

報告

[1102] コンクリート構造物における超音波試験法の改善

山口哲夫*1・丸茂文夫*2

1. まえがき

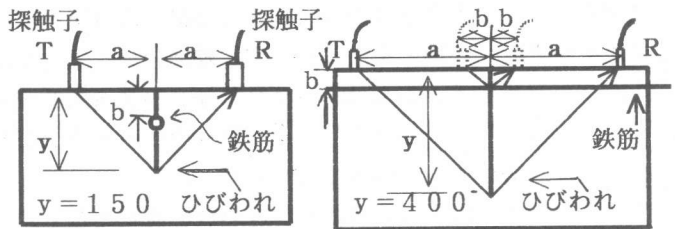
コンクリートの超音波試験では対応技術と実施例が必要であり、試験の精度向上を目的とした以下の改善案を報告する。(a) コンクリートのひびわれに鉄筋が介在する場合の、ひびわれ深さの測定法、(b) 超音波法で床版の厚さを測定する場合のうち、床版の端部付近の測定で起きる曖昧さを避ける方法の2案である。(a)のひびわれ深さ測定法は、発振・受信の両探触子をひびわれを挟んで等間隔に当て超音波を送波し、ひびわれの底の部分から送波の直接波と直角に進む回折波をコンクリート表面で検出し、その検出位置とひびわれとの距離から、ひびわれ深さを求める、直角回折波法 [1] [2] である。この測定の容易な場合と、鉄筋のために、ひびわれ深さの測定が妨害される場合の対応案を報告する。(b)のコンクリートの厚さ測定法は、低い繰り返し周波数で超音波パルスを送り、受信波をFFTアナライザでフーリエ解析する方法 [2] [3] [4] [5] である。この方法での床版の端部の測定では、平行対向面からの反射波以外に、端部の底隅の不要な2回反射波が小さく受信された。この対応案を報告する。金属超音波の鋭い主ビームの指向性と異なり、本報の送波探触子のコンクリート試験体300mm伝搬距離の指向性は、正面角度 $\pm 45^\circ$ 以内の受信音圧は同一、それ以上で急減し 90° の真横で正面音圧の $1/10$ の広角度であった。また各反射点を波源とする反射波の指向性は、放射の指向性と一般に似ている。従って端面や底面では、幾何光学的な角度以外の方向へも少量は反射し、伝搬していると思われる。

2. 鉄筋コンクリートのひびわれの深さの測定

2.1 容易に測定できる方法の要約

(1) ひびわれと平行な鉄筋

ひびわれに平行な鉄筋と垂直な鉄筋を対象にする。多くの実験室と実構造物での測定から以下のことが分かった。ひびわれに平行でひびわれ面内にある鉄筋(図-1(A))では、ひびわれ深さ y が、深さ100mmで



(A) ひびわれ面内の平行鉄筋 330(W)×420(L)×290(H)、 $b=40$
(B) 深いひびわれの垂直鉄筋 $b=45$ 程度

図-1 鉄筋のあるひびわれ深さの測定

±10mm程度の精度に測定された。また、ひびわれ深さと別に鉄筋かぶり厚さ $=b$ も、かぶり30mmで±5mm程度に測定された。しかし、ひびわれの中に平行鉄筋を含む、ごく浅い30mm程度のひびわれでは、鉄筋の影響が大きく、かぶりの寸法のみが測定された。

*1 山口哲夫 東横エルメス(株)技術顧問、工博(正会員)

*2 丸茂文夫 東横エルメス(株)技術研究所、特機グループ、課長

(2) 深いひびわれに垂直な鉄筋

ひびわれに垂直な鉄筋(図1-(B))のうち、現場の400mmなど、ごく深いひびわれでは、ひびわれ深さが鉄筋の妨害なしに測定できた。この深さ測定法では、深さと同じ寸法に、探触子をひびわれから離して測定するので、深いひびわれでは、ひびわれ部の鉄筋と探触子の距離が遠く、鉄筋を通る超音波は減少し、鉄筋による深さ測定の妨害がなくなった。

(3) 鉄筋間隔の1/2程度以下の中間的な深さのひびわれ深さ測定

ひびわれに垂直な鉄筋で、ひびわれがむしろ浅い場合には、(2)の逆で、鉄筋を通じた超音波が測定の障害となった。測定の超音波のうち、ひびわれの底で直接波と直角に進む波と別に、鉄筋を通じた波も鉄筋の貫通部分から直角に回折し伝搬して来た。この2種の経路の別の超音波の受信されることが分かった。経路を立体図で図-2に示す。ひびわれの底を通った波より先に、鉄筋を通った波が受信されると、ひびわれ深さ y は測定できなかった。鉄筋と探触子の立体的な距離を d とすると、図-2(上)の側面図で $y < d$ の場合に y が測定できた。 d が最大になるように、探触子を平行な

