

[34] 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

正会員 ○ 尼崎 省二 (立命館大学)

正会員 明石外世樹 (立命館大学)

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いる。しかしながら、実際構造物における超音波パルス伝播速度の測定は、対象となる部材の大きさによる超音波パルスの減衰・コンクリート中のパルス速度に与える鉄筋の影響、さらに発受振子の種類(発受振素子の共振周波数および形状等)・受振波の利得によるみかけのパルス速度の相違など技術的に未解決の分野も多く残されている。また、実際のコンクリート構造物のひびわれ深さ測定はコンクリート表面から実施しなくてはならない場合も多く、この場合にはパルス伝播距離の測定が大きな問題となる。本研究はコンクリート構造物のひびわれ深さを測定する方法およびそのときの鉄筋の影響について検討したものである。

2 超音波パルス法によるひびわれ深さの測定方法

コンクリート表面にみられるひびわれ深さ y は、図-1 に示すように、ひびわれ線と直角方面の超音波パルス(以下、単にパルスと略す)の伝播時間を測定することにより求められる。この場合、米国などでは発・受振子をそれぞれひびわれから a の位置に置いたときの伝播時間 T_c とひびわれのない位置での距離 $2a$ の伝播時間 T_o から(1)式を用い、また英国などでは、発振子の位置を固定して受振子を連続的に移動したときの伝播距離と時間との関係から図上で時間 T を求めて(2)式を用いてひびわれ深さ y を求めている。

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

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

なお、ここで用いている方法は表面法であり、対称法に比べてパルスの伝播エネルギーは少なく、また伝播距離として発・受振子の中心距離を用いると伝播速度の計算が正確ではなくなる。受振波の立上りをよくして、測定精度を上げるためには図-2 に示すようなクサビを介することによりコンクリート表面に縦波を伝播させる必要がある。

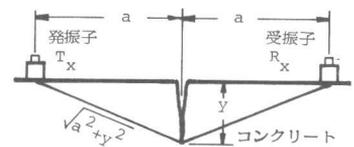
使用するクサビの種類および形状は、パルスの音圧透過率を最大とするとともに、クサビ内でのパルスの減衰を最小にし、かつコンクリート表面に縦波を伝播させるものでなくてはならない。そのためには次式を満足させる必要がある。

$$R_2 = \sqrt{R_1 \cdot R_3} \quad \text{---- (3)}, \quad \sin i = \frac{C_{p2}}{C_{p3}} \cdot \sin \theta \quad \text{---- (4)}$$

但し、 R は材料の音響インピーダンス、 C_p は縦波速度、添字 1, 2, 3 はそれぞれ発受振子の振動素子、クサビおよびコンクリートを表わす。 i はパルスのクサビからコンクリートへの入射角であり、 θ はコンクリート内のパルスの屈折角である。コンクリート表面に縦波が伝播するには $\theta = 90^\circ$ になるようにすればよい。

3 ひびわれ深さ測定に与える鉄筋の影響

1. ひびわれから発受振子まで等距離の場合



2. 発振子：固定、受振子の位置：移動の場合

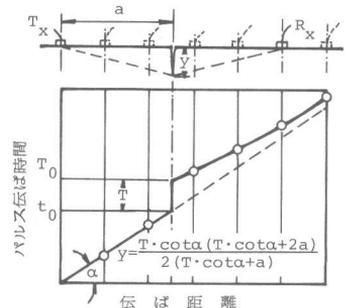


図-1：ひびわれ深さの測定手順

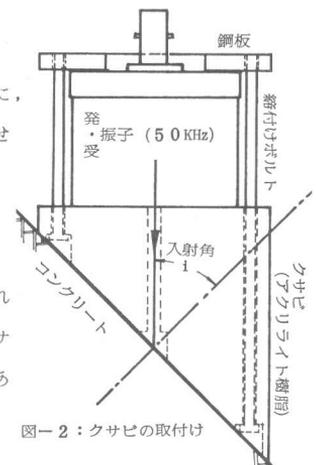


図-2：クサビの取付け

鉄筋中のパルス速度はコンクリート中よりも早いために、ひびわれが鉄筋位置よりも深いと深さ測定に鉄筋の影響を受けることがある。鉄筋の影響を受ける発・受振子の位置はパルスがひびわれ先端を迂回して伝播する時間 t_1 と鉄筋沿いに伝播する最小時間 t_2 との関係から求められ、鉄筋の影響を受けない発・受振子の鉄筋からの最小水平距離 X は次式で求められる。(図-3 参照)

$$x^2 = \frac{(\sqrt{a^2 + y^2} - \gamma \cdot a)^2}{1 - \gamma^2} - b^2 \quad \text{----- (5)}$$

