

弾性波法を適用したひび割れ深さの 推定精度に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON NON-DESTRUCTIVE CRACK DEPTH EVALUATION BY ELASTIC WAVE METHOD

山田 和夫
Kazuo YAMADA

Abstract In this study, the elastic wave method was applied for estimating the crack depth, as the fundamental investigation to establish a new non-destructive testing method for concrete. In the experiments, the accuracies of depth estimations of the structural cracks occurred by flexural loading and of the artificial crack with its width = 1 mm were compared to examine the applicability of the elastic wave method. Following results were obtained in this study:

1) The accuracy of depth estimation by the modified BS-method is relatively good for the artificial crack, but is insufficient for the practical crack occurred in the concrete structure (see Table 2).

2) The maximum amplitude and energy of measured waveform and frequency transfer function are very affected by the crack depth, even if the crack is the microcrack occurred in the structure (see Figs. 4~7).

1. はじめに

コンクリート内部に発生したひび割れの深さを知ること、コンクリート構造物の耐久性診断および補修・補強対策上極めて重要であり、これまでも超音波法を適用したひび割れ深さ探査方法に関する数多くの研究成果が報告されている¹⁾。筆者も、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²⁾⁻⁷⁾および理論的研究⁸⁾⁻¹⁰⁾を行ってきたが、本研究はそれ

ら一連の研究の延長上のもので、コンクリート内部で実際に発生したひび割れの深さ探査を対象として、実験的に検討を行ったものである。

2. 実験方法

2.1 予備的考察

弾性波法を適用したひび割れ深さの推定方法としては、T₀-T₀法、近距離迂回波法、T法、BS法、修正BS法、位相反転法、反射波法など、各種の方法が提案されているが、筆者は、先にスリットによって製作した人工ひび割れを有する10 x 10 x 40 cm横打ち試験体を用いて各種弾性波法によるモル

タルおよびコンクリートのひび割れ深さの推定精度について比較検討を行い⁷⁾、その結果、実用性という点では修正BS法が最も優れているが、ひび割れ深さの推定精度という点では位相反転法が最も優れていることを報告した。しかし、その後実施した予備実験の結果、ひび割れが閉鎖した場合および肉眼では確認できないような微細なひび割れに対しては位相反転法は適用できないことが明らかとなったため、本実験では位相反転法は除外することとした。

また、本実験では、安定した曲げひび割れを発生させるために、鉄筋コンクリート（以下、RCと略記する）梁を用いることを計画したが、RC部材の場合、鉄筋が超音波の伝播特性に影響を及ぼす可能性があるため、15 x 15 x 53 cm寸法の無筋コンクリート梁、2D-13を配筋した単筋梁（かぶり厚さ=13.15 mm）および超音波が鉄筋を伝播するのを防ぐために直径20 mmのエンパイプで鉄筋を覆った単筋梁を用いて、超音波の伝播特性に及ぼす鉄筋の影響について検討を行った。その結果、この程度の配筋では超音波の伝播特性は鉄筋の影響を殆ど受けないことが明らかとなったため、本実験では上記のうち、2番目の方法を用いて試験体を製作することとした。

2.2 実験の概要

本研究では実験要因として、ひび割れの種類（曲げひび割れおよび人工ひび割れの2種類）、ひび割れの深さ（ $d = 49.5, 86.5$ および 98.0 mmの3種類）、探査の方法（反射法(Method-A)および修正BS-4408法¹¹⁾ (Method-B, Method-C)の2種類）、変換子の設置間隔（反射法では、ひび割れの中心か

Table 1 Mix proportions and measured slump.