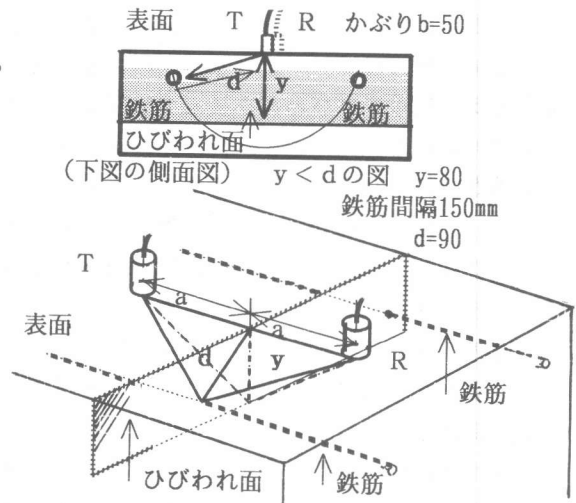


図-2 ひびわれ垂直鉄筋の鉄筋平行測定

2本の鉄筋の中央付近にあて、普通は測定した。現場では1本のひびわれに沿って50mm間隔など多数の a を測定し、 a の変動具合から鉄筋の中央を推定した。(注)この測定で、 $y > d$ でも、鉄筋の間隔が200mmなど大の場合には、超音波の指向性と距離が大のため、鉄筋を通じた超音波の振幅は低く、鉄筋が測定の障害とならなかった。なお図-2(下)で、 d が最小の鉄筋の真上では、かぶりが測定された。図-1(B)でも、鉄筋の真上で、かぶりが測定された。図-1(B)のかぶりの超音波は、本来は、ひびわれ深さの妨害超音波になるべきものだが、ごく深いひびわれのため、図-1(B)では、かぶりの超音波とひびわれ深さの超音波が受信時間で分離され、ひびわれ深さが測定出来ていた。

(4) 両探触子の結合線をひびわれと直角でなく、斜めに当てる測定

鉄筋が無い場合でも、また鉄筋のある図-1(A)のひびわれの場合でも、また現場の蛇行や鉄筋方向と斜めのひびわれ測定の場合でも、2つの探触子を結ぶ線(以下でこれをT-R線と呼ぶ)をひびわれと直角に当てず、斜めに当てても、標準の場合と同様にひびわれ深さが測定できた。従ってさらにT-R線(以下でこれをT-R線と呼ぶ)の方向を斜めに当てる測定法を検討した。

2. 2 鉄筋と斜めに探触子を当てるひびわれ深さの測定

(1) コンクリート供試体のひびわれ測定

(A)人工欠陥で測定した供試体の内容をつぎに示す。①コンクリート供試体の寸法: 30(W)×420(L)×290(H)mm。②鉄筋径: 20mmφ。③2本の鉄筋間隔: 150mm。④かぶり: 50mm。⑤人工欠陥ひびわれ深さ: 150mm。

