

論文

[1113] コンクリート用マルチ超音波測定器の開発とその適用例

正会員 ○ 倉持 貢 (清水建設技術研究所)
 正会員 今井 実 (清水建設技術研究所)
 正会員 矢部喜堂 (清水建設技術研究所)

1. まえがき

既存コンクリート構造物の安全性・信頼性を向上させる為には、劣化診断技術や耐久性向上技術を早急に確立する必要がある。このような背景から、筆者らは超音波を用いたコンクリートの非破壊的・品質評価手法について種々検討し、新しい内部空隙の測定方法や圧縮強度の推定方法等について報告した。¹⁾本研究では、更にこれらの品質が測定可能なマルチ超音波測定器を開発し、その適用性等について検討したので報告する。

2. マルチ超音波測定器の仕様性能

2.1 概要

既に、コンクリート用超音波試験器は数多く開発されている。²⁾これらは主に伝搬時間を計測する仕様性能となっており、また単機能型のものが殆どである。この為、昨今の劣化診断や品質評価に於ける厳しい要求性能を満足することが困難な状況にある。

今回、開発したコンクリート用マルチ超音波測定器(図1)は、劣化診断時の評価項目である音速の測定をはじめとして版厚測定、アルカリ骨材反応や塩害等によるひび割れの深さ測定、打継ぎ部等に発生する内部空隙の検出更にかぶり厚さの測定及び圧縮強度の推定等が可能なものである。本装置は、周波数可変型の超音波測定器本体と広帯域型の低周波探触子から構成されている。

2.2 本装置の仕様性能

表1に本装置の主な仕様性能を示す。超音波測定器本体には従来の探傷器の機能の他にコンピュータを用いた計測、演算回路が内蔵されている。また励振パルスとしてバースト波を採用し、周波数は約20kHz～約1000kHz(3段階切換え)まで連続可変できる。

周波数に着目して、入力信号(励振周波数)と出力信号(受信周波数)の関係を二探触子・透過法で調査した結果が図2である。励振パル

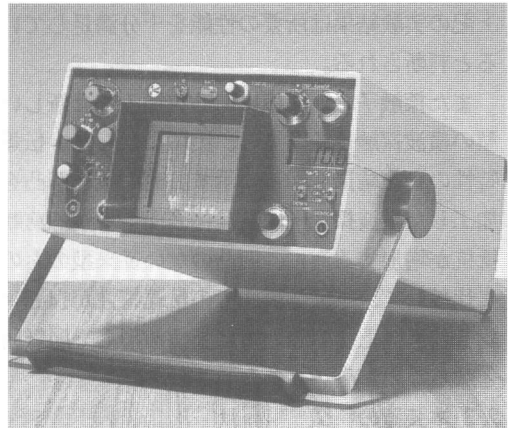


図1. コンクリート用マルチ超音波測定器
 表1. 主な仕様性能

	名称	仕様	
超音波測定装置	励振周波数	20~1000kHz 連続可変	
	送信電圧	約65V _{pp}	
	測定範囲	100 ~ 2000mm	
	測定モード	縦波, 横波	
	LCD表示内容	音速	3桁表示, 最小値 10 m/s
		伝搬時間	3桁表示, 最小値 0.1 μs
		版厚, 空隙かぶり深さ	3桁表示, 最小値 1 mm
ひび割れ深さ		3桁表示, 最小値 1 mm	
寸法	約W250mm×H130mm×D300mm		
重量	約 8kg (Nidバッテリー含む)		
探触子	縦波	0.5C40N, 0.5C20N (広帯域, ダンパー付)	
	横波	0.5Z40SN (広帯域, ダンパー付, 前面板凸凹有)	
接触媒質	縦波	ソニコート-E	
	横波	MULTI PURPOSE ULTRASONIC COUPLANT	

スの波数を1.5波とした場合、20kHz～250kHzの範囲では入力信号に対応した出力信号が形成されている。一方、波数を1波とした場合は1.5波の場合よりも若干広帯域となる為、150kHz以上の高周波帯域で両者の差異が生じてくる傾向にあると言える。