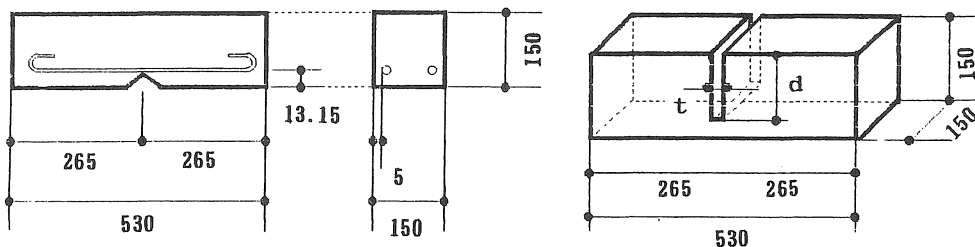
W/C (%)	Unit Weight (kg/m ³)				Slump (cm)
	water	Cement	Sand	Gravel	
60	200	333	740	1060	15.6

ら変換子までの距離 (ℓ) が 7.5 cm と 15 cm の2種類、修正BS法では、後述のひび割れの中心から変換子までの距離 a_1 が 80 mm とひび割れ深さの 0.4 倍の2種類)、並びに変換子の接着方法（両面テープ(反射法)およびグリース(修正BS法)の2種類)を取り上げた。

なお、反射法における入力パルス幅は従来の実験と同様に $2.5 \mu sec$ とした。

2.3 試験体の製作および養生方法

試験体の製作には、早強ポルトランドセメント（表乾比重 = 3.16 ）、天竜川産の川砂（表乾比重 = 2.60 、最大粒径 = 5 mm）および川砂利（表乾比重 = 2.65 、最大粒径 = 20 mm）を用いた。本実験で用いたコンクリートの標準調合表および実測スランプを表-1に示す。試験体は、図-1に示すような $15 \times 15 \times 53$ cmの横打ち角柱体とし、打設後24時間目に脱型した後直ちに温度 20 ± 1 °C、湿度 80 ± 5 %の養生室内で空中養生を行った。なお、曲げひび割れは、目標ひび割れ深さを 50 mm、 80 mm および 100 mmの3種類として、予備実験の結果を踏まえて、図-1(a)に示すようなノッチ付き単筋梁を中央集中曲げ荷重（曲げスパン： 45 cm）す



[Notes] $d=49.5, 86.5, 98.0,$
 $t=1$ (mm).

(a) Flexural crack.

(b) Artificial crack.

Fig.1 Sizes and proportions of specimens.

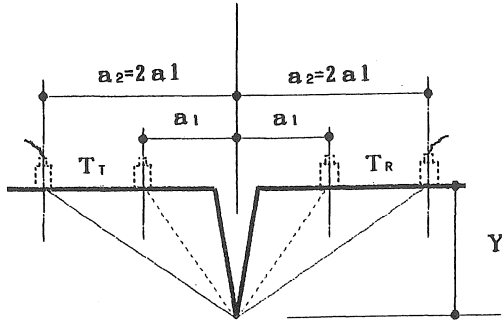


Fig.2 Measurement procedure of modified BS-method.

ることによって発生させた。ただし、実際のひび割れ深さおよびひび割れ幅は、倍率100倍の測微鏡を用いて実測した。また、人工ひび割れは、曲げひび割れ深さを実測した後、それらの深さに対応した幅1mmのスリットをコンクリート打設前に埋設して製作した。試験体の個数は、各要因毎に1個とした。試験材令は1週とした。

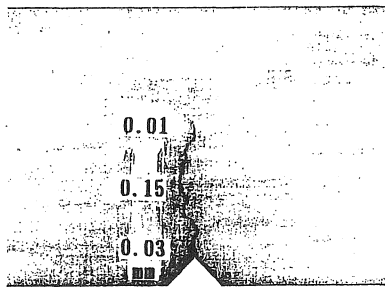


Fig.3 Crack occurred by flexural load. (Crack depth=86.5mm)

2.4 計測・処理方法

本実験で採用した測定方法のうち、反射法は別報と同様の計測・処理方法⁵⁾を用いた。また、修正BS-4408法¹¹⁾は、ひび割れ開口部の中心から入力・検出用変換子までの距離を a_1 および $a_2 (=2 \cdot a_1)$ として変換子を配置した時の各伝搬時間より式(1)を用いてひび割れ深さを求める方法である。なお、BS-4408法は、ひび割れ中心から変換子までの距離を変換子の内側で算定しているが、修正BS-4408法では変換子の中心位置で算定している点が相違している(図-2参照)。

$$d = a_1 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 d : ひび割れ深さ(mm)、 t_1 : a_1 間隔時の伝搬時間、 t_2 : a_2 間隔時の伝搬時間。