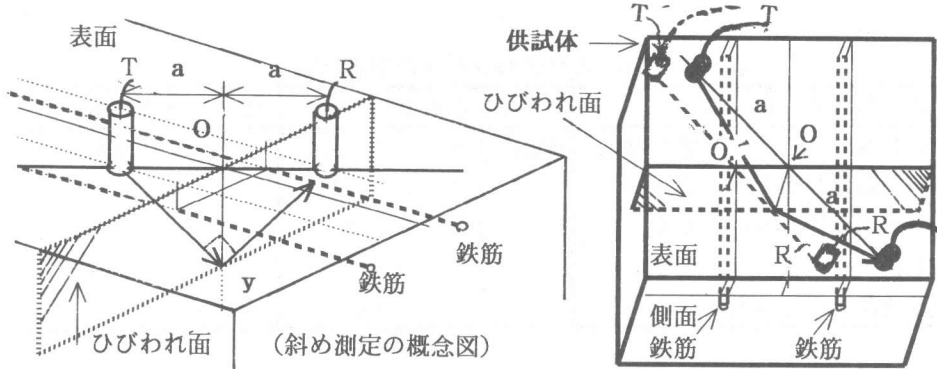


図-3 ひびわれ深さの鉄筋斜め測定

(B) この供試体で、まず図-2に示したT-R線を鉄筋と平行に当て測定した。y > dなので、dのみが読取値であり、ひびわれ深さは測定できなかった。

(C) しかし図-3に示すように、鉄筋と約45°の角度にT-R線を当てることにより、ひびわれ深さが測定できた。この当て方で、ひびわれが深い程、探触子は対象の鉄筋から遠ざかり、鉄筋を通した妨害超音波は減少した。この斜め測定では2つの方法がある。T-R線とひびわれとの交点をOとすると、O点を平行な2本の鉄筋の中央部に位置させるもの(図-3の左または右のT-O-R線)と、O点を鉄筋の上に位置させるもの(図-3右の斜めのT'-O'-R')である。O点を2本の鉄筋の中央部に位置させる斜め測定では、鉄筋の妨害受信波は全く検出されず、ひびわれ深さ150mmが測定できた。この位置で測定の超音波は図-3の左のように、ひびわれの底で、2本の鉄筋の間で直角に回り込んで受信されている。一方、O点を鉄筋の上に位置させる斜め測定では、T-R線が鉄筋に平行な測定よりは有利だが、T-R線上で探触子を上げた場合の、妨害波でひびわれ深さの測定できない範囲は、b = 50から110mmに及んだ。しかし110mm以上の深いひびわれは測定でき、O点が鉄筋上の斜め測定でも深さ150mmが測定できた。後者の斜め測定が、測定範囲としては不利な場合である。現場では、有利な鉄筋の中間位置を探すよう多数測定で対応した。

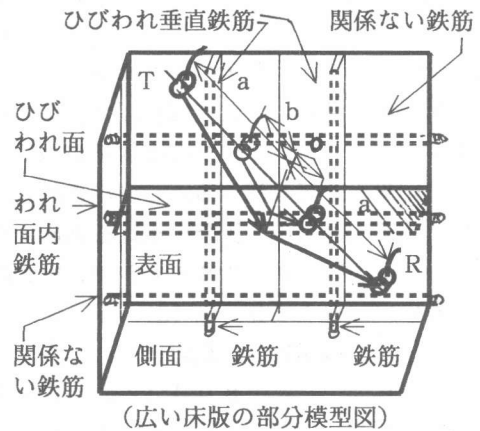


図-4 床版のひびわれの鉄筋斜め測定

(2) 床版でのひびわれ深さの測定

床版の表面に入った1本のひびわれ深さを、約1250mmにわたり、約250mm間隔の5か所の位置で測定した。測定では、T-R線を鉄筋に斜めとし、ひびわれを垂直に貫通する2本の鉄筋の中央部に、斜めなT-R線とひびわれの交点Oが来るように配置した。ひびわれは多少は蛇行しているが、大体は1本の幅方向の鉄筋に沿っていた。すなわち幅方向の鉄筋がひびわれ面と平行の鉄筋であった。鉄筋は縦横と上下2重の配筋であった。広い床

版の中の測定点の1例を模型図として図-4に、床版の内容と測定結果を表-1に示す。

表-1 床版とひびわれ深さの測定結果

床版と鉄筋		ひびわれ深さ		測定妨害範囲
項目	1 床版の厚さ 220mm	測定点	1 140mm	30~40mm
	2 幅方向の鉄筋かぶり 30		2 140	“
	3 長さ方向鉄筋かぶり 46		3 170	“
	4 鉄筋径 16		4 160	“
	5 鉄筋間隔 100と125		5 180	40~80

表-1で妨害範囲とは、ひびわれ面内の平行鉄筋の斜め測定で生じた、かぶりに相当した、ひびわれ深さの測定できない範囲である(図-4参照)。ひびわれ深さの測定結果は床版の両端面に見られる、ひびわれ深さと同程度であった。

3. 床版の端部での厚さ測定

床版の端部に近い位置での厚さ測定では、不要な波である、底と端面との2回反射波がわずかに測定された。結果と対策を述べる。この厚さ測定法では概略測定と正確な測定の2段階の測定を実施するが、以下のスペクトル図は第一段階のもので、厚さ測定値は第二段階の値である[3][4][5]。

3.1 端部効果の測定例

400(T)×1800(W)×3760mm(有筋)と200(T)×580(W)×870mm(無筋)のコンクリートの床版の中央から幅方向の端部までの各点で厚さを測定した。結果を図-5と図-6に示す。図-5の測定値は音速3.7km/sで校正した。図-5、6ともに、幅の中央および端部にごく近い位置では、厚さの反射波のみが測定された。しかし厚さ寸法の75~50%程度、端部より奥の位置では、厚さの反射波以外に、端面(側面)と底の2回反射波が小さく受信された。厚さ200mmの図-6のスペクトル図の中の記号で、ごく小さなスペクトル線aは送波の繰返し周波数1kHzのもの、cは厚さの反射波のスペクトルである。端より150mm奥の位置の測定のスペクトル図には、bで示すように2回反射波のスペクトルが見られる。bのスペクトル高さが低いとは言え、厚さの反射波の周波数(反射波の到達時間の逆数)より低い周波数であるbのスペクトルの出現は好ましくない。厚さの反射波が、送波の直接波や回折波、残存震動波など各種の受信波のなかで、最も遠い位置からの、すなわち最も周波数の低い、位相の揃った波であると考え、この測定の解析をしているからである。なお図-5、6、7

