

# 超音波法によるコンクリートのひび割れ深さの測定およびひび割れ透過性

村上祐治<sup>\*1</sup>・齋藤 淳<sup>\*1</sup>・橋本竜也<sup>\*2</sup>

コンクリートのひび割れは外力、環境などの作用によって生じ、ひび割れ深さが問題になることがある。ひび割れ深さを推定する非破壊試験方法として、Tc-T0 法、修正 BS 法、直角回折法がある。本論文は、これらのひび割れ深さ測定方法の改善を目指して、コンクリートの材齢、受信子のひび割れからの距離  $a$  を調査検討した。その結果、ひび割れ深さ測定方法に関して測定精度、最適な測定方法を明確にした。さらに、ひび割れ幅と超音波速度の関係を検討した。

キーワード：コンクリート、品質、ひび割れ、超音波、ひび割れ深さ、超音波速度

## 1. はじめに

非破壊検査によりコンクリートの品質を測定するために、超音波法が用いられている。土木分野で適用される超音波の周波数範囲は、数 kHz～数 100kHz であり、機械分野(数 10kHz～1MHz)や医療分野(10MHz～1GHz)と比較して低い。コンクリートの品質を明らかにするために用いられている超音波は P 波(縦波)が多い。

超音波がコンクリート中を伝播することに注目すると、コンクリートに接触している発振接触子から超音波のパルス信号が発振されて、コンクリート中を P 波が伝播していく。受信接触子に到達した第一波目の P 波の立上り時間により発振接触子と受信接触子の伝播時間差を測定することができる。発振接触子と受信接触子との距離、すなわち、既知区間の距離を伝播時間で除して超音波速度を得ることができる。

超音波法によるコンクリート構造物の品質評価技術のうち、この超音波速度は、コンクリートの品質を表す指標として使用されている例がある[1]。アメリカでは、超音波伝播速度から定量的にコンクリート構造物の品質を評価する基準を提案している。超音波速度とコンクリートの品質は基本的には良好な相関関係にあるため、Whitehurst は表-1 に示す縦波速度とコンクリートの品質を評価する表を公表している。

また、コンピュータグラフィを用いたコンクリート品質評価システムを構築している例がある[2]。これは、コンクリートの品質を明らかにすることを目的にして、コンクリート構造物の表面部に接触子を取付け、その区間の超音波伝播時間を測定して、コンクリート断面の超音波速度分布を明らかにするものである。また、こ

のコンクリート品質評価システムは超音波速度からコンクリートの力学特性を推定することができることが特長である。

また、コンクリートに生じるひび割れはコンクリート構造物の劣化度を判断する一つの指標であり、評価項目である。コンクリートに生じたひび割れ深さについてもコンクリート構造物のひび割れの影響度を知る上で必要な情報である。一般に、超音波法によるコンクリートに生じたひび割れ深さを測定する手法として、Tc-T0 法、修正 BS 法、直角回折法がある[3]。このひび割れ深さの測定方法に関するコンクリートの材齢、強度などの影響がどの程度、ひび割れ深さの測定精度に影響するかが課題であり、また、ひび割れ幅によっては超音波が透過してしまうことも考えられる。

本論文は、超音波法によってコンクリートに生じたひび割れ深さをコンクリートの材齢、強度を変化させて測定し、その測定方法についての測定精度を把握するとともに、コンクリートに生じたひび割れ幅によって超音波速度の相違を検討したものである。

表-1 縦波速度とコンクリートの品質[1]

縦波速度 $V_l$ (ft/s)	$V_l$ (m/s)	コンクリートの 品質評価
15000 以上	4570 以上	優
12000～15000	3660～4570	良
10000～12000	3050～3660	やや良
7000～10000	2130～3050	不良
7000 以下	2130 以下	不可

(コンクリート単位容積重量 2400kg/m<sup>3</sup>)

\*1 技術研究所 \*2 K S K 技術開発部

## 2. 超音波法によるひび割れ深さの測定概要

コンクリートに生じたひび割れ深さを測定する方法として超音波法がある。その方法は Tc-T0 法、修正 BS 法、直角回折法などが一般的な方法である。それぞれの方法について、以下に説明を加える。

### (1) Tc-T0 法[3]

発信接触子と受信接触子をひび割れからそれぞれ距離  $a$  に設置した場合、健全部のコンクリートにおいて距離  $2a$  に設置した場合の伝播時間  $T_c$  および  $T_0$  から、式-1によりひび割れ深さ  $y$  を計算する方法である。なお、伝播時間  $T_c$  はひび割れを介した場合の  $2a$  区間の測定時間であり、伝播時間  $T_0$  は健全な部分の  $2a$  区間の測定時間である。