(5) 式で求められる X は z の値が $z = \gamma \cdot \sqrt{(x^2 + b^2) / (1 - \gamma^2)}$ となるときに生じる。ここで、 $r = V_0 / V_e$ で V_0 はコンクリート中のパルス速度、 V_e は鉄筋沿いのパルス速度である。

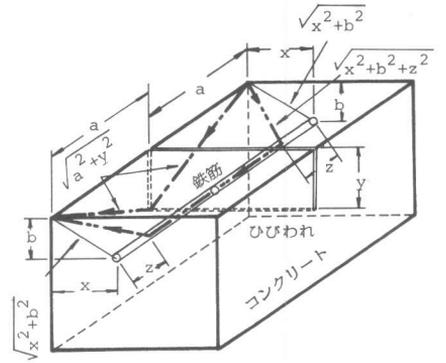


図-3： ひびわれ深さ測定に与える鉄筋の影響

4 実験の概要

ひびわれ深さ測定の精度および鉄筋の影響を調べるためにコンクリートの配合は一定とした。すなわち、1 : 3.38 : 3.58 で水セメント比 63.6%，スランプの範囲 8 ~ 10 cm である。使用材料は粗骨材が高規産の硬質砂岩砕石で最大寸法 20 mm，細骨材は野洲川産の川砂である。供試体は、図-4 に示すように 30 × 60 × 50 cm とし、厚さ 3 mm の鋼板をあらかじめ挿入することにより供試体中央部に人工ひびわれを作製した。その深さは 15，7 および 0 cm の 3 種類である。使用した鉄筋は D 13 ~ D 25 の間の 5 種類とシースのみの場合とした。鉄筋の図心からのかぶりはいずれも 10 cm である。

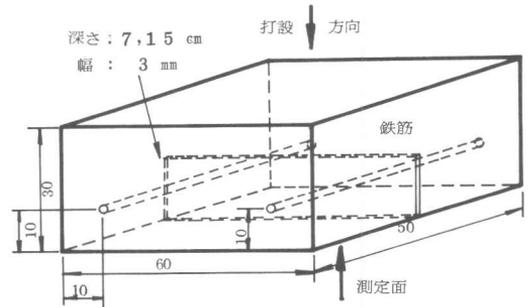


図-4： 供試体の形状・寸法

パルス伝播時間の測定は主として波形観察による方法を用い、発・受振子は直径 5 cm の鋼製柱に共振周波数 50 KHz のジルコン酸チタン酸塩セラミック素子を入れたものを使用した。クサビはアクリライト樹脂 ($R_2 = 3.48 \times 10^5$ C.G.S., $C_p = 2920$ m/sec) を用い、パルスのコンクリートへの入射角 i は 50° および 45° とした。なお、 $i = 50^\circ$ のクサビはコンクリートのパルス速度が 3800 m/sec 以上であればコンクリート表面に縦波が伝播するようにしたものである。また測定は表面法だけでなく、側面での透過法も採用した。

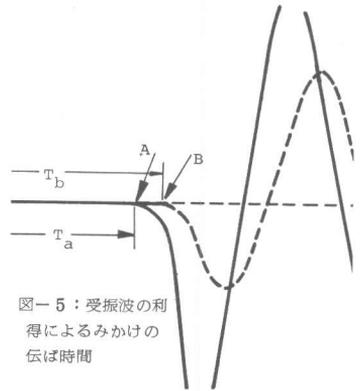


図-5： 受振波の利得によるみかけの伝ば時間

5 実験結果および考察

5.1 パルス速度について

パルス伝播時間は、図-5 に示すように、受振波の利得によりみかけ上かなり異なる。しかし、受振波のベースが乱れて立上りが不鮮明にならない程度まで利得を大きくしたときの伝播速度は弾性体中の理論パルス速度にはば一致するとされている。⁽¹⁾ 本実験でもこれらのことを考慮してできるだけ受振波の振幅を大きくして伝播時間を求めた。図-6 は表面法によるパルス速度の測定例である。表面法によるパルス速度はクサビの有無、種類によりかなりの差があり、とくにクサビを使用しない場合には、波形観察の有無にかかわらず発・受振子の中心距離による差が大きく、50 cm 程度離れたときに透過法による速度にほぼ一致している。一方、クサビを使用すると発・受振子の距離には関係なくほぼ一

