

# 超音波によるコンクリートのひび割れ高さ 推定法に関する一提案

鎌田敏郎<sup>1</sup>・岩波光保<sup>2</sup>・長滝重義<sup>3</sup>・大即信明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山2-12-1)

<sup>2</sup>学生会員 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

<sup>3</sup>正会員 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (同上)

<sup>4</sup>正会員 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科 (同上)

本研究では、コンクリートのひび割れのうち床版の底面から発生する場合のような構造物表面に開口部を持たないひび割れの高さを、2探触子法により得られた超音波の受振波の振幅によって推定する手法の検討を行った。実験においては、まずひび割れとしてスリットを用いた人工ひび割れ供試体において受振振幅を測定し、人工ひび割れ高さの推定式を検討した。次に底面における超音波の反射性状の影響についての検討、さらに曲げ載荷によって発生させたひび割れに対する検討を加えて、実構造物への適用性を考慮したコンクリートのひび割れ高さ推定法の提案を行った。

**Key Words :** ultrasonic testing, crack height, echo amplitude, concrete structure

## 1. はじめに

近年、コンクリート舗装床版の底面や打継面において発生するひび割れのように、構造物表面に開口部を持たないひび割れを非破壊試験により評価する必要性が高まっている。この評価に適した非破壊試験法としては、ひび割れ等の欠陥部における反射あるいは回折などの特性を利用する超音波法が有力であると考えられる。

超音波によるコンクリートのひび割れの評価法、主としてひび割れの深さの推定法としては従来からの音速法<sup>1), 2), 3), 4)</sup>をはじめとして、近年ではスペクトロスコピー法<sup>5)</sup>およびエネルギー法<sup>6)</sup>などが提案されている。しかしながら、これらはすべて構造物表面に開口部を持つひび割れに関するものであり、前述のような構造物表面に開口部を持たないひび割れに適用できるものではない。

また、例えば鋼構造物の超音波探傷においては、斜角探傷法<sup>7)</sup>により同様に構造物表面に開口部を持たない内部ひび割れを評価することが可能である。この手法は周波数の高いビーム状の超音波を用いる

ことによって、内部ひび割れの評価が可能となるものである。しかしながら、鋼と比較してコンクリートは極めて不均質な材料であり、高周波の超音波に対しても散乱や減衰などの影響が非常に大きく、コンクリートへの斜角探傷法の適用は困難である。

このような事情により、今のところコンクリート構造物の表面に開口部を持たないひび割れを超音波により適切に探査する手法はないのが現状である。

したがって本研究では、コンクリート舗装床版の底面や打継面において発生する構造物表面に開口部を持たないひび割れを評価の対象とし、このようなひび割れを評価する際には2探触子のパルス反射法を用いれば、床版の底面あるいは打継面における反射波を利用することに着目<sup>8)</sup>し、ひび割れの高さ（構造物表面に開口部を持つひび割れの長さを「深さ」と呼ぶ場合と区別するため、以後、ひび割れ「高さ」と呼ぶこととする）を推定する手法の検討を行った。

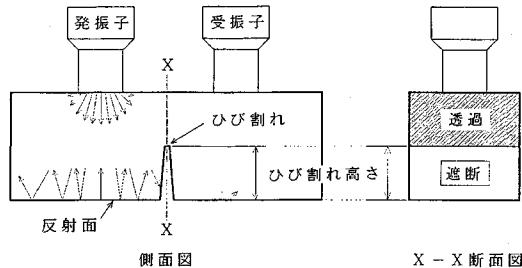


図-1 ひび割れ高さ推定法の原理

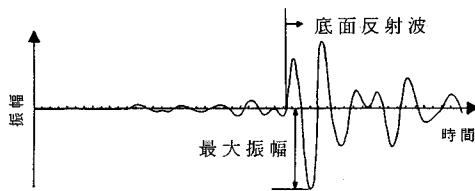


図-2 受振波の最大振幅

## 2. 本研究で提案するひび割れ高さ推定法について

### (1) ひび割れ高さ推定法の原理

図-1に、本研究で提案するひび割れ高さ推定法の原理の概略を示す。このように供試体上面に発振子および受振子を設置して、発振子から超音波を入射すると、入射波はある指向性を持って供試体中を伝播し供試体底面で反射した後、その反射波の一部が供試体上面で受振子により受振される。ここで伝播経路上にひび割れが存在すると、入射波と底面反射波の一部はひび割れにより遮断されるため、ひび割れのない場合と比較して受振振幅が減少する。また、ひび割れ高さが高いほど遮断面積は大きくなり、受振振幅は減少する。さらに、ひび割れ高さと遮断面積は線形関係にあることは明らかであり、またひび割れを含む断面（図-1中の断面X-X、以降、ひび割れ面とする）における鉛直方向の超音波音圧分布が一様であるならば、ひび割れ高さの増加に伴う透過超音波の減少量はひび割れ高さに比例する。その結果、ひび割れを含む断面における超音波の透過量も線形的に減少することになり、ひび割れ高さと受振振幅の関係もまた線形的であると考えることができる。

本手法は、この受振振幅を測定することによりひび割れ高さを推定するものである。この際、受振振幅として、図-2に示す受振波形から到達時間を考慮して底面反射波を特定した上で、その底面反射波の最大振幅を用いることとする。これは最大振幅が、

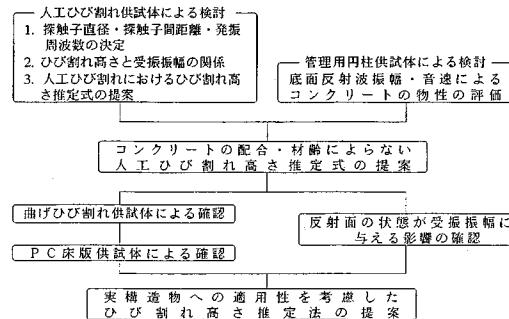


図-3 検討のフロー

受振波から得られる情報のうち測定者の経験などによらず判断が明確であり、振幅値を電圧値として一義的に定めることができるためである。

なお、この受振振幅は供試体高さによって変化するものと考えられるが、本研究では、すべての供試体高さを15cmで一定とし、供試体高さ15cmの場合のひび割れ高さ推定式を求めるにすることにする。したがって、これ以外の供試体高さの推定式は、本研究で示されるシステムにより供試体高さ15cmの場合と同様に別個に求める必要がある。また実構造物における測定を考える場合、今回用いた探触子より発振可能なパルス波の透過能力から考えると、本推定法が適用可能な版厚は30cm程度であると考えられる。したがって原理的には、さらに出力の大きな発振子を用いれば、より大きな寸法の構造物にも適用可能であると考えられる。