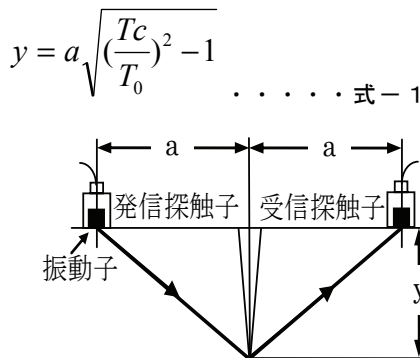


図-1 Tc-T0 法

### (2) 修正 BS 法[4]

BS (英国規格 1881, Part203) に規定されている方法であり、発信接触子と受信接触子をひび割れから 15cm, 30cm とした場合を BS 法とされている。この BS 法を任意にひび割れからの距離に置き換えることが出来る修正 BS 法が一般に用いられている。

発信接触子と受信接触子をひび割れから等間隔  $a_1$  および  $a_2$  ( $=2a_1$ ) に設置した場合に測定した伝播時間  $T_1$

$$y = a_1 \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \dots \dots \text{式-2}$$

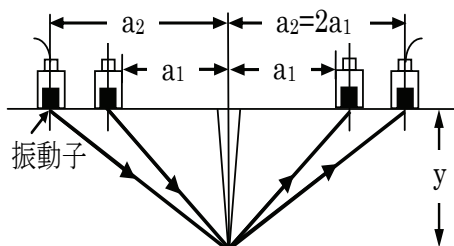
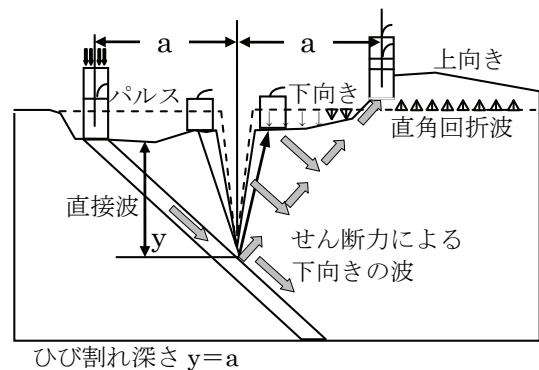


図-2 修正 BS 法

および  $T_2$  から、式-2によりひび割れ深さ  $y$  を計算する方法である。

### (3) 直角回折法[5]

ひび割れを挟んで発信接触子と受信接触子を等間隔に設置し、低周波数の P 波を伝播させると、下向きの直接波と動ポアソン効果により直接波と直角方法に P 波が発生する。 $a$  が小さい場合には、下向きの直接波により発生したせん断力により受信接触子に下向きの波が受信される。 $a=y$  のときは、ひび割れ先端において直接に回折した波が受信接触子に到達するため、波は下向きから上向きに変化する。この  $a$  をひび割れ深さとする方法である。



測定原理図

図-3 直角回折法

## 3. ひび割れ模擬試験体における超音波法によるひび割れ深さの測定概要

### 3.1 コンクリートのひび割れ試験体の概要

ひび割れ模擬試験体に関するコンクリートの材料および配合を表-2に示す。

コンクリートのひび割れを模擬したひび割れ試験体の一例を図-4、写真-1に示す。ひび割れ試験体は長さ 1000×幅 100×高さ 500mm の試験体であり、ひび割れ深さは 50mm ごとに 50, 100, 150, 200, 250, 300mm とし、そのひび割れ幅は 0.8mm である。なお、模擬ひび割れの製作方法は、あらかじめ、所定のひび割れ深さのテフロンシート (厚さ 0.8mm) を設置しておいてコンクリートを打込み、コンクリートの硬化を確認後、テフロンシートを除去する方法で製作した。

表-2 コンクリートの材料および配合

項目	材料名
水	回収水（上澄水）
セメント	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	栃木県栃木市尻内町産，密度 2.61g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	栃木県栃木市尻内町産，密度 2.63g/cm <sup>3</sup>
混和剤	AE 減水剤標準形（I 種）
	ポゾリス 78S（T）

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 Ad.
20.0	12±2.5	4.5±1.5	60.5	47.1	167	276	861	973	2.760

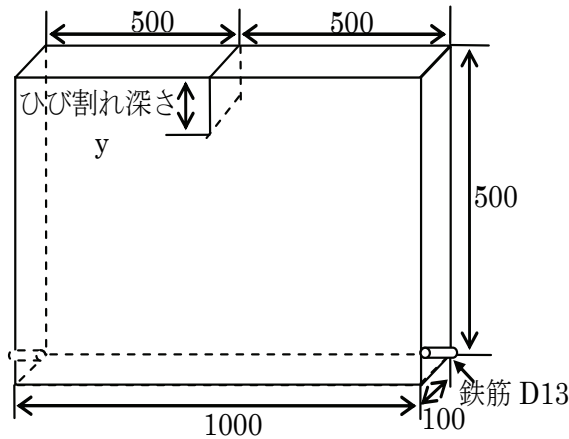


図-4 模擬ひび割れ深さ試験体（単位：mm）



写真-1 ひび割れ模擬試験体の一例写真  
(ひび割れ幅：0.8mm，ひび割れ深さ：150mm)