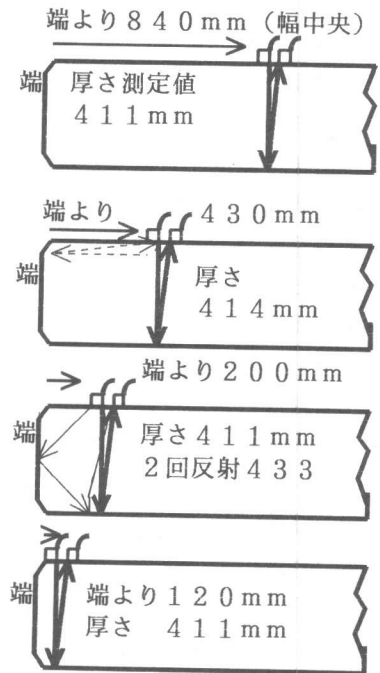


図-5 床版端部の反射波の経路

での波の経路としては、厚さを求める反射波および、広い指向角の反射で2回反射し、結果として受信された波の経路を、伝搬距離から推定し示す。2回反射波は厳密には幾何光学的経路でない波が受信されている。図は概略図で、行き帰り両方向の波の区別も検討していない。

3. 2 対策

従来は対策として、①端部「近く」の測定を避けること、②端部の効果を承知して、小さな反射波は無視すること。③むしろ端部に「ごく近い位置」で測定すること。④端部では送波パルスの周波数を変化させて厚さのスペクトルを確認することを実施してきた。今回は、この改善案として、超音波パルスの繰返し周波数を変化させ、それらの受信波のスペクトル線を加算平均化処理したスペクトル分布を調べる測定を実施した。測定結果を図-6の右側に示す。加算スペクトル図で周波数の低い側の最初の極大値cが厚さの反射波のものであった。この対策により、不要な2回反射波のスペクトルは消失するか、かなり低くなり、端部での厚さ測定の不安がなくなった。このあと、次の第二段階の測定に進む。

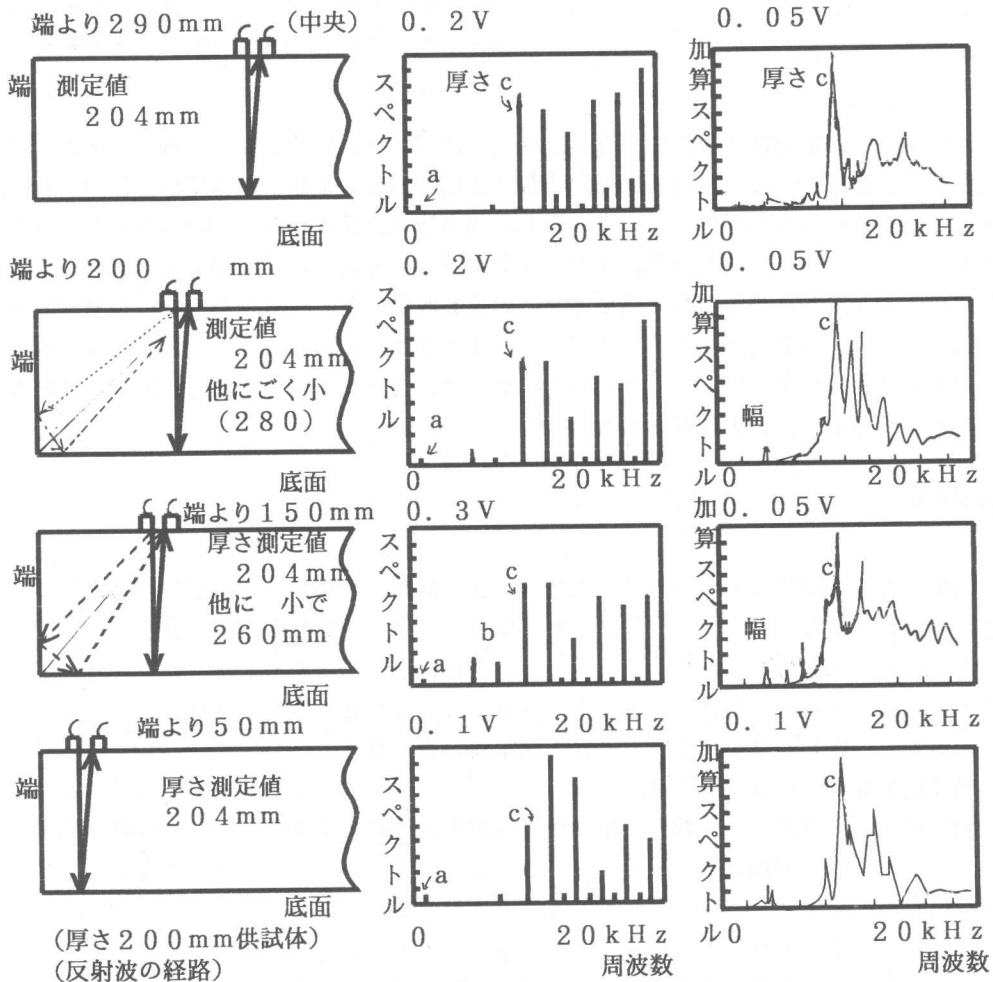
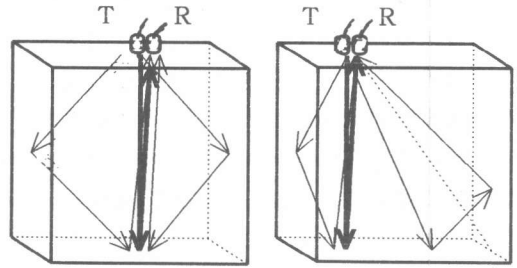


