

[36] 超音波法によるコンクリート部材のひびわれ深さ測定方法に関する研究

正会員 ○ 尼崎 省二 (立命館大学理工学部)

正会員 明石 外世樹 (立命館大学理工学部)

1. まえがき

現在、コンクリート構造物のひびわれ深さを測定する方法としては超音波パルス法が多く用いられており、BS 4408; Part 5には超音波パルス法による測定方法が規格化されている。¹⁾ コンクリートのひびわれ深さ測定はコンクリート表面で実施することが多いが、この場合にはコンクリート表面およびひびわれ先端で回折した超音波パルス（縦波、以下単にパルスと略す）を確実に受振することが重要になる。著者らは表面法によってパルス速度を正確に測定する方法として発・受振子にクサビを用いる方法をすでに発表したが、²⁾ クサビを用いるとパルスのクサビ内での減衰および接触面での反射が大きく、ひびわれ深さの測定にとって不利であることが判明した。

本研究はパルスの発振エネルギーを大きくするために超音波加工あるいは超音波塑性加工に用いられている振動子のひびわれ深さ測定への適用性およびBSに規格化されている測定方法について検討を加えたものである。

2. 超音波パルス法によるひびわれ深さ測定方法

コンクリート表面に見られるひびわれ深さ y はひびわれ線と直角方向のパルス伝播時間を測定することにより求められる。この場合、発・受振子をひびわれからそれぞれ距離 a の位置にして得られる伝播時間 T_c とひびわれのない位置で $2a$ の距離の伝播時間 T_0 を用いる方法（以下、Tc-T0法と呼ぶ）と発振子の位置を固定して受振子を一定間隔で移動させて得られる距離・伝播時間関係から図上でひびわれ位置での不連続時間 T を求めて計算する方法（以下、T法と呼ぶ）があり、それぞれ次式によりひびわれ深さを計算する。

$$y = a \cdot \sqrt{(T_c/T_0)^2 - 1} \quad \text{----- (1)}$$

$$y = \frac{T \cdot \cot \alpha \cdot (T \cdot \cot \alpha + 2a)}{2(T \cdot \cot \alpha + a)} \quad \text{----- (2)}$$

一方、BSには発・受振子を図-1に示すように配置して、ひびわれから $a_1 = 15\text{cm}$ 、 $a_2 = 30\text{cm}$ の位置での伝播時間 t_1 、および t_2 を用いて次式によりひびわれ深さを計算する方法が示されている。

$$y = 15 \cdot \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad \text{----- (3)}$$

超音波加工や超音波塑性加工では、振動子端面の振幅を拡大するために振動子の一端面にホーンをはんだ付けしたものを振動子として使用している³⁾ ホーンの形状としては Step 形、Exponential 形あるいは Conical 形など数種類があるが、ここでは Exponential 形ホーンのひびわれ深さ測定への適用性について検討した。中実 Exponential 形ホーンの大端面面積を S_1 、小端面面積を S_2 としたときの大端面から X の位置の断面積 S_x は、一次共振状態を利用して次式で与えられる。

$$S_x = S_1 \cdot e^{Yx} \quad \text{----- (4)}$$

$$Y = \frac{1}{L} \cdot \log_e(S_2/S_1), \quad L = \frac{C}{4\pi f} \cdot \sqrt{4\pi^2 + \{\log_e(S_2/S_1)\}^2} \quad \text{----- (4)}$$

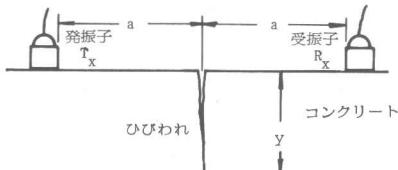


図-1：BSによるひびわれ深さ測定方法

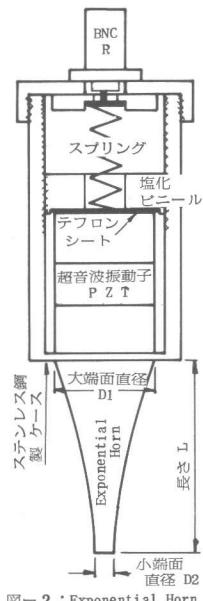


図-2：Exponential Horn 形の超音波発振子

ここで、 C : ホーン中を伝播する音速度、 L : ホーンの長さ、 f はホーンの一次共振振動数である。 f としては超音波振動子素子の共振振動数に一致させるのが有利である。