### (2) 検討のフロー

まず、ひび割れ高さと受振振幅との間に線形関係が成立するための前提となる、ひび割れ面における鉛直方向の超音波音圧分布の一様性の確認を行った。その後、図-3に示すフローに従って、超音波の受振振幅によりひび割れ高さを推定する手法の構築を行った。実験では、まず人工ひび割れ供試体を用いて、測定に使用する探触子直径、発振子-受振子間距離および発振周波数を決定した。次に人工ひび割れ高さを変化させた供試体により、ひび割れ高さと受振振幅の関係を求めた。そして、人工ひび割れ供試体と同時に作製した管理用円柱供試体（以後、管理供試体とする）の底面反射波振幅および音速の測定を行い、コンクリートの配合および材齢を考慮に入れたひび割れ高さ推定式を提案した。さらに本手法の実構造物に対する適用性を考慮し、超音波の反射面の状態が受振振幅に与える影響について検討し、その補正方法を提案した。最後に、曲げ載荷により曲げひび割れ供試体に発生するひび割れおよび繰り

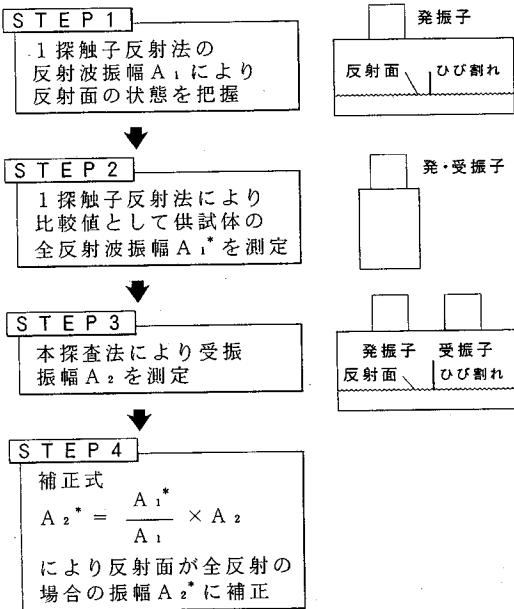


図-4 反射面の状態による影響の補正方法

返し載荷によりプレストレストコンクリート（以後、PCとする）床版供試体に発生するひび割れについて検討を行い、スリットの高さとして求めた人工ひび割れ高さ推定式の曲げひび割れに対する適用性を確認した。

### (3) 具体的な検討方法について

図-3中の検討事項のうち主なものについて、その具体的な方法を以下に示す。

#### a) ひび割れ面における鉛直方向の超音波音圧分布の確認について

本研究では、ひび割れ高さと受振振幅の間に線形関係が成立することを仮定して、受振振幅からひび割れ高さを推定しようとするものである。したがって、2.(1)で述べたように、ひび割れ面における鉛直方向の超音波音圧分布の一様性をあらかじめ確認しておかなければならぬ。そこでひび割れ供試体と同じ形状の供試体における $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ の側面（以降、A側面とする）をひび割れ面に見立てて、A側面から水平方向に5cm離れた供試体上面に発振子を設置し、A側面上で受振した波形の最大振幅の鉛直方向分布を超音波音圧分布として求め、その一様性の確認を行った。

#### b) 反射面の状態が受振振幅に与える影響

実構造物において、超音波の反射面となるコンクリートの底面の状態は、音響インピーダンスの異なる物質が接触している場合や施工不良などによる空

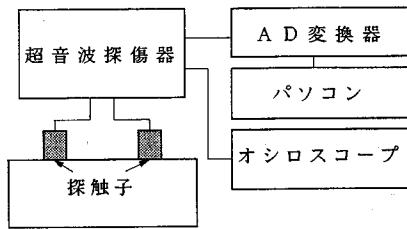


図-5 超音波の測定システム

隙が存在している場合などさまざまであり、これらの影響により受振される底面反射波振幅は変化してしまう。しかし、本実験における人工ひび割れ供試体の場合、底面に対する入射波はあくまで全反射の条件下にあり、この全反射の条件で求めた推定式を用いて実際のひび割れ深さを推定すると、適切な推定が行えない恐れがある。

そこで本研究では、底面反射波振幅が変化する場合を再現するため、供試体底面下にゴム板を設置し、そのゴム板に導入した円形の空隙の量を調節することにより、底面全体の音響インピーダンスを変化させる方法をとることにした。この方法は、図-4に示すように、まず1探触子法によりひび割れ供試体の底面反射波振幅（A<sub>1</sub>）を測定する。そして、その管理供試体において底面が全反射の条件下にある場合の底面反射波振幅（A<sub>1</sub>\*）を測定し、それらの比（A<sub>1</sub>\* / A<sub>1</sub>）を求める。次に、2探触子法により得られたひび割れ供試体の底面反射波の受振振幅（A<sub>2</sub>）に、前述の1探触子法により求めた比（A<sub>1</sub>\* / A<sub>1</sub>）を乗することにより、全反射の場合の受振振幅（A<sub>2</sub>\*）に換算し、これを推定式に代入することによりひび割れ高さを推定するものである。

## 3. 実験概要

実験は、①ひび割れ面における鉛直方向の超音波音圧分布に関する検討、②2探触子法によるひび割れ供試体における検討、③1探触子法による反射面の状態が受振振幅に与える影響についての検討の3種類からなる。以下にその概要を示す。

### (1) 超音波測定の概要

超音波の測定は、周波数可変型超音波探傷器（日本クラウトクラーマ社製、ULCON3）により行った。また、探触子は広帯域垂直探触子（ジャパンプローブ社製）を用いた。これらの探触子のコンクリート表面への設置には、グリセリン系の接触媒質

