（実験-II）の2シリーズの実験を行った。いずれの実験においても、各試験体中を伝播した超音波の諸特性を測定し、それらの特性値とタイルの剥離状況およびひび割れの発生状況との関係を調査した。各実験で取り上げた要因は以下の通りである。

(1) 実験-I：本実験で取り上げた要因は、タイルの剥離幅 ($w = 0, 10, 20, 40$ および 60mm の5種類)、剥離厚さ ($t = 0, 0.5, 1, 2$ および 3mm の5種類)、変換子の設置位置（入力・検出用変換子を共に剥離部 (Point-A) に設置した場合、入力用変換子を剥離部に、検出用変換子を健全部 (Point-B) に設置した場合、および入力用変換子を健全部に、検出用変換子を剥離部に設置した場合の3種類) である。なお、本実験では水セメント比 (W/C) が60%のコンクリート試験体を使用し、タイル接着用として $W/C = 60\%$ のモルタルを使用した。超音波測定方法としては反射法を採用し、入力パルス幅は $2.5\mu\text{sec}$ とした。

(2) 実験-II：本実験で取り上げた要因は、媒体の種類（モルタルおよびコンクリートの2種類、ともに $W/C = 60\%$ ）、ひび割れの深さ ($d = 0, 20, 40, 60$ および 80mm の5種類)、ひび割れの幅 ($w = 0, 0.5, 1, 2$ および 4mm の5種類)、探査の方法（反射法 (Method-A)、ランプ法 (Method-B)、近距離迂回法 (Method-C) および修正BS-4408法 (Method-D) の4種類)、変換子の

設置間隔（反射法では、ひび割れを中心として10cm間隔の1種類、修正BS法では、ひび割れを中心として8cm間隔と16cm間隔の2種類）、並びに変換子の接着方法（反射法の場合は両面テープ、他の場合はグリースを用いた）である。なお、反射法における入力パルス幅は $2.5\mu\text{sec}$ とした。

2.2 試験体の製作および養生方法

試験体の製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂（表乾比重 = 2.60、最大粒径 = 5mm （ひび割れ試験用）および 1.2mm （タイル接着用））および川砂利（表乾比重 = 2.65、最大粒径 = 25mm ）を用いた。本実験で用いた各媒体の標準調査表を表-1に示す。試験体は、実験-Iが $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ 、実験-IIが $10 \times 8 \times 40\text{cm}$ の角柱体とし、打設後24時間目に脱型した。実験-IIの試験体は、脱型後直ちに、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $80 \pm 5\%$ の養生室内で4週間空中養生を行ったが、実験-Iの試験体は、脱型時にタイルを貼り、その後実験-IIと同様の養生を行った。試験体の個数は、各要因毎に1個とした。試験体の概要を、図-1(a) および (b) に示す。

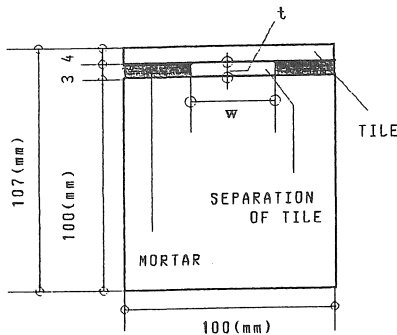
2.3 計測・処理方法

本実験で採用した計測方法のうち、反射法については別報³⁾と同様の計測・処理方法を用いたが、この他の検出超音波の位相変化に着目したランプ法⁶⁾、到達時間に着目した近距離迂回法⁶⁾ および修正

Table 1 Mix proportions and measured consistencies.

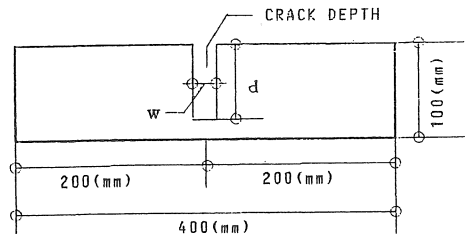
Medium	W/C (%)	Unit Weight (kg/m^3)				Consistencies
		water	Cement	Sand	Gravel	
Mortar	60	352	587	1174	-	298
Mortar ¹⁾	60	352	587	1585	-	262
Concrete	60	200	333	740	1060	19.2

[Notes] Consistencies: Flow for mortar and Slump (cm) for Concrete. 1): Bonding agent for tile.