3. 実験の概要

使用した供試体は、図-3に示すように、 $30 \times 60 \times 50\text{cm}$ のもので、中央部に厚さ3mmの鋼板をあらかじめ挿入することにより人工ひびわれを作製した。人工ひびわれの深さは15, 7および0cmの3種類である。コンクリートの配合は1:3.38:3.58で水セメント比63.6%、スランプの範囲8

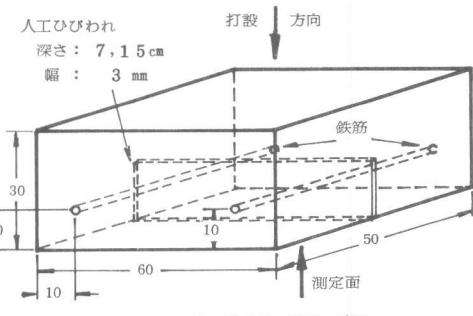


図-3：供試体の形状・寸法

~10cmである。使用材料は細骨材が野洲川産川砂（比重2.58、FM=2.65）、粗骨材が高槻産の硬質砂岩碎石（比重2.68、MS=2.0mm）である。ひびわれ深さ測定に与える鉄筋の影響を調べるために、D13~D25の間の5種類の鉄筋を鉄筋団心から10cmで配置した。

パルス伝播時間の測定は波形観察による方法を用いた。発振子には共振振動数170KHzのジルコン酸チタン酸塩セラミック素子（PZT-7:φ25mm）を3個重ねて一体とした共振振動数57.8KHzの超音波振動子素子を先端にホーンの付いた外径38mmのステンレス製ケースに入れたもの（図-2）および外径50mmの市販の振動子（共振振動数50KHz、PZT-5）を用いた。なお、ホーンの形状は大端面直径を $D_1 = 25\text{mm}$ とし、小端面直径は $D_2 = 5, 10\text{mm}$ の2種類とした。受振子は上記の市販の振動子およびホーン振動子と同じ種類でホーンのない円柱振動子を用いた。

4. 実験結果および考察

4.1 パルス速度について

T法でひびわれ深さを測定するには、式(2)からもわかるように、コンクリート表面のパルス速度 $V_0 = c \cot \alpha$ が必要である。図-4は表面法によるパルス速度測定結果を示す。パルス速度は振動子の形状によりみかけ上かなり異なっており、とくに円柱振動子を使用した場合には発・受振子の中心距離による差が大きいことがわかる。一方、ホーン振動子を発振子に用いると伝播距離による差は少なく、15cm以上の距離ではほぼ一定になっている。これは振動子端面が小さく、かつパルス振幅すなわちエネルギーの大きいホーン振動子を発振子として使用すると、発・受振子間の中心距離と振動子素子端間の距離との差が少なくなるためと思われる。また同じホーン振動子を用いても、受振子によりパルス速度が異なるのは振動子の性能により受振子の立上りが異なるためと思われる。以上の結果から、 $T_0 - T_c$ 法で円柱発振子を用いた場合には透過法によるパルス速度を採用し、(1)式を次のように

に変形して計算した。

$$y = \frac{1}{2} \sqrt{(t_c \cdot v_0)^2 - 4a^2} \quad \cdots \cdots (5)$$

4.2 ひびわれ深さについて

表-1は各測定方法による結果の一例を示す。これらの結果は各計算式をひびわれ幅3mmを考慮した形に変形して求めたものである。T法により計算する場合、ひびわれ位置での不連続時間 T を求めるのに個人誤差