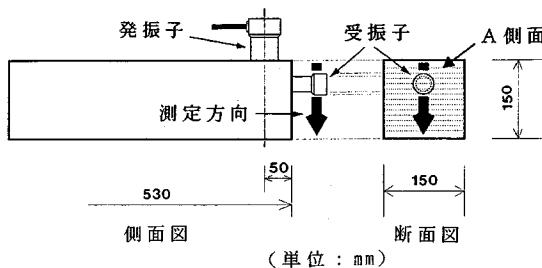


図-6 超音波音圧分布の測定方法

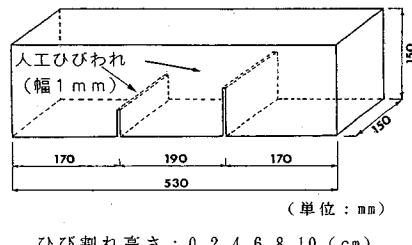


図-7 人工ひび割れ供試体概要

表-1 コンクリートの配合

ケース (mm)	G <sub>max</sub> (mm)	スランプ (cm)	空気 量 (%)	W / C (%)	s / a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (C x %)	弾性係数 (x 10 <sup>4</sup> MPa) [E <sub>14</sub> ]	圧縮強度 (MPa) [σ <sub>14</sub> ]
						W	C	S	G			
I	20	8	4	35	42.15	171	489	684	968	0.3	3.56	53.3
II	20	8	4	45	44.15	174	386	750	978	0.3	3.20	47.5
III	20	8	4	55	46.15	177	321	805	968	0.3	2.75	38.5
IV	20	8	2	41.5	41.50	164	400	749	1072	1.0	3.03	49.7

(日合アセチレン社製、ソニコートE)を用いた。測定において超音波探傷器で受振した波形は、AD変換器(オートニクス社製、マルチ・チャンネル波形解析装置、APC-510)によりデジタル化して記録し、それをパソコン上で解析した。図-5に、本研究で用いた超音波の測定システムを示す。また超音波探傷器の感度は受振振幅が十分に観察できる程度の感度に設定し、測定後60dBの振幅に換算した。したがって、これ以後、受振振幅は特記のない限り60dB換算振幅である。また、振幅の単位はVoltである。

## (2) ひび割れ面における超音波音圧分布の一様性の確認に関する実験

ここで用いた供試体は、図-6に示すようにひび割れ供試体と同じ形状のものとした。超音波の発振子には直径56mmの探触子を用い、供試体上面にA側面から5cm離して設置した。その際、発振子と供試体の接触状態を一定に保つため、発振子をガムテープで固定した。また受振子には直径28mmの探触子を用い、A側面において鉛直方向に1cm刻みで移動させ、それについて受振振幅の最大値を測定し、超音波音圧分布を求めた。

## (3) ひび割れ供試体による実験

### a) 供試体の概要

実験に用いたひび割れ供試体は、人工ひび割れ供試体、曲げひび割れ供試体およびPC床版供試体の3種類である。使用材料については、人工ひび割れ供試体および曲げひび割れ供試体では、セメントには早強セメント、細骨材には小櫃産川砂、粗骨材には奥多摩産碎石を、またAE減水剤としてポゾリスNo.70をそれぞれ用いた。またPC床版供試体では、セメントには早強セメント、細骨材には酒匂川水系産川砂、粗骨材には下初狩産碎石を、また減水剤としてマイティ150をそれぞれ用いた。また配合については、人工ひび割れ供試体では表-1中のI(水セメント比35%)、II(水セメント比45%)およびIII(水セメント比55%)の3種類を、曲げひび割れ供試体では表-1のIIを、またPC床版供試体では表-1のIVをそれぞれ用いた。

図-7に、ひび割れとしてスリットを用いた人工ひび割れ供試体の概要を示す。なおスリットは厚さ1mmのステンレス板をコンクリートの硬化後に引き抜くことにより作製した。また同時に人工ひび割れ供試体の物性管理のために、同一配合のコンクリートを用いて直径10cm、高さ15cmの管理供試体を作製した。次に、曲げひび割れ供試体の概要を図-8に示す。この供試体には曲げ載荷試験によって

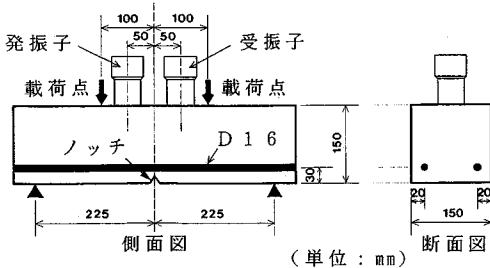


図-8 曲げひび割れ供試体概要

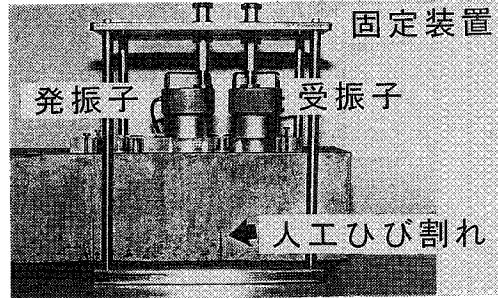


写真-1 探触子固定装置

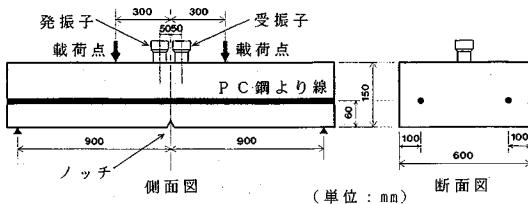


図-9 PC床版供試体概要

供試体中央部にひび割れを導入するため、あらかじめ供試体中央部下面に高さ 1cm の三角形断面のノッチを設置している。さらに図-9に、PC床版供試体の概要を示す。曲げひび割れ供試体と同様に中央部にひび割れ誘導用のノッチを設置し、曲げ区間を除いてせん断補強筋を配した。用いた緊張材は直径 17.8mm の PC 鋼より線である。また導入プレストレス力は 150kN とした。

人工ひび割れ供試体および曲げひび割れ供試体は打設後 24 時間後に脱型し、14 日間水中養生を行った後、気中養生を行った。また PC 床版供試体は、脱型後気中養生を行った。各供試体の測定材齢は、人工ひび割れ供試体では 14 日および 28 日、曲げひび割れ供試体では 28 日、PC 床版供試体では 5 ヶ月とした。

#### b) 人工ひび割れ高さの超音波測定

発振子および受振子には、直径 28, 40, 56mm の探触子を用い、図-7 に示すような供試体の上面にひび割れを挟む位置に設置した。なお測定時の探触子と供試体の接触状態を一定に保つため、写真-1 に示すような固定装置を用いた。また推定値の再現性を確保するため、3 回の測定値の平均値を用いることとした。なお本実験の範囲においては、3 回の測定値のばらつきは結果に影響を与えるほどのものではなかった。一方、管理供試体の測定の場合、底面反射波振幅および音速の測定においては探触子の直径の影響を考慮する必要がないため、直径 28mm の探触子を用い、底面反射波振幅は 1 探触子反射法