図3は励振周波数とパルス高さの関係を調査した結果である。高ダンピング型の縦波探触子の場合、卓越する中心周波数はみられず約50kHz～250kHzの範囲ではほぼフラットな周波数帯域を有していると判断される。周波数可変の機能はコンクリート中の伝搬特性を向上させる効果があることが既応の研究¹⁾で確認されており、上記の実験結果は所要の性能を十分満足していると判断される。

また探触子の前面板に凹凸を加工した新しい型の横波探触子を開発し、実験に供した。伝達特性の測定結果を図4に示す。前面板に凹凸を加工した横波探触子は試験体表面に於ける剪断抵抗が増加する為に、凹凸のない従来型のものに比較して、試験体表面での伝達特性が14dB(約5倍)向上するとともに受信波形も一層鮮明となる事が確認された。

2.3 本装置の特徴

本装置の特徴は以下のように纏められる。①音速、版厚、内部空隙、かぶり厚さ及びひび割れ深さ等の測定が1台で可能である。②測定方法が単純で、何れも構造物の片面からだけで測定できる。③材質に適合する超音波が選定できる為、各種のコンクリートに対応できる。④欠陥信号等の識別が容易で、人による測定誤差が少ない。⑤測定結果はすべてデジタル表示される。⑥軽量・小型で現場計測が容易である。