### 3.2 コンクリートの力学特性およびひび割れ深さの測定材齢

コンクリートの力学特性の一覧表を表-3に示す。  
コンクリートのひび割れ深さの測定は、Tc-T0法、修正BS法、直角回折法の3方法を実施した。ひび割れ深さを測定したコンクリートの材齢は7日、28日、126日であり、それぞれコンクリートの圧縮強度は29.4、33.2、33.0N/mm<sup>2</sup>であり、材齢7日の圧縮強度は土木学会式の双曲線による推定値である。なお、ひび割れ試験体は屋内に養生してあり、乾燥状態におけるひび割れ深さ測定である。

### 3.3 測定結果

#### (1) ひび割れ深さの測定結果

各材齢における各測定法のひび割れ深さの一覧表を表-4に示す。なお、修正BS法のひび割れ深さをひび割

れからの距離aに記述し、ひび割れ深さの測定はひび割れからの距離のaと2a区間で行った。

- (2) ひび割れからの距離aと推定ひび割れ深さの関係  
ひび割れからの距離aと推定ひび割れ深さの関係を図-5に示す。

表-3 コンクリートの力学特性一覧表

材 齢 (日)	圧縮強度				引張強度		
	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>4</sup> ) (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	超音波伝播速度 (m/s)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	超音波伝播速度 (m/sec)
12	2,296	29.40	2.704	0.176	4,151	3.06	4,176
28	2,286	33.22	2.852	0.173	4,181	3.34	4,134
126	2,245	33.01	2.907	0.169	4,112	2.80	4,087

表-4 各測定法のひび割れ深さの一覧表

設定ひび 割れ深さ (mm)	ひび割れ からの距 離 <sup>a</sup> (mm)	材齢7日			材齢28日			材齢126日		
		T <sub>c</sub> -T <sub>0</sub> 法	修正BS 法	直接回 折法	T <sub>c</sub> -T <sub>0</sub> 法	修正BS 法	直接回 折法	T <sub>c</sub> -T <sub>0</sub> 法	修正BS 法	直接回 折法
50	50	72.1	71.7	60.0	63.1	75.6	60.0	64.1	71.6	24.5
	100	76.7	83.4		61.5	63.8		68.6	73.6	
	150	78.0	—		72.2	—		86.5	—	
	200	69.8	—		74.8	—		77.7	—	
100	50	106.6	106.0	97.5	101.2	114.8	97.5	99.5	95.4	100.0
	100	111.0	111.5		104.5	107.0		113.6	134.7	
	150	102.9	80.8		105.9	114.6		110.8	115.6	
	200	115.1	100.4		114.1	127.6		101.4	94.8	
	250	131.5	—		113.7	—		96.4	—	
	300	146.7	—		106.0	—		120.1	—	
	350	131.2	—		115.5	—		121.8	—	
	400	150.8	—		103.7	—		137.4	—	
150	50	154.3	143.6	157.5	140.1	130.4	157.5	137.7	137.8	149.0
	100	167.2	163.9		162.4	171.2		157.2	170.8	
	150	173.1	175.2		190.3	222.5		170.6	192.2	
	200	178.8	166.8		173.8	167.5		166.1	170.9	
	250	171.7	—		180.1	—		176.9	—	
	300	180.8	—		176.2	—		166.8	—	
	350	187.7	—		194.1	—		170.0	—	
	400	209.3	—		208.2	—		185.4	—	
200	50	126.0	95.9	190.0	88.2	104.8	220.0	71.4	38.2	165.0
	100	139.4	83.4		122.7	84.9		118.4	82.1	
	150	196.2	179.0		173.4	143.2		130.3	92.9	
	200	201.2	201.4		189.4	145.6		173.8	166.3	
	250	210.2	—		201.7	—		181.3	—	
	300	213.1	—		212.3	—		197.5	—	
	350	199.0	—		214.3	—		185.7	—	
	400	197.8	—		215.5	—		198.3	—	
250	50	277.7	258.8	252.5	270.5	235.6	248.5	236.7	309.6	249.0
	100	273.4	249.6		279.4	239.3		241.4	225.2	
	150	280.1	252.9		284.3	242.2		245.3	268.3	
	200	278.6	263.2		298.8	266.4		257.5	286.0	
	250	344.2	—		362.8	—		312.2	—	
	300	295.8	—		318.2	—		236.0	—	
	350	284.2	—		304.7	—		241.6	—	
	400	290.6	—		333.4	—		235.6	—	
300	50	291.8	242.7	302.5	270.0	221.5	285.0	255.6	229.1	292.5
	100	312.2	303.8		298.2	331.5		287.1	294.7	
	150	313.5	204.5		302.7	211.3		295.6	209.8	
	200	324.8	294.6		304.7	297.4		305.7	295.7	
	250	341.0	—		326.6	—		319.8	—	
	300	406.5	—		387.5	—		382.9	—	
	350	356.4	—		338.7	—		392.0	—	
	400	360.3	—		326.5	—		335.5	—	
450	362.0	—	327.8	—	329.1	—				