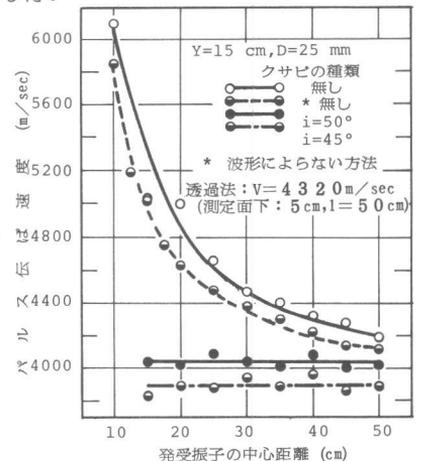


図-6： クサビの種類による速度の相違

定値であり、 $i = 50$ のクサビの方が透過法に近い値になっている。これらの原因はつぎのように考えられる。すなわち、クサビを使用しない場合には発・受振子間の最短距離を伝播したパルス波を観察しているにもかかわらず、伝播距離として中心距離を採用しているために距離が短いほど誤差が大きくなるためと思われる。一方、クサビを使用すると最短距離を伝播したパルスはコンクリート中よりも速度の遅いクサビ中をより長く伝播するために距離には関係なくほぼ一定値となる。しかしながら、クサビを使用した場合には受振波の立上りが悪くなるために伝播速度がみかけ上遅くなるものと考えられる。以上のことから、表面法によりパルス速度を測定する場合にはコンクリート表面に縦波を伝播させるようなクサビを使用することが望しいと考えられる。

5.2 ひびわれ深さについて

図-7は(2)式によりひびわれ深さを計算するために伝播距離 a と伝播時間 t との関係プロットしたものである。この場合には、距離 a がひびわれ位置よりも大きいところの $t-a$ 曲線の形状に注意しなくてはならない。すなわち、この $t-a$ 曲線はひびわれ位置で極小値となり、またひびわれ位置までの $t-a$ 直線の延長上に漸近する曲線であることを確認する必要がある。しかしながら、図-7のようにこれらの条件がクサビの種類にかかわらず満足されていても、表-1に示しているようにクサビの種類によりひびわれ深さの推定値に差が生じていることに注意しなくてはならない。これは表面法によるパルス速度のみかけ上の相違と $t-a$ 曲線の引き方により時間 T が異なるためと思われる。表-1はパルス速度および計算方法の違いによるひびわれ深さの相違を示したもので、(1)式による計算は図-7の個々のデータについて求めた4箇の値の平均値で示してある。なお、この場合は発・受振子のひびわれまでの距離が異なるため、(1)式はそのまま使えない。表-1から、ひびわれ深さ測定的基础となるパルス速度の相違はひびわれ深さ推定値に大きな影響を与えるが、この影響はひびわれ深さが小さい程大きいことがわかる。また、 $Y = 15$ の結果から透過法による速度を用いた方が精度よく推定されている。ところでひびわれ深さ測定における発・受振子の位置はひびわれ

に近くし、かつひびわれから等距離にした方が精度よく、かつ計算も簡単である。すなわち、図-8および9に示すように、ひびわれから発・受振子までの距離が $Y = 7$ の供試体で 10 cm 、 $Y = 15$ の供試体で 15 cm になるとばらつきが大きくなるとともに、推定値も