図-6 端部の厚さ測定での反射波経路、スペクトル及び加算スペクトル

3. 3 端部効果の考察

コンクリート端部で超音波が2回反射することは、コンクリートの超音波の周波数が低く、放射や反射の指向角度の広いことが原因している。ひびわれ深さの測定や傾斜対向面の反射波の受信で、放射指向性が大と理解できるが、反射指向性も大で光学経路以外に少しは反射している。なお供試体の測定では加算スペクトルに、幅や長さの反射波もごく小さく出ていたが、本報の目的外なので省略した。2回反射の他の例として、寸法が $1200 \times 1200 \times 500$ mmの直方形供試体の測定位置と波の伝搬距離(測定値)から推察した波の伝搬経路を図-7に示す。ごく小さな受信波まで測定したものである[6]。寸法が大なので、光学反射以外の経路の2回反射波が、幾つか、分離し測定されている。



太線は対向面反射経路
細線は2回反射推定経路、逆方向もあろう
図-7 直方形供試体の反射波の伝搬経路

4. まとめ

鉄筋のあるひびわれ深さの測定のうち、容易に測定できる方法の要約を報告のあと、この延長として、従来難しいとされて来た、床版の縦横の鉄筋の下側に入っている深いひびわれ深さ測定法の研究結果を報告した。すなわち、超音波の送受両探触子を結ぶ線の方法を鉄筋と斜めに当て測定する方法である。また厚さ測定では、床版の端部の測定で、底隅での2回反射波がわずかながら測定された結果とその対策を報告した。対策として、低い繰返し周波数の超音波の送波の受信波のフーリエスペクトルで厚さを求めるこの手法において、繰返し周波数を変化させながら得られる受信波を加算平均したスペクトル図を測定し、この極大値を見る方法を提案し、結果を報告した。

参考文献

- 1) 広野 進, 山口哲夫: 新しいコンクリートひび割れ深さ測定法と装置の開発、非破壊検査誌, Vol. 38, No. 4, pp. 302~308, 1989. 4
- 2) 山口哲夫, 丸茂文夫: コンクリートのひび割れ深さと厚さの測定法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 353~358, 1990
- 3) 山口哲夫: 新しいコンクリートの厚さ測定法と測定装置, 非破壊検査誌, Vol. 39, No. 3, pp. 217~222, 1990. 3
- 4) 山口哲夫, 丸茂文夫, 範錚亮: 波形解析の超音波法によるコンクリートの厚さ測定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 14, No. 1, pp. 703~706, 1992
- 5) 山口哲夫: コンクリートの厚さを計る, 超音波TECHNO, Vol. 3, No. 11, pp. 38~41, 1991. 11
- 6) 山口哲夫, 丸茂文夫: 超音波の厚さ測定法を利用したコンクリート供試体の測定, 土木学会コンクリート調査小委員会, WG関西実験測定結果報告, 1990. 10