ひび割れからの距離  $a$  が長くなるにしたがい、 $T_c-T_0$ 法および修正 BS 法の推定ひび割れ深さは深く算定される傾向を示し、ひび割れからの距離  $a$  が 200mm の測定で実ひび割れ深さと同様なひび割れ深さとなっている。一方、直角回折法はバラツキがあるもの、ひび割れ深さとほぼ同様なひび割れ深さを測定している。

コンクリートの材齢および圧縮強度に着目すると、コンクリートの材齢が経過する、圧縮強度が増加するにしたがい、推定ひび割れ深さはバラツキがあるもの、実ひび割れ深さよりも短く推定する傾向にある。これは、コンクリートの材齢が経過すると、コンクリートの水和反応が進行し、コンクリート自体の圧縮強度も増進し、コンクリートの超音波速度が増加して健全部と劣化部の超音波速度の差がなくなる傾向となったことに要因すると思われる。

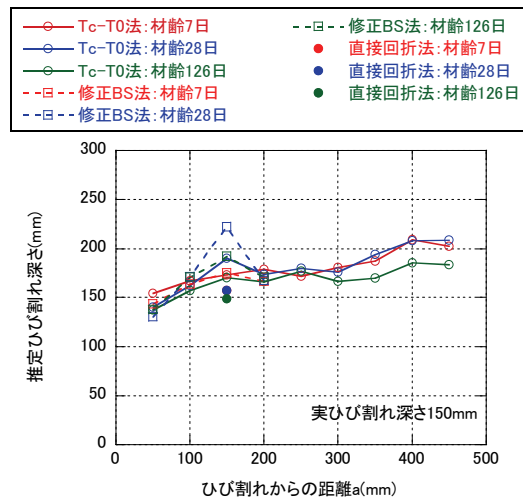


図-5(c) ひび割れからの距離  $a$  と推定ひび割れ深さの関係(実ひび割れ深さ=150mm)

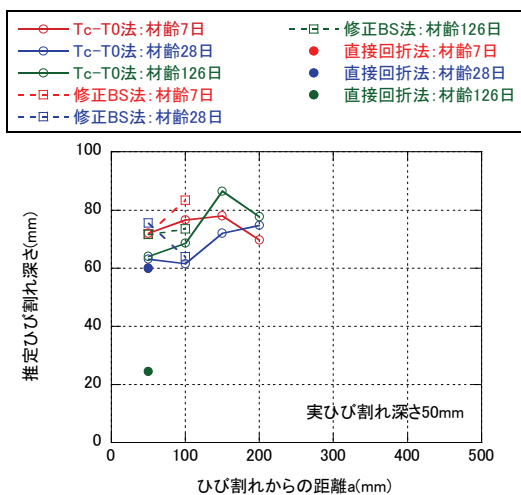


図-5(a) ひび割れからの距離  $a$  と推定ひび割れ深さの関係(実ひび割れ深さ=50mm)

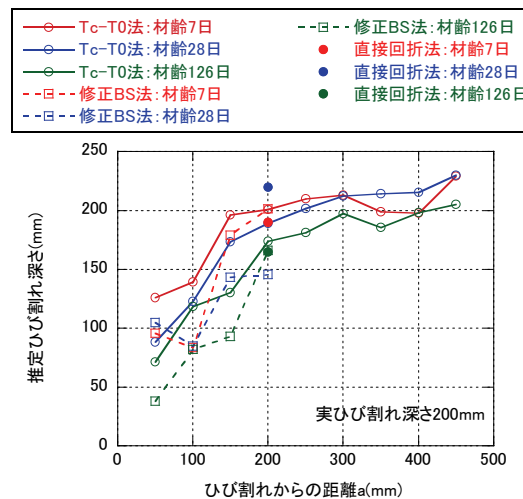


図-5(d) ひび割れからの距離  $a$  と推定ひび割れ深さの関係(実ひび割れ深さ=200mm)

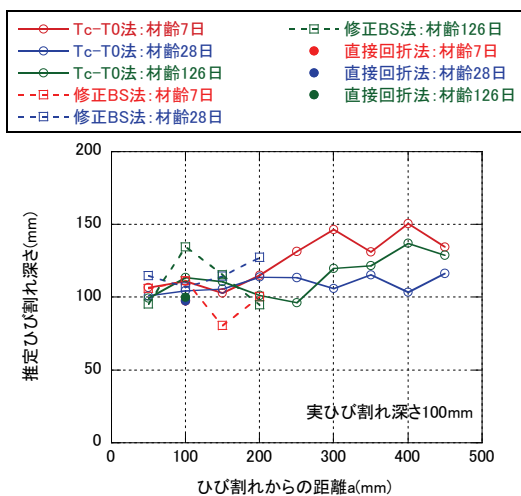


図-5(b) ひび割れからの距離  $a$  と推定ひび割れ深さの関係(実ひび割れ深さ=100mm)