3. 本装置による品質測定例

本項では、コンクリートの音速測定、版厚測定、ひび割れ深さの測定及び圧縮強度の推定を例に、本装置の適用性を検討した。

3.1 試験体

実験に用いた試験体の形状寸法を図5に示す。TP-1, 2, 3の水セメント比W/Cは53%, TP-4は45%,

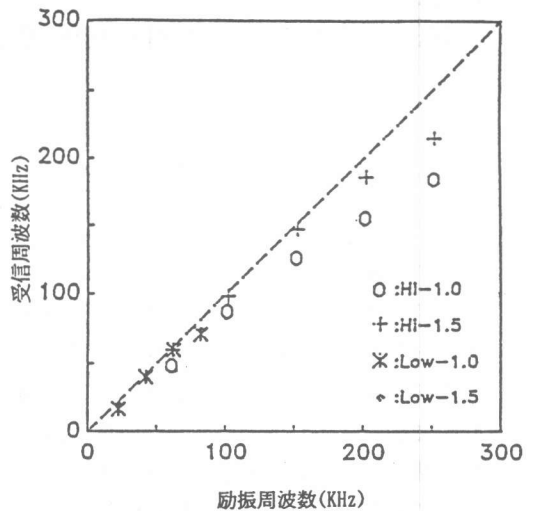


図2. 周波数可変機能の特性

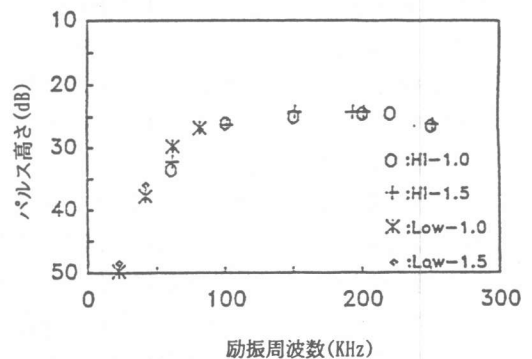


図3. 縦波探触子の周波数特性

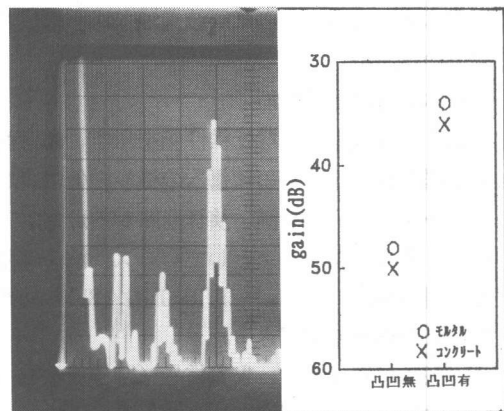


図4. 横波探触子の受信波形と伝達特性

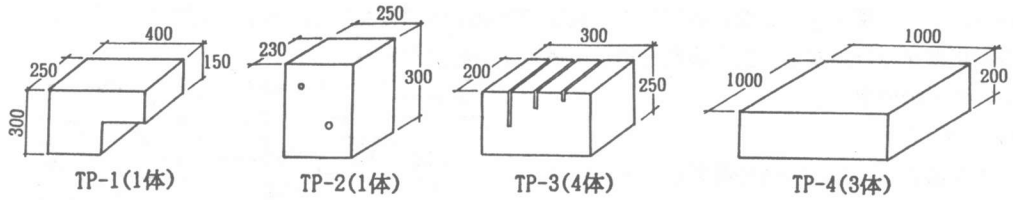


図5. 試験体の形状寸法

55%, 65% の普通コンクリートである。

3.2 音速の測定

(1) 測定方法

測定方法の概要を図6に示す。何れも超音波の伝搬距離（被検材の板厚、 L ）を超音波の伝搬時間（ t ）で除して、 $V=L/t$ (m/s) として表示するものである。本装置では上記の3つのモードでの測定が可能である。二探触子・透過法は、被検材の寸法が既知でかつ被検材の表裏面に送受信探触子を配置することが可能な場合に適用できる方法である。本装置では超音波の伝搬距離として被検材の実測寸法をデジタル表示部にインプットするとともにCRT上の透過パルスの立上がり位置にカーソルを一致させると、伝搬時間が自動計測され同時にデジタル表示部の表示モードをVELに切り換えることにより被検材の音速がデジタル表示される。二探触子・表面走査法は、被検材の片面に送受信探触子を一定間隔に配置し、表面近傍を伝搬する超音波を利用して縦波の音速を求める方法で、実構造物の音速を測定する場合に有効である。測定の手順は一探触子・透過法とほぼ同様である。ただし超音波の伝搬距離としては送受信探触子（ $\phi 20$ ）の中心間距離がインプットされる。一探触子・反射法とは、送信波から第1回底面エコーまでの伝播時間を用いる方法であり、縦波及び横波の音速の測定が可能である。尚、本実験では周波数を連続的に可変してパルス高さが最大となる状態で全ての測定を実施した。

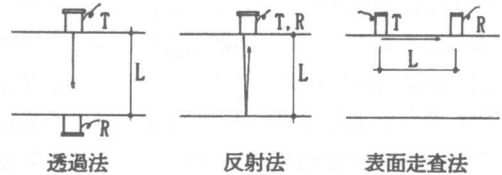


図6. 音速の測定方法

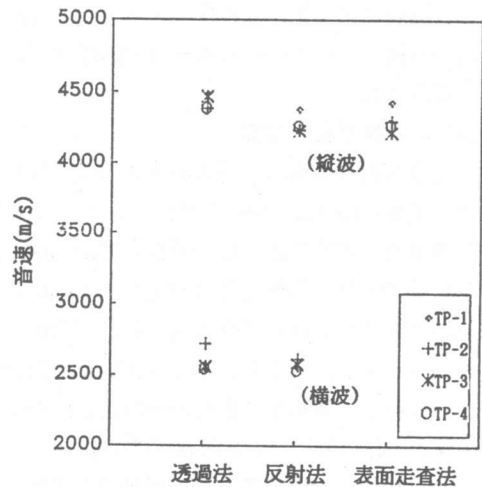


図7. 音速の測定結果

音速の測定は4体の試験体を用い、3種類の測定方法で実施した。音速の測定結果を図7に示す。横波の音速では測定方法や試験体による顕著な差異はみられない。一方、縦波の測定結果では試験体によって二探触子・透過法で測定した音速が他の2方法による結果よりも若干高い値（約200m/s）を示している。測定方法によって音速に差異がみられる主な原因としては、試験周波数の変化等が考えられる。