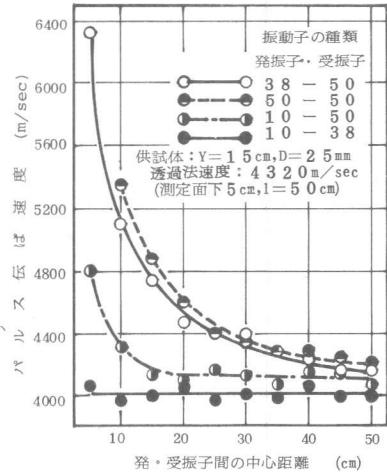


図-4：振動子の形状による速度の相違

表-1：振動子および測定方法の相違によるひびわれ深さの違い

供試体	振動子の種類 発・受	T-法	B S 法				$T_c - T_0$ 法			
			$a_1 = 5\text{cm}$		$a_1 = 10\text{cm}$		ひびわれからの距離			
			中心	端面	中心	端面	5	10	15	20
$Y=7\text{cm}$	$\phi 10-\phi 38$	8.1	7.0	7.1	8.5	9.3	7.4	7.8	8.3	6.5
	$\phi 10-\phi 50$	10.8	7.4	7.8	10.5	8.9	7.9	8.5	8.3	6.4
	$\phi 50-\phi 50$	11.0	8.4	8.5	7.3	8.9	7.8	7.3	7.8	7.6
$Y=15\text{cm}$	$\phi 5-\phi 50$	14.7	15.9	--	15.9	--	15.0	14.9	13.4	14.0
	$\phi 10-\phi 38$	14.2	15.2	15.2	15.8	15.6	14.9	14.9	15.4	14.2
	$\phi 10-\phi 50$	16.1	14.2	14.6	16.6	14.5	14.5	14.7	13.9	13.1
$D=19\text{mm}$	$\phi 50-\phi 50$	16.8	15.6	12.8	16.5	17.5	15.1	15.1	14.4	13.9
	$\phi 5-\phi 50$	16.3	14.0	--	19.6	--	15.3	15.8	13.1	13.1
	$\phi 10-\phi 38$	16.9	12.9	13.5	19.2	17.8	15.2	15.9	14.4	14.6
$Y=15\text{cm}$	$\phi 5-\phi 50$	16.4	14.5	16.3	17.1	17.5	15.5	15.7	15.0	14.6
	$\phi 10-\phi 50$	16.4	14.4	13.7	15.4	19.5	15.1	14.0	13.8	12.7
	$\phi 50-\phi 50$	16.4	14.4	13.7	15.4	19.5	15.1	14.0	13.8	12.7
$D=25\text{mm}$	$\phi 5-\phi 50$	16.4	14.4	13.7	15.4	19.5	15.1	14.0	13.8	12.7
	$\phi 10-\phi 38$	16.9	12.9	13.5	19.2	17.8	15.2	15.9	14.4	14.6
	$\phi 10-\phi 50$	16.4	14.5	16.3	17.1	17.5	15.5	15.7	15.0	14.6

を伴ないやすいことは前回指摘した通りであるが、²⁾この方法で求めたひびわれ深さは実際よりも大きくなる傾向にあり、この傾向はひびわれ深さが小さいほど、また円柱発・受振子を用いた方が大きくなるようである。

これは、図-2に示したように、円柱発・受振子による表面法パルス速度は伝播距離が短かいほどみかけ上大きくなるためと思われる。

$T_c - T_0$ 法も T 法と同様に表面法パルス速度が問題となるが、ホーン振動子を用いた表面法パルス速度は振動子の種類により異なるために、表-1ではそれぞれの組合せによるパルス速度を用いて計算したものを示す。

この方法によると、ひびわれ深さは $Y = 15 \text{ cm}$ の供試体でひびわれから 10 cm までの位置で測定すると、ほぼ土 0.5 cm 以内、 $Y = 7 \text{ cm}$ の場合には $\pm 1 \text{ cm}$ 以内の精度で測定が可能であることがわかる。一方、BS法では、式(3)から明らかのように、コンクリート中のパルス速度は必要でなく、前述のような速度測定における問題は生じない。しかしながら、ひびわれからの距離 a として振動子端面までの距離を採用し、また $a_1 = 1.5$ 、 $a_2 = 3.0 \text{ cm}$ で測定しているため次のような問題が考えられる。すなわち、振動子端面でパルスを受振しうるのかどうか、またひびわれからの距離を大きくすると受振波の立上りが悪くならないかと言う問題である。