(a) Experiment-I.

[NOTES]
 $w = 0, 10, 20, 40, 60\text{mm}$
 $t = 0, 0.5, 1, 2, 3\text{mm}$



(b) Experiment-II.

[NOTES]
 $d = 0, 20, 40, 60, 80\text{mm}$
 $w = 0, 0.5, 1, 2, 4\text{mm}$

Fig.1 Sizes and proportions of specimens.

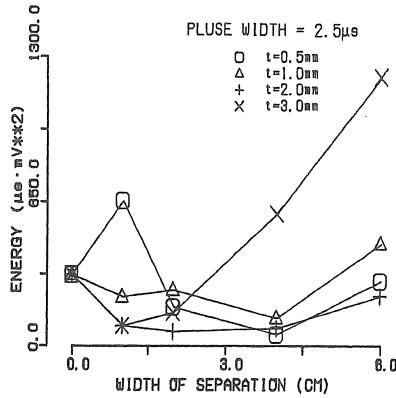


Fig. 2 Energy of measured wave (Experiment-1)

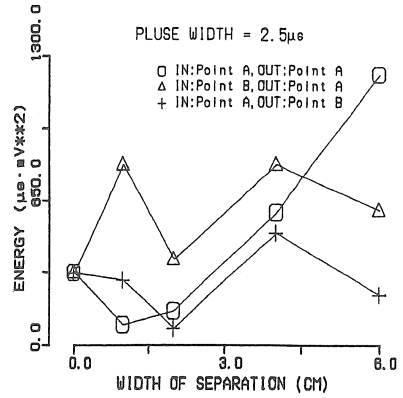


Fig. 3 Energy of measured wave (Experiment-1)

BS-4408法によるひび割れ深さの推定手順の概要は以下の通りである。すなわちランプ法は、ひび割れ先端で回折した波動の鉛直方向の変位位相が回折角に応じて変化することを利用した測定方法（コンクリートでは、この限界回折角は90度とされている）であり、縦波用入・検出用変換子設置間隔をひび割れを中心として対称に徐々に大きくさせながら計測を繰り返し、検出波形の初動方向が反転したときの変換子の間隔を測定して、その値の1/2をひび割れ深さとする方法である。一方、近距離迂回法は、ひび割れのごく近傍にひび割れを挟んで縦波用入・検出用変換子を設置し、入力した超音波の縦波がひび割れの底を往復して戻ってきた伝播時間から、ひび割れの深さを推定する方法である。また、修正BS-4408法は、ひび割れ開口部を中心として、縦波用入・検出用変換子を80mmおよび160mm間隔に配置した時の各伝播時間より、式(1)を用いてひび割れ深さを求める方法である。

$$d = 80 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、d : ひび割れ深さ (mm)、
 t₁ : 80mm間隔時の伝播時間、
 t₂ : 160mm間隔時の伝播時間。

3. 実験結果とその考察

3.1 タイルの剥離評価 (実験-I)

(1) 検出超音波の波形特性とタイルの剥離状況との関係: 検出透過超音波の各種特性パラメータのうち、入・検出用変換子を共に剥離部に設置した場合の超音波のエネル

ギー (Et) とタイルの剥離幅との関係を図-2に示す。この図によれば、エネルギーは、一般にタイルの剥離幅が大きくなるとともに増加する傾向を示すことが分かる。これは、剥離部でタイルが膜振動を起こし、剥離幅の増加とともに膜振動が助長されるためと思われる。また、図には示していないが最大振幅 (AMPmax) もタイルの剥離幅が大きくなるとともに増加する傾向を示した。次に、図-3は、検出波形のエネルギー (Et) とタイルの剥離幅との関係に及ぼす変換子の設置位置の影響を示したものであるが、入・検出用変換子を共に剥離部に設置した場合の方がタイルの剥離幅の影響を顕著に受けているのが分かる。