3. 実験結果とその考察

3.1 ひび割れ深さの推定結果

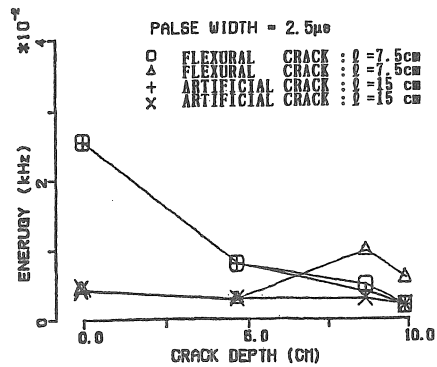
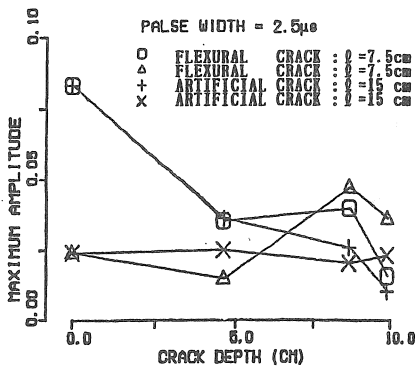
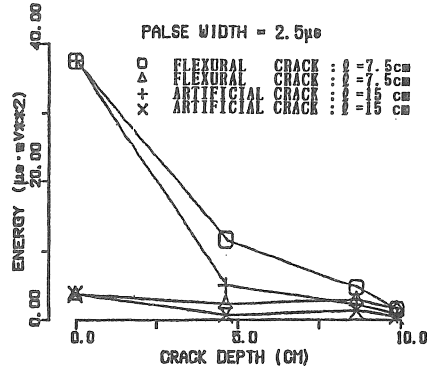
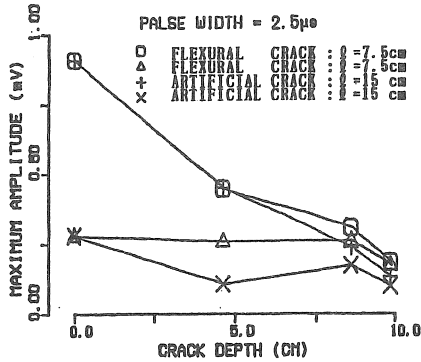
図-3は、曲げ載荷試験によって生じた曲げひび割れの発生状況をスケッチしたものであるが、ノッチ付き試験体を用いることによって、曲げひび割れは、ほぼノッチ先端から発生していることが分かる。

表-2は、修正BS-4408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、スリットを用いて人工的に製作したひび割れの場合には、ひび割れ深さの推定精度は非常に優れているが、曲げ載荷試験によって発生した曲げひび割れの場合には、ひび割れ深さの推定結果は、全体的に実測値よりも小さく推定しており、スリットを用いて製作

Table 2 Result for estimation of crack depth.

Crack kinds	Crack depth (mm)	Crack width (mm)	Method (B)			Method (C)		
			$d_{est.}$ (mm)	Error (mm)	Error (%)	$d_{est.}$ (mm)	Error (mm)	Error (%)
Flexural Crack	49.5	0.005	55.40	5.90	11.92	41.98	7.52	15.19
	86.5	0.001	59.56	26.96	31.15	70.40	16.10	18.61
	98.0	0.005	73.18	24.82	25.33	50.27	47.73	47.04
Average of error (%)			22.80			26.95		
Artificial Crack	49.0	1.000	54.91	5.91	12.07	54.13	5.13	10.46
	86.5	1.000	97.83	11.33	13.10	83.44	3.06	3.54
	100.0	1.000	108.35	8.35	8.35	90.25	9.75	9.75
Average of error (%)			11.17			7.92		
Total Average of error (%)			16.99			17.41		

[Notes] $d_{est.}$: Value of estimation for crack depth, Method (B) : $a_1=8$ (cm), Method (C) : $a_1=0.4 \times$ Crack Depth (cm).