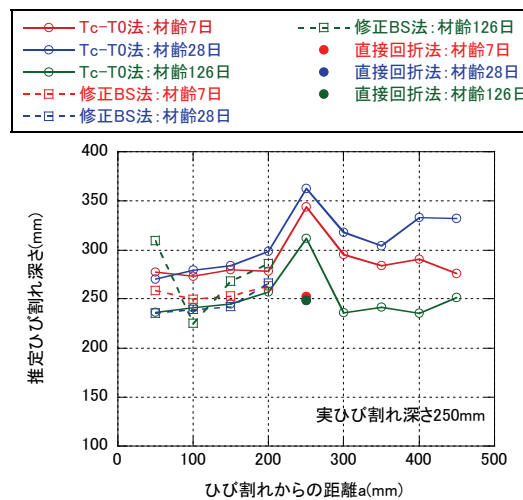


図-5(e) ひび割れからの距離  $a$  と推定ひび割れ深さの関係(実ひび割れ深さ=250mm)

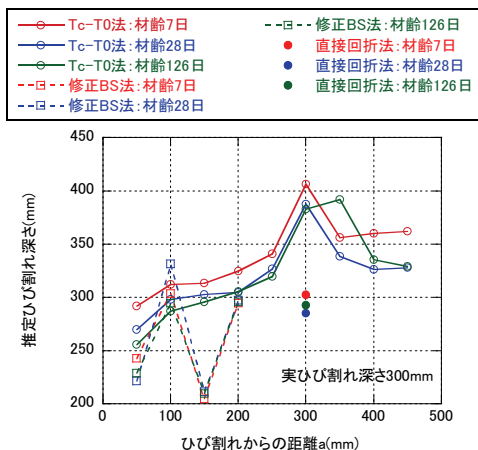


図-5 (f) ひび割れからの距離  $a$  と推定ひび割れ深さの関係(実ひび割れ深さ=300mm)

(3) 各ひび割れ深さ測定法の推定精度

ひび割れからの距離  $a=200\text{mm}$  における実ひび割れ深さと推定ひび割れ深さの関係を図-6に示す。なお、ひび割れ深さ 50mm のみのひび割れ深さ推定値は、ひび割れからの距離  $a=100\text{mm}$  として測定した結果である。

ひび割れからの距離  $a=200\text{mm}$  の場合、実ひび割れ深さと推定ひび割れ深さが各ひび割れ深さの測定方法ともほぼ一致していることが分かる。また、コンクリートの材齢が経過しても、ひび割れからの距離  $a=200\text{mm}$  では、実ひび割れ深さと推定ひび割れ深さはほぼ一致していることがわかる。

ひび割れからの距離  $a$  とひび割れ深さ推定の相関係数の関係を図-7、表-5に示す。ひび割れからの距離  $a$  が 150mm 以下までは、推定ひび割れ深さの相関係数が 0.9 以下のものがあるが、ひび割れからの距離  $a$  が 200mm 以上では、推定ひび割れ深さの相関係数が 0.9 以上を示している。その中でも、ひび割れからの距離  $a=200\text{mm}$  では、Tc-T0 法、修正 BS 法のほとんどで 0.95 以上の相関係数を示している。