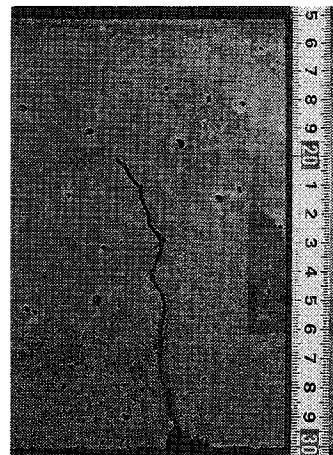


写真-2 ひび割れ発生状況  
(曲げひび割れ供試体)

により、音速は 2 探触子透過法により測定した。

#### c) 曲げひび割れ供試体における測定

図-8 に、曲げひび割れ供試体の探触子位置および載荷の方法を示す。載荷は供試体上面に探触子を設置したまま行った。また超音波測定については、後に決定される条件に従った。なおひび割れ高さの測定は、ポータブルマイクロスコープ（キーエンス社製）により、その幅が一般的の構造物のかぶりを想定した場合の許容ひび割れ幅である 0.02mm 以上のものについて供試体側面で行った。写真-2 に、載荷により発生したひび割れの状況を示す。

#### d) PC 床版供試体における測定

図-9 に、PC 床版供試体の探触子位置および載荷の方法を示す。繰り返し載荷は、図-10 に示すサイクルで行い、ひび割れ高さおよび受振振幅の測定は図-10 中の荷重ステップごとに行った。また超音波測定については、曲げひび割れ供試体と同様に、後に決定される条件に従った。なお、ひび割れ高さの測定もまた曲げひび割れ供試体の場合と同様

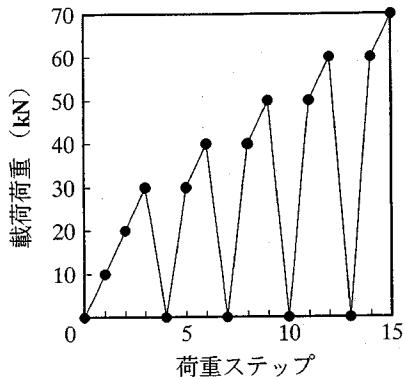


図-10 載荷サイクル

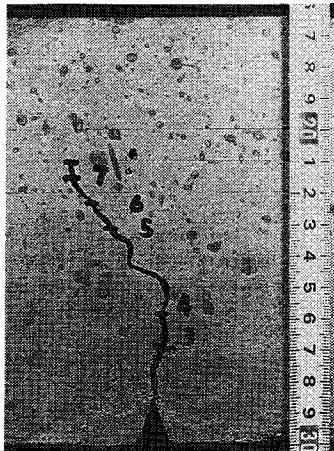
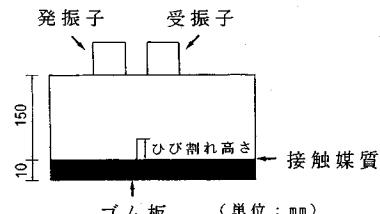


写真-3 ひび割れ発生状況 (PC床版供試体)

に行った。写真-3に、載荷により発生したひび割れの状況を示す。

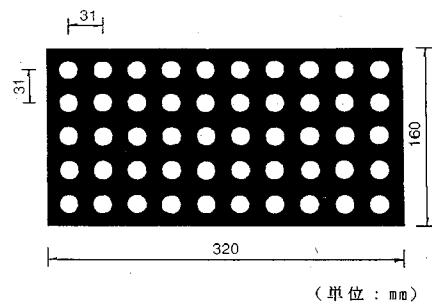
#### (4) 反射面に関する測定

超音波の反射面である供試体底面からの反射波振幅を変化させるため、本研究では、図-11に示すように厚さ10mmのゴム板に接触媒質を接触面全面に塗布した上で、水セメント比45%の人工ひび割れ供試体を密着させた。これによって底面における入射波の一部をゴム板へ透過させることにより底面反射波を減衰させた。ここでゴム板には図-12に示すように直径13, 18, 24, 27mmの穴（穴の面積比は、1 : 1.9 : 3.4 : 4.3）を設けたものと無穴のものを用い、供試体とゴム板との接触面積を変化させることによって超音波の透過性状を変化させた。そこで1探触子法による底面反射波振幅A<sub>1</sub>と2探触子法による受振振幅A<sub>2</sub>をそれぞれ各ゴム板ごとに測定し、最後にゴム板を取り除き底面を全反射の



ひび割れ高さ : 0, 4 (cm)

図-11 供試体概要



穴の直径 : 0, 13, 18, 24, 27 (mm)

図-12 ゴム板の概要

状態とし、1探触子法による底面反射波振幅A<sub>1</sub>\*と2探触子法による受振振幅A<sub>2</sub>\*を測定した。

#### 4. 超音波の測定条件の決定

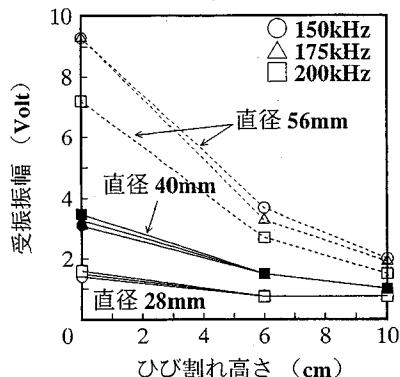
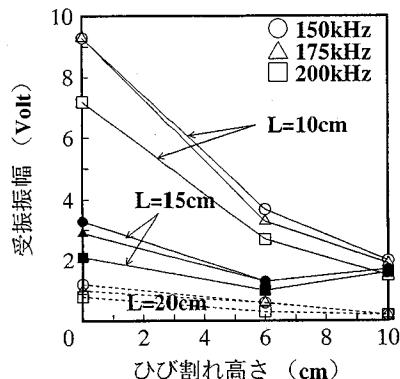
本推定法では、用いる超音波の指向性、発振子および受振子の位置により受振振幅が変化するため、評価に最適な測定条件をあらかじめ検討しておかなければならぬ。ここで決定すべき条件とは、ある供試体高さに最適な探触子直径、探触子間距離（発振子と受振子の中心間距離）および発振周波数である。そこで以下に示すような検討を行った。

##### (1) 検討ケース

検討したケースは、探触子直径が28, 40, 56mm、探触子間距離は探触子自身の大きさにより、探触子直径が28, 40mmの場合が6, 10, 15, 20cm、探触子直径が56mmの場合が10, 15, 20cmとした。また発振周波数は150, 175, 200kHzとした。なお供試体には、超音波の減衰が最も大きいと考えられる水セメント比55%，材齢14日のものを用い、測定の対象とした人工ひび割れの高さは、0, 6, 10cmとした。