(2) 試験体の周波数応答特性とタイルの剥離状況との関係: 表-2および表-3は、それぞれコンクリートの周波数伝達関数の最大振幅およびエネルギー

Table 2 Relative maximum amplitudes of frequency transfer function for each 50kHz frequency range (Experiment-1)

w (mm)	Relative maximum amplitudes for each frequency range (kHz)					
	10-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
0	0.2454	0.3729	0.6631	1.0000	0.2567	0.1215
10	0.2433	0.6687	0.8899	1.0000	0.1297	0.1960
20	0.7027	0.9437	1.0000	0.2024	0.1440	0.0779
40	0.4255	1.0000	0.4721	0.4549	0.5043	0.1136
60	0.4404	0.5540	1.0000	0.5854	0.3040	0.3692

Table 3 Relative energy components of frequency transfer function for each 50kHz frequency range (Experiment-1)

w (mm)	Relative energy components for each frequency range (kHz)					
	10-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
0	0.0549	0.0651	0.1750	0.6020	0.0870	0.0160
10	0.0300	0.1918	0.3051	0.4068	0.0206	0.0457
20	0.2117	0.3407	0.4083	0.0191	0.0151	0.0048
40	0.2038	0.2583	0.2232	0.1371	0.1634	0.0141
60	0.1457	0.1776	0.2899	0.1662	0.1012	0.1192

Table 4 Result for estimation of crack depth (Experiment-II) .

Medium	Crack width (mm)	Crack width d (mm)	Method- B		Method- C		Method- D	
			d _{est.} (mm)	Error (mm)	d _{est.} (mm)	Error (mm)	d _{est.} (mm)	Error (mm)
Concrete	2.0	20	28	+8	37.5	+17.5	28.5	+8.5
		40	48	+8	68.3	+28.3	65.5	+25.5
		60	69	+9	91.6	+31.6	102.1	+42.1
		80	80	0	103.8	+23.8	106.4	+26.4
		Average of error (%)		12.5		50.6		51.3
Mortar	2.0	20	25	+5	21.1	+1.1	8.9	-11.1
		40	42	+2	58.8	+18.8	60.7	+20.7
		60	61	+1	76.6	+16.6	64.5	+4.5
		80	79	-1	98.1	+18.1	122.9	+42.9
		Average of error (%)		4.5		27.3		39.6
Total average of error (%)			8.5		39.0		45.4	

[Notes] d_{est.}: Value of estimation for crack depth.

一を、50kHzの周波数帯域毎に分類して示したものである。なお、これらの表に示した値は、いずれも10～300kHzの全周波数領域における最大振幅およびエネルギーで除して無次元化してある。これらの表によれば、周波数伝達関数の最大振幅は、タイルの剥離がない場合には、150～200kHzの周波数帯に存在し、次いで100～150kHzの周波数帯の成分が卓越しているが、タイルの剥離幅が増加すると、150kHz以下の周波数帯の局所最大振幅が増加し、逆に150kHz以上の周波数帯のそれが減少するのが分かる。

一方、周波数伝達関数のエネルギー成分は、タイルの剥離がない場合には、150～200kHzの周波数成分が全エネルギーの約60%を占め、100～150kHzの周波数成分が約18%、10～50kHz、50～100kHz および200～250kHzの周波数成分が約5～9%、250～300kHzの周波数成分が約2%となっており、全体として150～200kHzの周波数成分が著しく卓越した周波数特性となっているが、タイルの剥離幅が増加するとともに、150～200kHzの周波数成分が著しく減衰するのに対して、10～50kHz、50～100kHzおよび100～150kHzの周波数成分は逆に増大する傾向を示し、剥離幅が60mmの場合になると、100～150kHzの周波数成分が全エネルギーの約30%、50～100kHzおよび150～200kHzの周波数成分が約18%、残りの約30%を10～50kHz、200～250kHzおよび250～300kHzの周波数成分が、それぞれ約15%、約10%および約10%となり、全体的にみれば比較的フラットな周波数特性となっている。