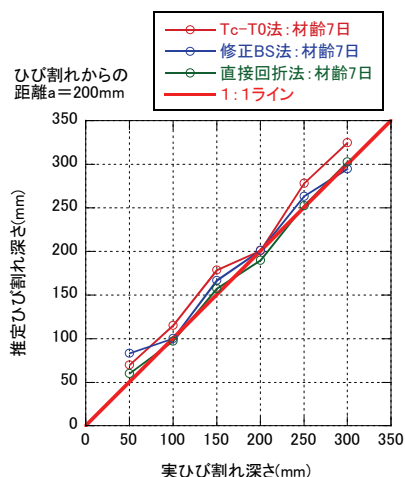


図-6 (a) 実ひび割れ深さと推定ひび割れ深さの関係

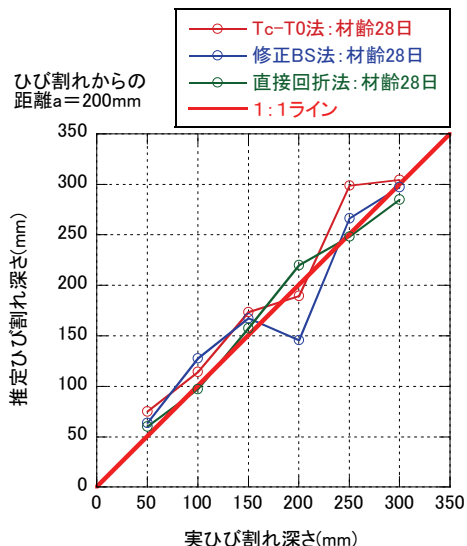


図-6 (b) 実ひび割れ深さと推定ひび割れ深さの関係

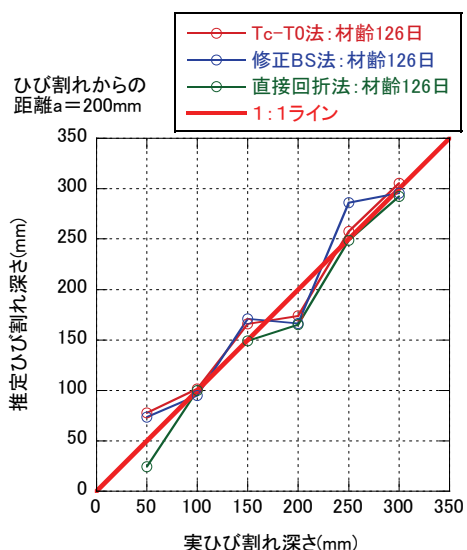


図-6 (c) 実ひび割れ深さと推定ひび割れ深さの関係

表-5 ひび割れ深さ測定方法に関するひび割れ深さの推定の相関係数の一覧表

ひび割れ測定法	ひび割れからの距離 $a$ (mm)	相関係数 $r$		
		7日	28日	126日
Tc-T0 法	50	0.921	0.863	0.836
	100	0.939	0.922	0.919
	150	0.989	0.965	0.921
	200	0.994	0.974	0.982
	250	0.955	0.922	0.956
	300	0.963	0.990	0.939
	350	0.976	0.985	0.930
修正 BS 法	50	0.853	0.867	0.688
	100	0.831	0.850	0.804
	150	0.819	0.613	0.584
	200	0.993	0.911	0.950
直接回折法		0.997	0.993	0.836



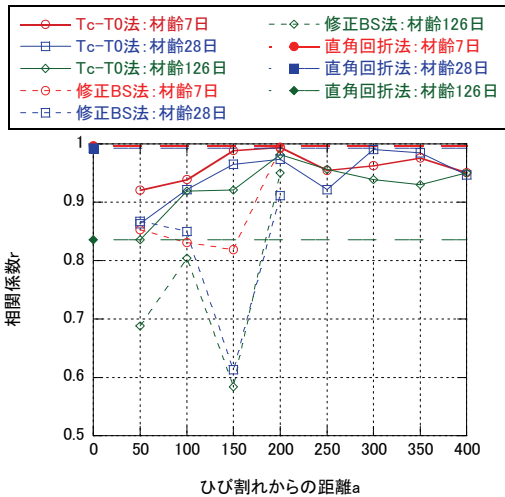


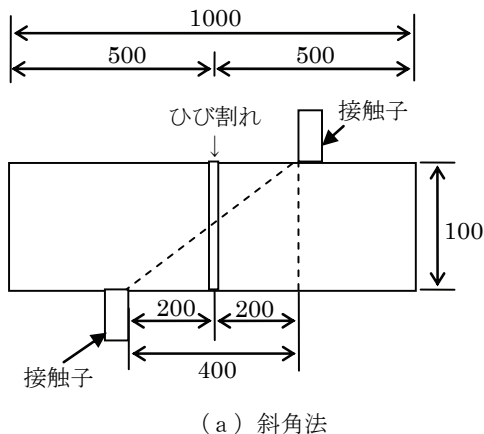
図-7 ひび割れからの距離 a とひび割れ深さ推定の相関係数の関係

以上のように、ひび割れ深さ測定法のうち Tc-T0 法、修正 BS 法は、ひび割れからの距離 a が 200mm の場合に推定ひび割れと実ひび割れ深さの相関係数が最大となり、ひび割れ深さの推定精度が最大値になっていることが分かった。

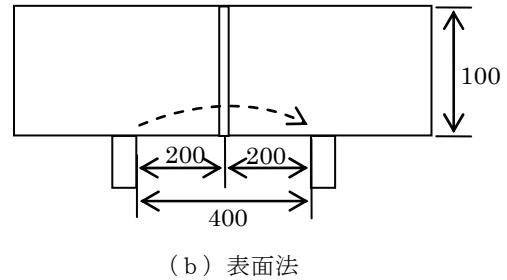
#### 4. ひび割れ幅と超音波速度の関係

##### 4.1 ひび割れ試験体の概要

図-4 と同様な形状寸法の試験体に、模擬ひび割れを入れずに、ジャッキの作用力を用いてコンクリート試験体にひび割れを発生させた。このひび割れ試験体に生じたひび割れ幅を 1cm 毎に測定し、ひび割れを挟んだ区間の超音波速度を、ひび割れ幅を測定した方法と同様に 1cm 毎に測定した。ひび割れからの距離 a は 200mm であり、測定方法は図-8 に示す斜角法と、表面法である。なお、斜角法および表面法によって測定した健全部の超音波速度は、それぞれ、4116m/sec, 4119m/sec である。