表-2 超音波の入射波振幅

発振周波数 (kHz)	入射波振幅 (Volt)	探触子直径 (mm)		
		28	40	56
150	56.13	61.71	70.46	
175	62.10	68.87	80.42	
200	72.06	72.46	72.85	

図-13 測定条件の検討  
(探触子間距離: 10cm)図-14 測定条件の検討  
(探触子直径: 56mm)

## (2) 結果および考察

探触子間距離を 10cm とした場合の探触子直径および発振周波数の違いによる受振振幅の違いを図-13 に示す。また、図-14 に探触子直径を 56mm とした場合の探触子間距離および発振周波数の違いによる受振振幅の違いを示す。なお図-13において、探触子直径 28mm の場合のひび割れ高さ 6, 10cm のデータが欠落しているのは、超音波の減衰が著しく反射波とノイズの判別が困難であったためである。これらによれば、探触子直径が大きく、また探触子間距離が短いほど、受振振幅は大きくなり、さらに発振周波数の違いもまた受振振幅に若干の影響を及ぼしていることがわかる。これは一般に、探触子直径が大きいほど発振される超音波は指向性が鋭く、その発振エネルギーも大きくなり、また探触子間距離が短いほど、超音波伝播距離が短く減衰の影響が小さくなるため、結果として受振振幅が大きくなるためと考えられる。

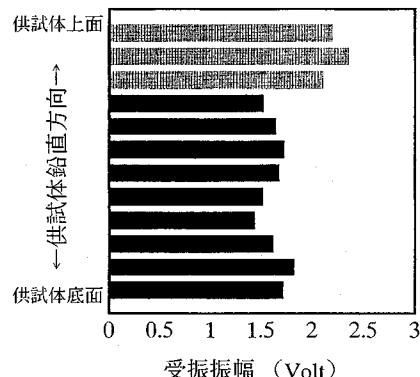


図-15 超音波音圧分布

## (3) 測定条件の決定

用いる探触子直径、探触子間距離および発振周波数をひび割れ高さの変化に対する受振振幅の変化率により決定する。各々の検討ケースの変化率は次式により求める。

$$\text{変化率} (\%) = \frac{A_f(0) - A_f(10)}{A_f} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $A_f(x)$  は発振周波数  $f$  を用いた場合のひび割れ高さ  $x$  のときの受振振幅であり、 $A_f$  は表-2 に示すような発振周波数  $f$  を用いた場合の入射波振幅である。その結果、探触子直径 56mm、探触子間距離 10cm、発振周波数 150kHz のときの変化率が 10.2 % で最大となった。これは、受振振幅に対するひび割れ高さの影響が大きいことを表しており、ひび割れ高さを評価する上で有効な測定条件であると考えられる。したがって、本研究で用いる探触子直径、探触子間距離、発振周波数は、それぞれ 56mm, 10cm, 150kHz とする。

## 5. 人工ひび割れ供試体によるひび割れ高さ推定式の検討

まず、ひび割れ面における鉛直方向の超音波音圧分布の一様性を確認した上で、人工ひび割れ供試体

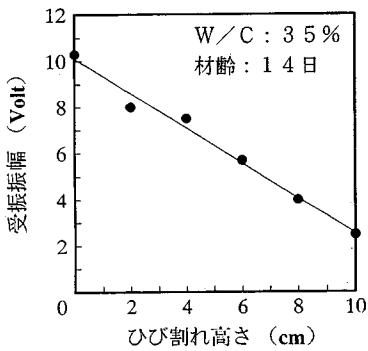


図-16 人工ひび割れ高さと受振振幅の関係  
(W/C = 35 %, 14 日)

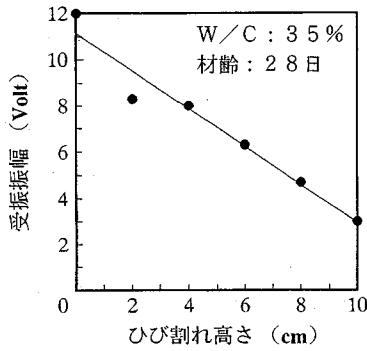


図-17 人工ひび割れ高さと受振振幅の関係  
(W/C = 35 %, 28 日)

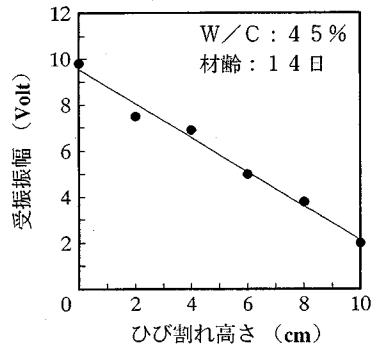


図-18 人工ひび割れ高さと受振振幅の関係  
(W/C = 45 %, 14 日)

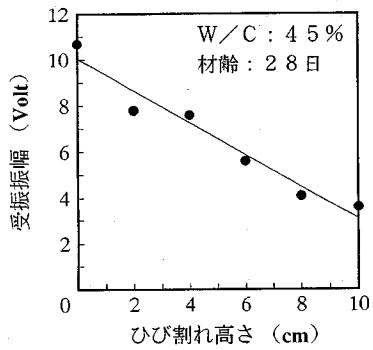


図-19 人工ひび割れ高さと受振振幅の関係  
(W/C = 45 %, 28 日)

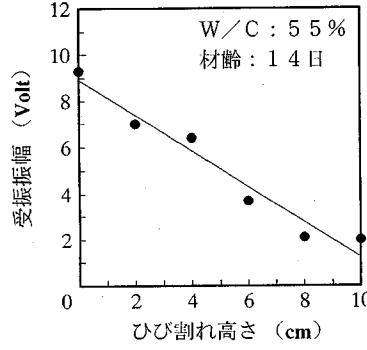


図-20 人工ひび割れ高さと受振振幅の関係  
(W/C = 55 %, 14 日)

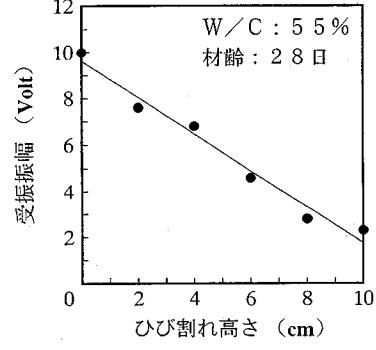


図-21 人工ひび割れ高さと受振振幅の関係  
(W/C = 55 %, 28 日)