した人工ひび割れに比べて推定精度はかなり劣っていることが分かる。この原因としては、曲げ載荷試験によって発生した実際のひび割れの幅が極めて小さいこと（図-3 参照）、並びに本実験では試験体中央にノッチを設けてひび割れがノッチ先端から発生するように工夫したが、実際のひび割れ進展状況は非常に複雑で、ひび割れの近傍に別の独立したひび割れが存在しているものがあったこと、ひび割れが連続していないものがあったこと、ひび割れが途中で閉鎖しているものがあったこと、などが考えられる。なお、本実験では、ひび割れの中心から変換子までの距離 a_1 を 80 mm に固定した場合と、 a_1 と a_2 とで検出波形の初動部の位相が反転しないように a_1 をひび割れ深さの 0.4 倍とした場合の 2 種類の方法を採用したが、本実験の範囲では、ひび割れ深さの推定精度は a_1 の値にかかわらずほぼ同程度であった。

3.2 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、反射法を用いた場合に得られた検出超音波の各種特性パラメータのうち、それぞれコンクリート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変換子の設置間隔およびひび割れの種類別に示したものである。これらの図によれば、検出波形の最大振幅およびエネルギーは、ひび割れ深さの増加とともに減少する傾向を示すことが分かる。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、超音波が伝播過程において減衰するためと思われる。特に、肉眼では確認できないような微細な曲げひび割れに対しても、検出波形の最大振幅およびエネルギーがひび割れ深さの影響を顕著に受けていることは注目値する。

3.3 試験体の周波数応答特性とひび割れ深さとの関係

図-6 および図-7 は、反射法を用いた場合に得られたコンクリートの周波数伝達関数の各種特性パラメータのうち、最大振幅（AMPmax）およびエネルギー

ギー (E_t) とひび割れ深さとの関係を変換子の設置間隔およびひび割れの種類別に示したものである。これらの図から分かるように、周波数伝達関数の最大振幅およびエネルギーは、検出波形の特性パラメータの場合と同様に、ひび割れ深さの増加とともに減少する傾向を示す。

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、およそ次のようにまとめられる。

- 1) ひび割れ深さの推定方法として修正BS法を用いた場合、スリットで製作した人工ひび割れに対しては推定精度は良好であったが、曲げ載荷試験によって発生した曲げひび割れに対しては実測値よりもかなり小さく推定してしまう結果となった。
- 2) 検出波形および周波数伝達関数の最大振幅およびエネルギーは、スリットで製作した人工ひび割れだけでなく、肉眼では確認できないような微細な曲げひび割れに対しても、ひび割れ深さの増加に伴って著しく減少する傾向を示した。

【謝 辞】

実験およびデータ整理に際して御助力を得た本学大学院生の山本正岳君、ならびに学部学生の浅井陽一君、田中宏志君、大野智幸君および佐々木伸治君に対して謝意を表します。なお、本研究費の一部は、石田財団の研究助成金によることを付記する。

【参考文献】

- 1) 明石外世樹・尼崎省二：コンクリートの非破壊試験の現状と趨勢、コンクリート工学、Vol. 23、No. 12、pp. 11-20、1985. 12
- 2) 山田和夫・小阪義夫：極低温化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
- 3) 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、材料、第8巻、第431号、pp. 956-965、1989. 8
- 4) 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. 6
- 5) 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
- 6) 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、第1号、pp. 491-496、1991. 6
- 7) 山田和夫・山本正岳：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、セメント・コンクリート論文集、No. 45、pp. 394-399、1991. 12
- 8) 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
- 9) 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解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、第1号、pp. 485-490、1991. 6
- 10) 山田和夫・山本正岳：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、セメント・コンクリート論文集、No. 45、pp. 400-405、1991. 12
- 11) 尼崎省二：耐久性診断と非破壊検査方法－超音波－、コンクリート工学、Vol. 26、No. 7、pp. 120-122、1988. 7

(受理 平成4年3月20日)