(a) 斜角法



(b) 表面法

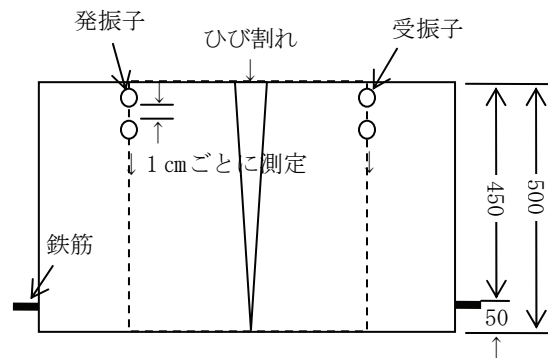


図-8 ひび割れ幅と超音波速度の測定方法

##### 4.2 ひび割れ幅と超音波速度の関係

斜角法および表面法に関するひび割れ幅と超音波速度の関係を図-9 に示す。

斜角法および表面法ともに、ひび割れ幅が大きくなるにしたがい、超音波速度は低下していることが分かる。ひび割れ幅 0.2mm を超える付近から超音波速度は低下している。ひび割れは 0.4mm 程度になれば、超音波速度は約 1/2 程度となり、ひび割れ幅 0.7mm を超えると、超音波速度は 1000m/sec となる。表-1 のコンクリートの超音波速度と品質の関係一覧表によれば、ひび割れ幅 0.5mm 以上となると、コンクリートの品質が「不可」となることが分かる。

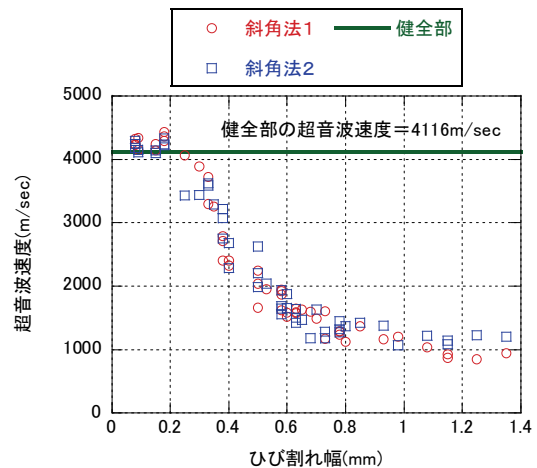


図-9 (a) 斜角法によるひび割れ幅と超音波速度の関係

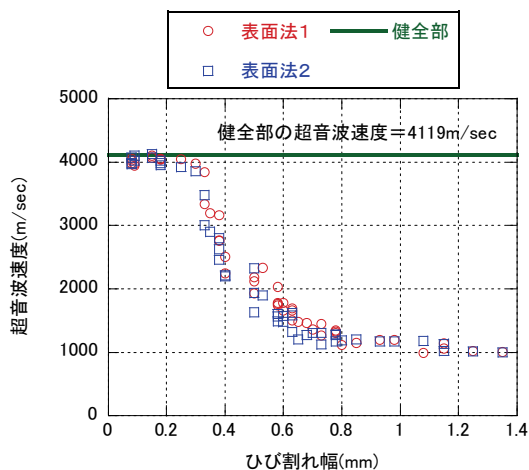


図-9 (b) 表面法によるひび割れ幅と超音波速度の関係

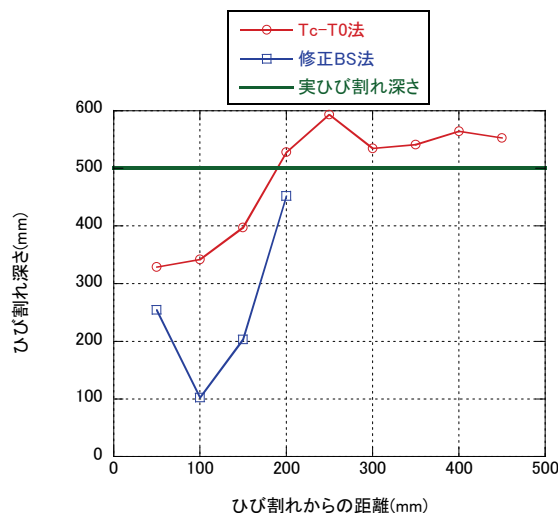


図-10 ジャッキの作用力によって製作したひび割れ試験体におけるひび割れからの距離とひび割れ深さの関係

### 4.3 ひび割れ深さの推定

ジャッキの作用力によって製作したひび割れ試験体に関するひび割れ深さを測定した。

ひび割れからの距離とひび割れ深さの関係を図-10に示す。ひび割れからの距離  $a=200\text{mm}$  における Tc-T0法のひび割れ深さは  $527.5\text{mm}$ 、修正 BS 法のひび割れ深さは  $452.0\text{mm}$  であり、実ひび割れ深さは試験体の高さ  $500\text{mm}$  である。同時に、直接回折法のひび割れ深さ測定はできなかった。なお、ジャッキによるひび割れは、試験体の下端部まで到達しており、その上端部のひび割れ幅が  $1.35\text{mm}$ 、下端部のひび割れ幅は  $0.08\text{mm}$  であった。