を用いた実験からひび割れ高さと受振振幅の関係を求め、ひび割れ高さ推定式の検討を行った。

### (1) ひび割れ面における鉛直方向の超音波音圧分布の一様性の確認

図-15に、測定された受振振幅の最大値の鉛直方向の分布を示す。これにより、本実験において対象としたひび割れ高さ0~10cmの範囲では、受振振幅はほぼ一定であると考える。この場合、超音波の距離減衰については本測定における超音波の路程差の範囲では、既往の報告<sup>9)</sup>より、その影響は小さく考慮しないことにした。

### (2) ひび割れ高さと受振振幅の関係

図-16~21に、水セメント比および材齢を変化させた場合の人工ひび割れ高さと受振振幅の関係を示す。これらによれば、いずれのケースにおいても、ひび割れ高さが大きくなるにつれて受振振幅は直線的に減少している。さらにコンクリートの水セ

表-3 人工ひび割れ高さの一次回帰分析

W/C (%)	材齢 (日)	一次回帰式	相関係数
35	14	$amp(h) = -0.76h + 10.08$	0.99
	28	$amp(h) = -0.75h + 10.63$	0.99
45	14	$amp(h) = -0.73h + 9.52$	0.99
	28	$amp(h) = -0.77h + 10.24$	0.99
55	14	$amp(h) = -0.77h + 8.95$	0.97
	28	$amp(h) = -0.77h + 9.55$	0.99

ただし、h: ひび割れ高さ (cm)

amp(h): ひび割れ高さ h のときの振幅 (Volt)

メント比が小さいほど、また材齢が長いほど受振振幅は大きくなるが、水セメント比の影響に比較して材齢の影響は小さい。そこで実験により得られたひび割れ高さと受振振幅の関係について、一次の回帰分析を行った。表-3に、得られた一次回帰式とそ

表-4 人工ひび割れ高さの重回帰分析

ケース	説明変数	重回帰式	重相関係数	t検定
①	$h, a$	$\text{amp}(h) = 7.82 - 0.76h + 0.52a$	0.99	1%有意
②	$h, v$	$\text{amp}(h) = -13.36 - 0.76h + 4.92v$	0.98	1%有意
③	$h, a, v, av$	$\text{amp}(h) = 14.16 - 0.76h - 1.95a - 1.32v + 0.51av$	0.99	棄却
④	$h, av$	$\text{amp}(h) = 7.93 - 0.76h + 0.10av$	0.99	1%有意

ただし、 $h$ ：ひび割れ高さ (cm),  $a$ ：底面反射波振幅 (Volt),  $v$ ：音速 (km/s)

$\text{amp}(h)$ ：ひび割れ高さ  $h$  のときの受振振幅 (Volt)

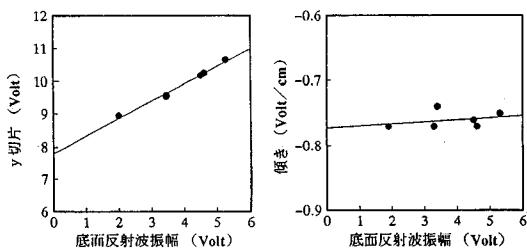


図-22 底面反射波振幅と一次回帰式のy切片と傾きの関係

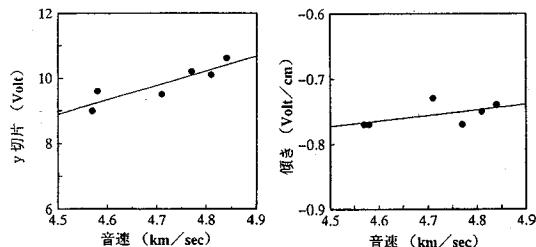


図-23 音速と一次回帰式のy切片と傾きの関係

の相関係数をそれぞれ示す。またt検定を行った結果、いずれのケースにおいても5%有意水準で有意であった。このように、いずれの検討ケースにおいてもひび割れ高さと受振振幅の間に高い一次相関性があることが、実験によっても明らかとなった。

### (3) コンクリートの物性が受振振幅に与える影響

(2)では、コンクリートの配合および材齢ごとにひび割れ高さの推定式を求めたが、これではあらゆるケースについて推定式を作つておかなければならぬ。そこで本研究では、管理供試体の底面反射波振幅および音速を測定し、それらをコンクリートの物性評価値としてひび割れ高さ推定式の中に取り入れ、コンクリートの物性によらないひび割れ高さ推定式へと拡張するための検討を行つた。図-22

に、底面反射波振幅と一次回帰式のy切片および傾きの関係を、また図-23に、音速と一次回帰式のy切片および傾きの関係を示す。これらによれば、底面反射波振幅、音速が大きくなるほど、y切片は直線的に大きくなる。また傾きについてはy切片ほどではないが、底面反射波振幅、音速の変化に伴い若干変化していることがわかる。したがつて、コンクリートの物性が一次回帰式に与える影響を考慮する必要があると考えられる。

### (4) ひび割れ高さ推定式の検討

(3)の結果から管理供試体の底面反射波振幅および音速が受振振幅に与える影響とその傾向が明らかとなつたので、それらに線形関係があると仮定して、目的関数を受振振幅、説明変数をひび割れ高さ、管理供試体の底面反射波振幅および音速として、重回帰分析を行つた。なお説明変数の組み合わせは、①ひび割れ高さと底面反射波振幅、②ひび割れ高さと音速、③ひび割れ高さ、底面反射波振幅、音速および交互作用項として底面反射波振幅と音速の積、④ひび割れ高さと底面反射波振幅と音速の積の4ケースについて検討した。表-4に、それぞれの重回帰式と重相関係数およびt検定の結果を示す。これによれば、いずれの場合においても重相関係数によると目的変数と説明変数の間に高い相関性が認められるが、t検定によると④の説明変数の組み合わせは棄却される。そこで本研究では、重相関係数が最も大きく、また底面反射波振幅と音速の両方の影響を考慮することのできる④の説明変数の組み合わせを採用することにした。その推定式を以下に示す。

$$\text{amp}(h) = 7.93 - 0.76 h + 0.10 a \cdot v \quad (2)$$

ここで、 $\text{amp}(h)$  はひび割れ高さ  $h$  のときの受振振幅 (Volt),  $h$  はひび割れ高さ (cm),  $a$  は管理供試体の底面反射波振幅 (Volt),  $v$  は同じく管