写真-1は受振波形の一例を示す。受振波の立上りは円柱発振子とホーン発振子で大きな差はない、いずれの場合もひびわれからある距離になると受振波の位相が逆になり、利得も悪いが、利得は再び回復している。利得が悪くなるのは位相が逆転するためと思われるが、利得の回復は波動の回折理論から説明が可能である。すなわち、図-5に示すように、波動が半無限平面（ひびわれ）を回折して P 点に達したときの波動エネルギーは式(6)で与えられる。ここで A_0 は波動源から単位距離での振幅、 $A_C(V)$ は V はフレネル積分である。 b_0 として発振子からひびわれ先端までの距離を考え、式(6)から P 点でのパルスエネルギーを求めるところ、図-6(a)、(b)のようになる。すなわち、 P 点でのパルスエネルギー

$$\frac{I(P)}{A_0^2} = \frac{1}{2(b+b_0)^2} \left[\left(\frac{1}{2} - A_C(V) \right)^2 + \left(\frac{1}{2} - A_S(V) \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$V = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \bar{y}, \quad \bar{y} = \frac{\bar{x}}{b} Y, \quad \bar{x} = \frac{b+b_0}{b+b_0}$$

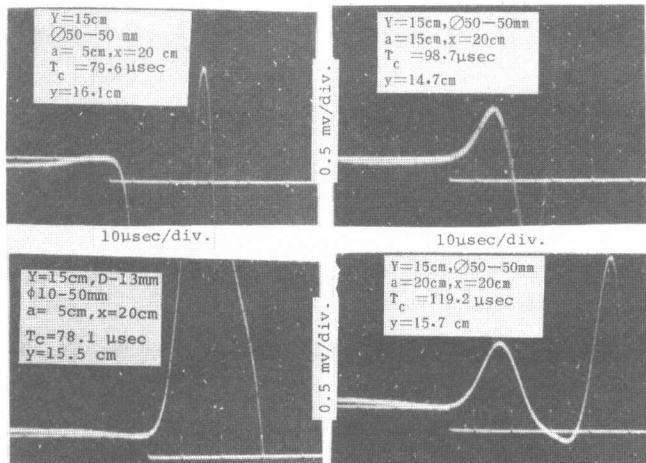


写真-1：受振波形の一例

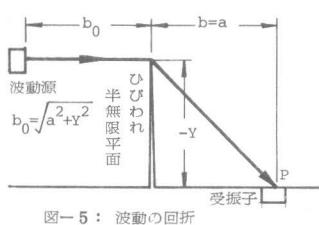


図-5：波動の回折

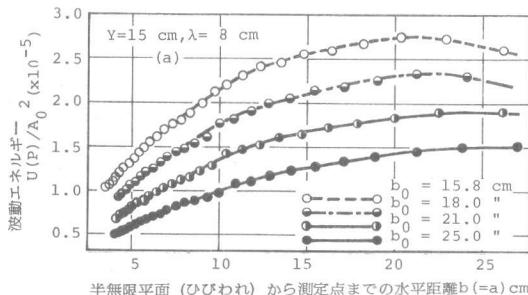


図-6：受振位置でのパルスエネルギーの変化

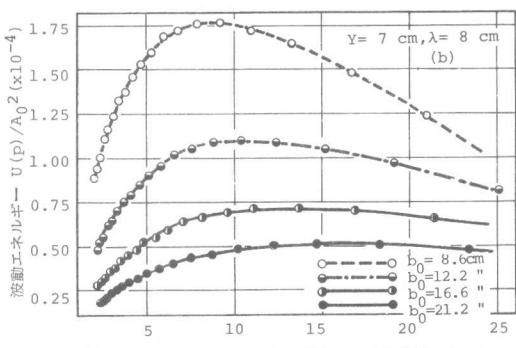


図-6：受振位置でのパルスエネルギーの変化

ーはひびわれからある距離まで徐々に大きくなるが、それ以上になると再び減少し、また受振子をひびわれから離すほど小さくなることがわかる。位相の変化による利得の減少については検討を要するが、受振パルスのエネルギーが最大となる位置に発・受振子を置きひびわれ深さを測定すると有利であると思われる。すなわち、回折理論での波動源の位置はひびわれ測定における発振子の位置とは異なっているが、本解析によると発・受振子とも予想されるひびわれ深さ程度に置くとパルスエネルギーが最大となり、測定が有利になると思われる。

B S 法では、ひびわれから振動子端面までの距離を $a_1 = 15$ 、 $a_2 = 30 \text{ cm}$ として測定することになっているが、上述の結果によると a_1 として予想されるひびわれ深さ程度とし、 $a_2 = 2a_1$ とするのが望しいと思われる。また振動子内の振動子素子の大きさは一般に明らかではないため、距離の測定は振動子素子の中心位置を用いるのが望しいと考えられる。