以上のことから、タイル剥離幅が増加し剥離部の膜振動が激しくなると、150kHz以下の低周波数成分が卓越するようになるといえる。

3・2 ひび割れ深さの推定 (実験-II)

(1) ひび割れ深さの推定結果：表-4は、各種方

法を用いてひび割れ深さを推定した結果の一覧である。この表によれば、検出波形の位相変化を利用したランプ法による推定誤差は全平均で8.5%、近距離迂回法の場合が39.0%、修正BS法の場合が45.4%となり、ランプ法がひび割れ深さの推定に対して最も優れていることが分かる。また、推定精度は、一般にひび割れ深さが深いほど、かつコンクリートよりも均質なモルタルの方が良くなっているのが分かる。これは、コンクリートの場合、粗骨材の存在により超音波が減衰するためと思われる。なお、表にはひび割れ幅が2.0mmの場合の結果のみを示してあるが、ひび割れ幅が0.5、1.0および4.0mmの場合においてもほぼ同様の結果が得られた。

(2) 検出超音波の波形特性とひび割れ深さとの関係：図-4および図-5は、検出超音波の各種特性パラメータのうち、それぞれモルタル中を伝播した超音波の最大振幅 (AMPmax) およびエネルギー (Et) とひび割れ深さとの関係を示したものである。これらの図によれば、ひび割れ深さが増加するとともに最大振幅およびエネルギーは、減少する傾向にある

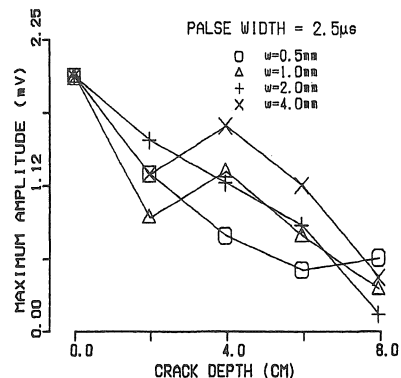


Fig.4 Maximum amplitude of measured wave (Experiment-II) .

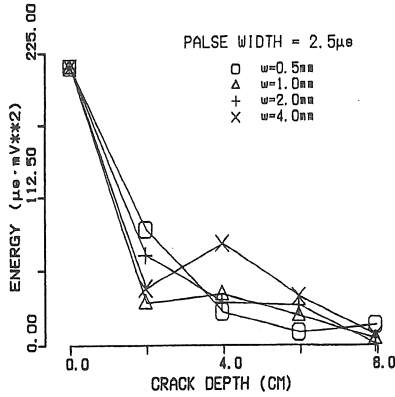


Fig. 5 Energy of measured wave (Experiment-II)

ことが分かる。これは、ひび割れ深さが増加するに従って超音波の伝播距離が長くなるため、超音波が伝播過程で減衰するためと思われる。なお、図には示していないが、コンクリートの場合においても同様な結果が得られた。

(3) 試験体の周波数応答特性とひび割れ深さとの関係：表-5および表-6は、それぞれモルタルの周波数伝達関数の最大振幅およびエネルギーを、表-2および表-3と同様の方法で50kHzの周波数帯域毎に分類して整理した結果の一例である。これらの表によれば、周波数伝達関数の最大振幅は、ひび割れ深さにかかわらずほぼ200~250kHzの周波数帯に存在し、ひび割れ深さの増加とともに10~50kHzの周波数帯の局所最大振幅が増大するのが分かる。ただし、その他の周波数帯の相対局所最大振幅は、ひび割れ深さの影響をほとんど受けない。

一方、周波数伝達関数のエネルギー成分は、ひび割れが存在しない場合には、200~250kHzの周波数成分が全エネルギーの約82%となっており、残りの約20%を10~50kHz、50~100kHz、100~150kHz、150~200kHzおよび250~300kHzの周波数成分が、それぞれ約1%、約4%、約3%、約9%および約7%を占め、全体としては200~250kHzの周波数成分が著しく卓越した周波数特性となっているが、ひび割れ深さが増加するとともに200~250kHzの周波数成分が減衰し、逆に10~50kHzの周波数成分が増大する傾向を示している。