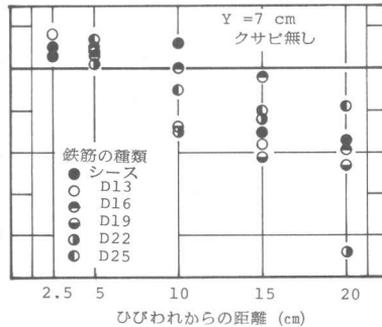


図-8：(1)式による計算例

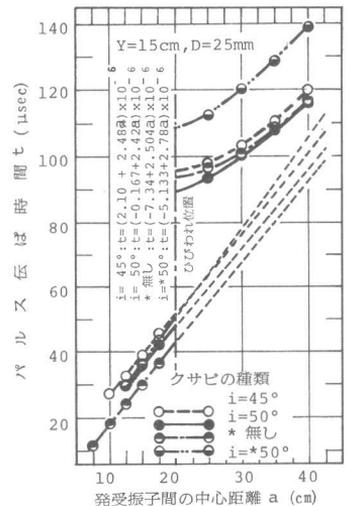


図-7：(2)式による計算例

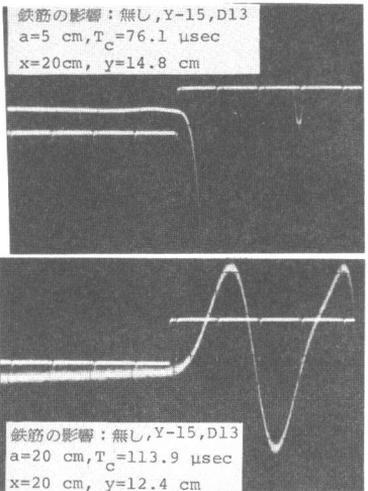


写真-1：測定距離（受振波の立上り）によるひびわれ深さ測定値の相違

表-1：計算方法およびパルス速度の相異によるひびわれ深さの違い

供試体	クサビの種類	(2)式による計算				(1)式による計算			
		$V = \frac{v}{\cot \cdot a}$ m/sec	t_0 μsec	T μsec	y cm	パルス速度 表面法使用		パルス速度 透過法使用	
						V m/sec	y cm	V m/sec	y cm
Y=7	45°	4010	51.0	19.5	6.7	3890	5.8	4210	9.5
	D-13	50°	4270	65.2	14.2	5.4	3810	4.4	"
Y=7	45°	4510	50.5	17.4	6.7	3730	4.7	4270	9.7
	D-25	50°	3790	53.0	11.0	3.8	3770	4.8	"
Y=15	45°	4010	49.1	43.3	13.3	4110	14.4	4300	15.8
	D-13	50°	4240	46.7	44.1	14.2	4300	15.2	"
Y=15	45°	4030	51.4	44.6	13.5	3880	12.3	4280	15.9
	50°	4130	48.2	41.4	13.1	4150	13.9	"	14.9
	*無し	3990	42.7	51.3	15.3	----	----	4200	14.5
	*50°	3600	50.5	58.5	15.7	4140	19.5	"	20.2

*：波形観察によらない方法

これは、ひびわれからの距離が大きくなると受振波の立上りが悪くなるためと思われる。写真-1は鉄筋の影響を受けないところでの受振波の一例である。ひびわれからの距離 a が 5 cm の場合の受振波の立上りは非常によく、ひびわれ深さの推定も十分な精度でなされているが、 $a = 20\text{ cm}$ となると立上りが悪くひびわれも小さく推定されている。このように立上りの悪い受振波はクサビを付けてひびわれ深さを測定した場合にも同様である。

5・3 鉄筋の影響について

表面法によるひびわれ深さ測定に与える鉄筋の影響を考える場合には、鉄筋近傍のパルス速度が問題となる。図-10は透過法でのパルス速度に与える鉄筋の影響を調べたもので、鉄筋からの距離 X が 10 cm よりも短くなると鉄筋の影響を受け、また鉄筋が太いほど V_e が大きくなる傾向にあることがわかる。鉄筋の近傍 ($X=0$) でのパルス速度はコンクリートと鉄筋との付着性状により異なると言われているが、本実験結果では V_e はコンクリートのパルス速度の 1.28 倍程度である。この場合、ひびわれ深さ測定に鉄筋の影響が生じない発・受振子と鉄筋との最小距離 X を(5)式により求めると表-2のようになる。この計算結果は図-9の測定結果とよく一致している。図-9は受振波形にみられる鉄筋の影響は無視して受振波の立上りから求めたひびわれ深さを示したものであるが、 $X = 10\text{ cm}$ のところで鉄筋の影響があり、ひびわれを実際よりも小さく推定している。しかしながら、 $X = 10\text{ cm}$ の位置でも受振波形を注意深く観察すると鉄筋の影響を取除くことが可能な場合がある。