図-4に示すひび割れ幅の距離  $a$  が  $200\text{mm}$  の場合に関するひび割れ深さの推定値は、実ひび割れ深さに近い推定値になっている。今回のひび割れ深さは試験体寸法の高さである  $500\text{mm}$  であり、底面の反射波形の超音波伝播時間を測定している可能性もあり、このひび割れ深さが確実なひび割れ深さになっていないことが考えられる。

上記のように、ひび割れ深さは一応測定ができて実ひび割れ深さと同様の結果となった。一方、ひび割れ幅  $0.2\text{mm}$  以下の超音波は、4.2節にあるようにひび割れと感知せずに、超音波が透過してしまう可能性が高い。しかし、今回のひび割れ深さの測定値は実ひび割れ深さと同様になっていることは、試験体の反射の影響などが考えられる。実構造物に生じたひび割れは荷重外力条件、構造物の形状寸法の条件、コンクリートおよび鉄筋の材料強度および配筋条件などによって変化するものと考えられ、それらの条件を検討した上で、超音波法による推定ひび割れ深さを検討する必要がある。

### 5. まとめ

超音波法によるひび割れ深さの測定および、ひび割れ幅と超音波の透過性について検討を行った。その結果を以下に示す。

- (1) Tc-T0法および修正BS法は、ひび割れからの距離が長くなるにつれて、ひび割れ深さは深く測定される傾向にある。また、材齢に着目すると、材齢が経過するにしたがい、ひび割れ深さは深くなる傾向を示した。
- (2) ひび割れ深さ  $300\text{mm}$  までの範囲の場合、受信子のひび割れからの距離  $a$  と実ひび割れ深さの測定の関係は、ひび割れからの距離  $a$  が  $200\text{mm}$  の場合に相関係数が最も高い相関があった。
- (3) ひび割れ深さ  $300\text{mm}$  までの範囲の場合、ひび割れからの距離  $a$  が  $200\text{mm}$  における Tc-T0法の相関係数  $r$  は材齢に依存なく、 $0.974\sim 0.994$  であった。修正BS法の相関係数  $r$  は、 $0.911\sim 0.993$  であった。直角回折法は  $0.836\sim 0.997$  であった。
- (4) ひび割れ幅と超音波速度の関係は密接な関係があり、ひび割れ幅  $0.2\text{mm}$  までは超音波速度はひび割れがない健全なコンクリートと同様であるが、ひび割れ幅が  $0.2\text{mm}$  以上になれば、ひび割れ幅の増加により超音波速度は低下した。
- (5) ひび割れ幅  $0.6\text{mm}$  以上に達すると、超音波速度は  $1000\text{m/sec}$  程度となり、健全なコンクリートの超音波速度の  $25\%$  程度となった。

このように、ひび割れ幅  $0.8\text{mm}$  およびひび割れ深さ



300mm の範囲について、ひび割れ深さ測定方法の三種、すなわち、Tc-T0 法、修正 BS 法、直角回折法を調査検討した。その結果、ひび割れからの距離 a が 200mm の場合に、最も高い相関係数を得ることが出来、現状では、Tc-T0 法、修正 BS 法では、相関係数 0.9 以上を確保であることを確認した。今後、さらにひび割れ幅とひび割れ深さの関係を明らかにしていきたい。

#### 参 考 文 献

- [1] E.A. Whitehurst : Evaluation of concrete properties from sonic tests, ACI Monograph No.2, ACI, 1966
- [2] 国土交通省東北地方整備局東北技術事務所：超音波と CT 法によるコンクリート構造物の非破壊検査システムの開発, p12, vol.38, formosus , 2006.10
- [3] 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
- [4] 日本建築学会：コンクリートの強度推定のための非破壊試験マニュアル, pp.28~41, 1983
- [5] 山口哲夫, 丸茂文夫, 他 2 名：超音波の直接回折法による鉄筋コンクリートのひび割れ深さの測定, 非破壊検査, Vol.45, No.10, pp.742~748, 1996

---

---

### Measurement of Crack Depth of Concrete by Ultrasonic Wave Method and Transmission Performance of Cracks

Yuji MURAKAMI, Atsushi SAITO and Tatsuya HASHIMOTO

The cracks of concrete occur because of action such as external force and the environment. The crack depth of concrete becomes the problem. The nondestructive testing methods to estimate the crack depth of concrete include the Tc-T0 method, the correction BS method, and the right angle diffractometry.

This paper changed the days after concrete placement and the distance between a probe and cracks as parameters, and the crack depth measurement method was investigated. As a result, measurement accuracy and the most suitable method for measurement were made clear about crack depth measurement method. Furthermore, the relationships between crack width and ultrasonic wave velocity were examined.