以上のことから、ひび割れ深さが増大し超音波の伝播距離が増加するに従い、10~50kHzの低周波成分が卓越した周波数特性を示すようになるといえる。

4. 結論

本研究では、弾性波法を適用したコンクリートの非破壊試験方法を確立するための基礎的研究として、弾性波法によるタイルの剥離推定並びにひび割れ深さ推定への可能性について検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、およ次のようにまとめられる。

- 1) タイルの剥離状況が同一であっても、入力・検出用変換子の設置位置によって計測結果が著しく相違する。一般に、タイル剥離部に入力・検出用変換子を設置した場合がタイルの剥離状況の変化に対して最も敏感に反応する。
- 2) タイルの剥離幅の増加に伴って、検出波形の最大振幅およびエネルギーは増加し、コンクリートの周波数応答特性は、150kHz以下の低周波数成分の卓越した特性へと移行する。
- 3) 本実験で採用した測定方法の中では、ランプ法によるひび割れ深さの推定精度が最も優れていた。また、均質なモルタルに対する推定精度に比べ、非均質なコンクリートの場合には、推定精度はかなり低下する。
- 4) ひび割れ深さの増加に伴って、検出波形の最大振幅およびエネルギーは減少し、モルタルの周波数応答特性は、50kHz以下の低周波数成分の

Table 5 Relative maximum amplitudes of frequency transfer function for each 50kHz frequency range (Experiment-II).

d (mm)	Relative maximum amplitudes for each frequency range (kHz)					
	10-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
0	0.0898	0.1498	0.0997	0.0865	1.0000	0.1900
20	0.5376	0.2129	0.3994	0.0860	1.0000	0.1541
40	0.4920	0.1058	0.0848	0.1152	1.0000	0.0866
60	0.6638	0.0856	0.0526	0.1262	1.0000	0.3031
80	1.0000	0.1361	0.0618	0.0209	0.5686	0.0607

Table 6 Relative energy components of frequency transfer function for each 50kHz frequency range (Experiment-II).

d (mm)	Relative energy components for each frequency range (kHz)					
	10-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
0	0.0101	0.0433	0.0289	0.0890	0.8182	0.0707
20	0.1539	0.1004	0.0802	0.0134	0.6224	0.0469
40	0.1517	0.0178	0.0178	0.0089	0.7769	0.0223
60	0.1932	0.0082	0.0041	0.0123	0.6247	0.1562
80	0.6918	0.0000	0.0000	0.0000	0.2516	0.0000

卓越した特性へと移行する。

[謝 辞]

実験およびデータ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並びに愛知工業大学学部学生の太田純一君、岡田直人君および垣内一宏君に対して謝意を表します。また、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、謝意を表する。

[引用文献]

- 1) 山田和夫・土屋宏明・小阪義夫：超音波スペクトロスコー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、材料、第431号、pp. 956-965、(1989).
- 2) 山田和夫・小阪義夫：超音波スペクトロスコーピーによるアルカリ骨材反応を受けたモルタルの劣化度評価、日本建築学会東海支部研究報告集、第28号、pp. 45-48、(1990).
- 3) 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. 773-788、(1990).
- 4) 山田和夫・小阪義夫：超音波スペクトロスコーピー法によるコンクリートの劣化度評価に関する研究、第43回セメント技術大会講演集、第43巻、pp. 352-357、(1990).
- 5) 山田和夫・小阪義夫・山本正岳：超音波スペクトロスコーピーによるコンクリートの劣化度評価に関する研究（その3：アルカリ骨材反応を生じたモルタルの場合）、日本建築学会大会学術講演梗概集A（中国）、pp. 205-206、(1990).
- 6) 広野 進・山口哲夫：新しいコンクリートひび割れ深さ測定法と装置の開発、非破壊検査、第38巻、第4号、pp. 302-308、(1989).

受理 平成3年3月20日