写真-2は鉄筋の影響を受けている受振波形の一例である。写真中の(a)が鉄筋を透過したパルスであり、(b)がひびわれ先端を迂回してきたパルスであると考えることができる。鉄筋が細くて、かつ鉄筋の影響が表われはじめる位置では写真2-1および2のように鉄筋透過波とひびわれ透過波とは識別でき、ひびわれ深さは精度よく推定できる。しかし、発・受振子と鉄筋との水平距離が短い場合あるいは鉄筋径が太い場合には、鉄筋沿いに伝播するパルスのエネルギーが大きくなるために、写真2-3に示すように、鉄筋透過波とひびわれ透過波とが複雑になる。そのために両波の識別が完全でなくなり、ひびわれは実際よりも浅く推定されることになる。しかしながら、受振波形を注意深く観察することにより、鉄筋の影響もある程度取除くことができ、またひびわれ深さもかなりの精度で推定しうるものと思われる。

最後に、本研究は文部省科学研究費補助金により実施したことを付記し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Jones, R., and I. Facaoaru, Materials and Structures/ Research and Testing 2, No. 10, 275, 1969
- 2) Chung, W.H., Effects of embedded steel bars upon ultrasonic testing of concrete., Magazine of concrete research, Vol.30 No.102, March 1978

表-2: 鉄筋の影響を受ける発受振子の位置

ひびわれからの距離 a (cm)	$V_e = 5250\text{ m/sec}$ $V_o = 4200\text{ m/sec}$		$V_e = 5800\text{ m/sec}$ $V_o = 4200\text{ m/sec}$	
	x (cm)	z (cm)	x (cm)	z (cm)
5	17.0	26.2*	14.6	18.6*
10	13.4	22.3*	12.0	16.4*
15	11.7	20.5	11.2	15.8*
20	11.2	20.0	11.5	16.0
25	11.5	20.3	12.5	16.8
30	12.4	21.2	13.9	18.0

*: $z > a$ となるために考慮できず。
 $b = 10\text{ cm}$, $Y = 15\text{ cm}$

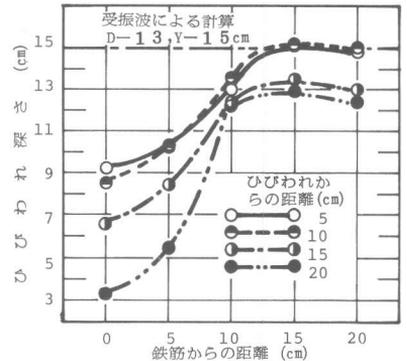


図-9: (1)式による計算例

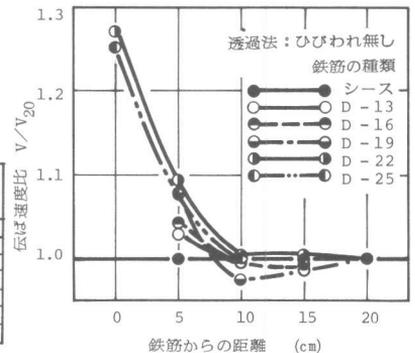


図-10: パルス速度に与える鉄筋の影響

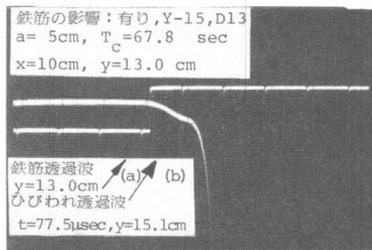


写真: 2-1

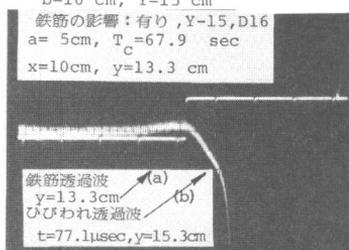


写真: 2-2

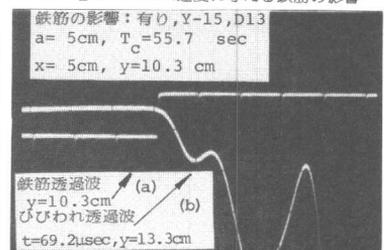


写真: 2-3

写真-2: 受振波に与える鉄筋の影響