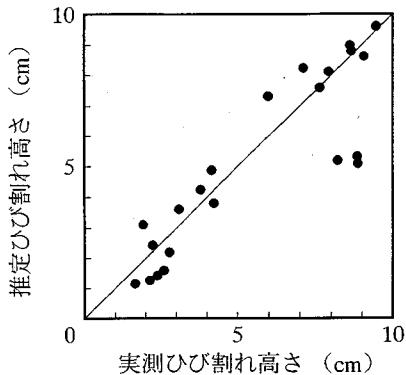


図-24 推定ひび割れ高さと実測ひび割れ高さの関係

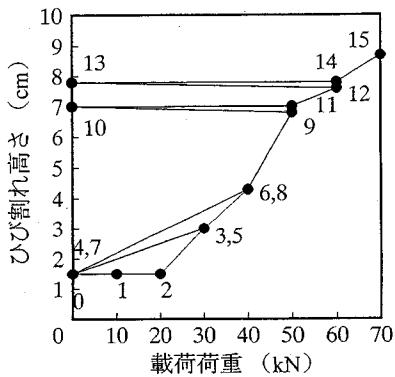


図-25 ひび割れ高さと荷重の関係

理供試体の音速 (km/s) である。さらにこの推定式を以下に示すような手順で、測定上の基準値を用いて無次元化した。まず式(2)を  $h$ について解くと次式のようになる。

$$h = -1.32 \text{ amp}(h) + 0.13 a \cdot v + 10.43 \quad (3)$$

ここで各変数について次のように無次元化を行った。ひび割れ高さ ( $h$ ) は供試体高さに対する比 ( $H$ ) とし、受振振幅 ( $\text{amp}(h)$ ) は直径 56mm の探触子の入射波振幅に対する比 ( $\text{AMP}$ ) とし、管理供試体の底面反射波振幅 ( $a$ ) は直径 28mm の入射波振幅に対する比 ( $A$ ) とし、同じく管理供試体の音速 ( $v$ ) は発振周波数で除して超音波の波長とし、その供試体高さに対する比 ( $\lambda$ ) とした。その結果、次式を得る。

$$H = -6.20 \text{ AMP} + 10.95 A \cdot \lambda + 0.70 \quad (4)$$

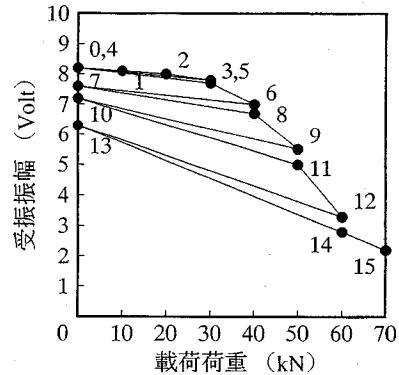


図-26 受振振幅と荷重の関係

この式(4)を、本研究では、超音波受振振幅によるコンクリートの物性によらないひび割れ高さ推定式として提案することにする。なお、コンクリートの物性の評価に用いる管理供試体は、実構造物の場合、その構造物の機能に影響を与えない部分からコア抜きにより採取すればよいものと考えられる。

## 6. 実構造物への適用性に関する検討

### (1) 実際の載荷によって発生するひび割れに対する適用性の検討

#### a) 曲げ載荷によって発生するひび割れに対する適用性

まず、曲げひび割れ供試体において発生するひび割れについて、実測されたひび割れ高さと受振振幅から式(4)を用いて推定されたひび割れ高さを比較した結果を図-24に示す。このように、実際の載荷によって発生するひび割れの高さを、受振振幅から式(4)を用いて精度よく推定できていることがわかる。なお実測ひび割れ高さの推定ひび割れ高さに対する平均誤差は 0.80cm であった。したがって、ひび割れとしてスリットを用いた供試体について求めた人工ひび割れ高さ推定式が、曲げひび割れに対しても適用可能であることが確認された。

#### b) 繰り返し載荷によって発生するひび割れに対する適用性

次に、繰り返し載荷によって P C 床版供試体に発生するひび割れについて検討を行う。図-25に、載荷荷重と実測ひび割れの高さの関係を示す。これによれば、最初に載荷した荷重（以後、処女荷重とする）のときの実測ひび割れ高さと、除荷後再び載荷した荷重（以後、再荷重とする）のときのひび割れ高さはほぼ一致していることがわかる。次に図一

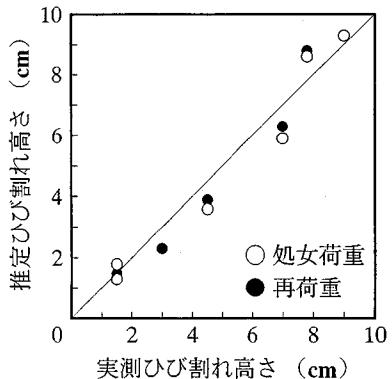


図-27 推定ひび割れ高さと実測ひび割れ高さの関係

表-5 反射面についての補正結果

穴の面積 (cm <sup>2</sup> )	0	1.33	2.54	4.52	5.72
A <sub>1</sub>	18.62	20.60	22.27	22.59	23.14
A <sub>1</sub> *		23.22			
ひび割れ高さ 0 cm					
A <sub>2</sub>	7.27	7.82	8.47	8.72	9.07
A <sub>2</sub> * / A <sub>1</sub>	9.06	8.81	8.83	8.97	9.10
A <sub>2</sub> *	10.73				
ひび割れ高さ 4 cm					
A <sub>2</sub>	5.46	6.01	6.67	7.17	7.57
A <sub>2</sub> * / A <sub>1</sub>	6.81	6.77	6.96	7.37	7.60
A <sub>2</sub> *	7.97				

(ただし、単位 : Volt)

26に、載荷荷重と受振振幅の関係を示す。このように、受振振幅は再荷重の場合の方が処女荷重の場合よりも若干小さいがほぼ同じ値を示している。そこで、この受振振幅を式(4)に代入して求めた推定ひび割れ高さと実測ひび割れ高さを比較した結果を図-27に示す。これによれば、推定ひび割れ高さは処女荷重の場合と再荷重の場合とでほとんど差はない、両者とも実測ひび割れ高さとほぼ等しくなることがわかった。なお実測ひび割れ高さの推定ひび割れ高さに対する平均誤差は、処女荷重の場合が0.45cm、再荷重の場合が0.50cmであった。これらにより、本推定法が繰り返し載荷によって発生するひび割れに対しても適用可能であることが確認された。

## (2) 反射面の状態が受振振幅に与える影響

表-5に、ひび割れ高さが0cmと4cmについて、それぞれゴム板の穴の面積を変化させた場合の1探触子法による人工ひび割れ供試体の受振振幅A<sub>1</sub>および底面が全反射の場合の管理供試体の底面反射波振幅A<sub>1</sub>\*、2探触子法による補正前の人工ひび割れ供試体の受振振幅A<sub>2</sub>および図-4に示す補正方法によりA<sub>2</sub>を底面が全反射の場合の値に換算した受