4・3 鉄筋の影響について

ひびわれが鉄筋位置よりも深い場合には、パルスは図-7に示すように3通りの伝播経路があり、測定位置によっては鉄筋の影響を受けることがある。各経路におけるパルス伝播時間は次式で与えられる。

$$t_1 = \frac{2\sqrt{a^2 + b^2 + x^2}}{v_0} , t_{2\min.} = \frac{2}{v_0} \{ \gamma \cdot x + \sqrt{(x^2 + b^2)(1 - \gamma^2)} \} \\ t_3 = \frac{2\sqrt{a^2 + y^2}}{v_0} , \quad \gamma = v_0/v_e , \quad z = \gamma \sqrt{\frac{x^2 + b^2}{1 - \gamma^2}}$$

----- (7)

ここで、 v_0 : コンクリート中のパルス速度、 v_e : 鉄筋近傍のパルス速度である。図-8は $Y = 15 \text{ cm}$ 、 $v_0 = 4170 \text{ m/sec}$ 、 $v_e = 5420 \text{ m/sec}$ の場合の鉄筋近傍でのパルス伝播時間を示す。領域A、Bはひびわれ透過パルスを最初に受振するために問題はないが、領域C、D、Eでは鉄筋透過波を最初に受振するために受振波を注意深く観察してひびわれ深さを測定する必要がある。写真-2は鉄筋の影響を受けた受振波形例であるが、ひびわれ透過波を十分に識別することができないためにひびわれ深さ測定の精度は悪くなる。しかし、受振波形を注意深く観察すれば鉄筋の影響はある程度取除くことができると思われる。

5. まとめ

本研究の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 振動子に円柱形を用いた表面法パルス速度は伝播距離により大きく変化するため、透過法速度を用いる必要があると思われる。
- (2) 振動子はひびわれから予想されるひびわれ深さ程度の位置にすると、受振パルスのエネルギーの点からも有利であり、測定精度もよいと思われる。したがって、B S に規定されている距離はより短かくした方がよいと思われる。
- (3) ひびわれが鉄筋位置まで達していて、鉄筋の影響を受けると考えられるところでは、受振波形を注意深く観察することによりある程度までは鉄筋の影響を取除くことができると思われる。

「参考文献」

- 1) British Standards Institution; Recommendations for Non-destructive methods of test for concrete., Part 5. Measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete. (BS 4408: Part 5: 1978)
- 2) 尾崎、明石、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、コンクリート工学年次講演会論文集、日本コンクリート工学協会、第2回、1979年、pp. 133~136
- 3) 島川正憲、超音波工学—理論と実際—、工業調査会、1977年5月、pp. 77~
- 4) 久保田 広、波動光学、岩波書店、1975年8月、pp. 237~308

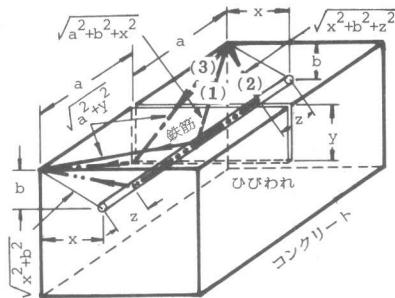


図-7：ひびわれ近傍のパルス伝ば

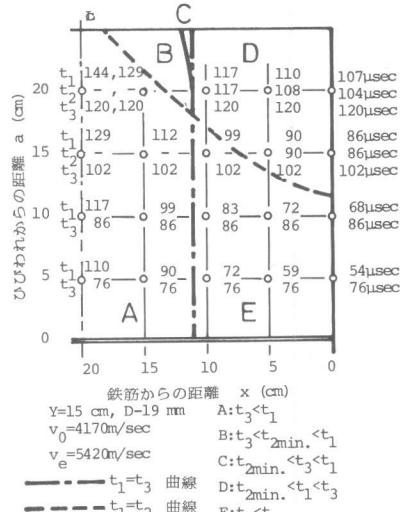


図-8：鉄筋近傍のパルス伝ば時間

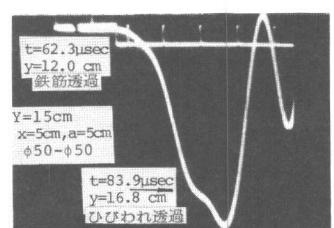


写真-2：受振波に与える鉄筋の影響