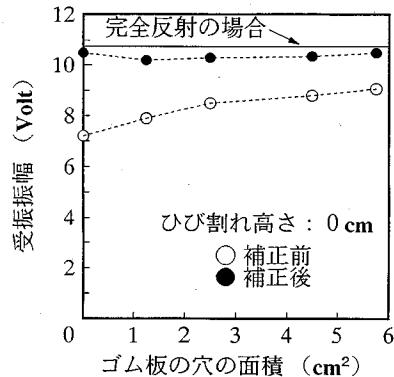


図-28 反射面についての補正結果  
(ひび割れ高さ : 0cm)

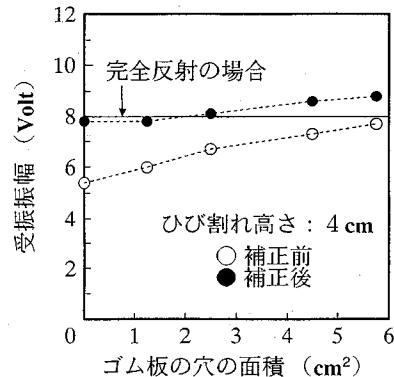


図-29 反射面についての補正結果  
(ひび割れ高さ : 4cm)

振振幅A<sub>2</sub> × A<sub>1</sub>\* / A<sub>1</sub>、さらに、2探触子法による実際に底面が全反射の場合の受振振幅A<sub>2</sub>\*をそれぞれ示す。これらによれば、補正前の受振振幅はいずれのひび割れ高さに対しても、ゴム板の穴の面積の増加に伴って大きくなっている。そこで図-4に示す方法により底面が全反射の場合の受振振幅に換算する補正を行った。さらにその補正值と実際の2探触子法による底面が全反射の場合の受振振幅(A<sub>2</sub>\*)の差が最小になるように実験定数αを求めた。本研究の範囲ではα = 1.15となった。次に、図-28および図-29に、各ひび割れ高さにおいてゴム板の穴の面積に対応する補正前の受振振幅A<sub>2</sub>と補正後の受振振幅に実験定数αを乗じた値(α × A<sub>2</sub> × A<sub>1</sub>\* / A<sub>1</sub>)を、実際に底面が全反射の場合の受振振幅(A<sub>2</sub>\*)との比較で示す。これらによれば、ひび割れ高さによらず、補正前の受振振幅が上述のような方法により、底面が全反射の場合の受振振幅の値に補正できていることがわかる。したがって、底

面が全反射の場合以外でも本補正方法により底面が全反射の場合に補正可能であり、前述のひび割れ高さ推定式（式(4)）が適用可能であることが明らかとなった。なお本実験においては、実験定数 $\alpha$ を1.15とすることにより、平均誤差4.04%で全反射の場合に補正することができた。

## 7. 結論

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) コンクリート表面に発振子と受振子を並置して超音波を入射し、コンクリートの底面に発生したひび割れによる超音波の遮断によって減少する受振振幅を測定することにより、そのひび割れ高さの推定が可能であることがわかった。また、この受振振幅はコンクリートの配合および材齢に影響を受けるが、これらの影響を管理供試体の底面反射波振幅および音速により評価することによって、コンクリートの物性によらないひび割れ高さ推定式を提案した。
- (2) 本研究で提案する手法において、受振振幅は構造物底面の反射の状態に影響されるが、これに対しては1探触子法によって求めた底面が全反射の場合の底面反射波振幅を用いて補正することにより、いかなる底面の状態の対しても、本研究で提案するひび割れ高さ推定式が適用可能であることがわかった。さらに曲げ載荷により発生したひび割れに対しても検討を行い、本推定法の実構造物への適用可能性を確認した。

## 8. おわりに

本研究で提案した推定法においては、探触子を設置する際、ひび割れ存在位置が既知である必要があるが、ひび割れ存在位置の確認のみであれば、AE法、電磁波レーダ法などによる手法が現存しており、両者を併用することにより実構造物への適用が可能となる。このように、本提案はあくまでも構造物の劣化診断システムにおける詳細検査法に相当するも

のであり、構造物全体の、効率的かつ適切な劣化診断を行うためには、概略検査に有効と考えられるその他の手法と組合せた複合的な検査法の開発が必要となるであろう。

## 参考文献

- 1) British Standards Institution, : Recommendations for non-destructive methods of test for concrete - The measurement of the velocity of ultrasonic pulse in concrete, BS 4408, Part 5, 1974.
- 2) 尼崎省二, 明石外世樹: 超音波法によるコンクリート部材のひびわれ深さ測定に関する基礎的研究, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.133-136, 1980.
- 3) 明石外世樹: コンクリートの非破壊試験に関する研究, 土木学会論文集, No.390/V-8, pp.1-22, 1988.
- 4) 谷川恭雄, 童寿興, 中村正行: 超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ推定方法に関する研究, コンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム論文集, pp.55-60, 1991.
- 5) 坂田康徳, 大津政康: 超音波スペクトロスコピー法に基づくコンクリートのひびわれ評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.414/V-12, pp.69-78, 1990.
- 6) 山田和夫, 山本正岳, 浅井陽一, 渡部憲: 弹性波法を適用したひびわれ深さの精度推定に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.320-325, 1992.
- 7) (社)日本非破壊検査協会: 新 非破壊検査便覧, pp.297-306, 1992.
- 8) 鎌田敏郎, 前田泰芳, 大即信明, 長瀧重義: 超音波によるコンクリートの内部ひびわれの評価, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.546-551, 1993.
- 9) 長瀧重義, 大即信明, 鎌田敏郎, 川島正史, 矢崎剛吉, 岩波光保: モルタル供試体において発生するひび割れのAE特性, 第21回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.81-84, 1994.

(1995.6.2 受付)

## A PROPOSAL OF THE METHOD TO ESTIMATE CRACK HEIGHT IN CONCRETE STRUCTURE BY ULTRASONIC TESTING

Toshiro KAMADA, Mitsuyasu IWANAMI, Shigeyoshi NAGATAKI  
and Nobuaki OTSUKI

In this paper, a method to estimate the crack height in concrete structures by ultrasonic testing is investigated. This method is based on the relation between the crack height and the maximum echo amplitude obtained from the received wave. In the beginning, a regressive equation for estimating the crack height is developed from the experiments for specimens with slits. Next, the reflection of incident wave at the bottom surface of structures is investigated on the influences on the echo amplitude of received wave. From these results, it is confirmed that the proposed method is applicable to actual cracks in concrete structures.