(2) 測定結果及び考察

音速の測定は4体の試験体を用い、3種類の測定方法で実施した。音速の測定結果を図7に示す。横波の音速では測定方法や試験体による顕著な差異はみられない。一方、縦波の測定結果では試験体によって二探触子・透過法で測定した音速が他の2方法による結果よりも若干高い値（約200m/s）を示している。測定方法によって音速に差異がみられる主な原因としては、試験周波数の変化等が考えられる。

上記の3種類の音速測定方法の作業性を比較すると、一探触子・反射法が最も良く、次いで二探触子・表面走査法、二探触子・透過法の順である。実構造物では、上記の測定方法はどれも欠くことができず、試験体の形状寸法や作業条件等によって使分けする必要があると考えら

れる。また二探触子・表面走査法による測定では試験体の表面状態、特にひび割れやジャンカ等の影響を受けやすく、測定場所を適正に選定する必要がある。

3.3 版厚の測定

(1) 測定方法

本装置による測定方法の概要を図8に示す。版厚(T)はコンクリートの基準音速(V_0)に超音波の伝搬時間(t)を乗じて、 $T=V_0 \times t(\text{mm})$ として表示するものである。本装置では、前項に示す何れかの方法で測定したコンクリートの基準音速をデジタル表示部にインプットするとともにCRT上の第1回底面エコーの立上がり位置にカーソルを一致させると、伝搬時間が自動計測され、同時にデジタル表示部の表示モードをDIS.に切り換えることにより被検材の版厚がデジタル表示される。

(2) 測定結果及び考察

版厚の測定も前項と同様の4体の試験体を用い、試験片の片面から一探触子・反射法で実施した。尚、版厚の算定に必要なコンクリートの基準音速は前項で述べた3種類の方法で求め、これらの結果を比較検討した。図9は版厚の測定結果であり、基準音速の測定方法ごとに示した。3方法の結果を比較すると、一探触子・反射法で求めた音速を基準音速とし、一探触子・反射法により版厚を測定した結果が最も測定精度が高かった。(誤差の平均 $\Delta t=3.7\text{mm}$)次いで二探触子・表面走査法(誤差の平均 $\Delta t=4.4\text{mm}$)、二探触子・透過法(誤差の平均 $\Delta t=8.6\text{mm}$)の順であった。ただし、測定誤差のばらつきは3方法ともほぼ同じで、約5mmである。

二探触子・透過法は送受信探触子を被検材を挟んで配置する必要がある、実構造物では適用が困難である。また二探触子・反射法には探触子間を伝搬する直接波と底面からの反射波との識別が困難となる等の問題点がある。以上の結果から、壁や床スラブ等の版厚測定には、片面測定可能な一探触子・反射法が最も有効であると考えられる。また同様の手法を用いて、内部空隙及びかぶり厚さの評価も可能であることが確認された。

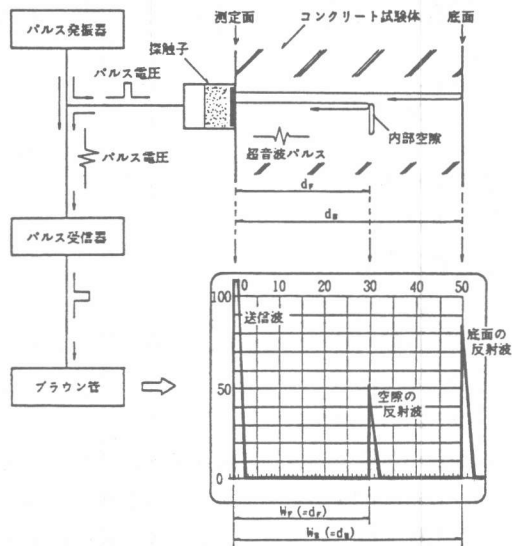


図8. 版厚の測定方法

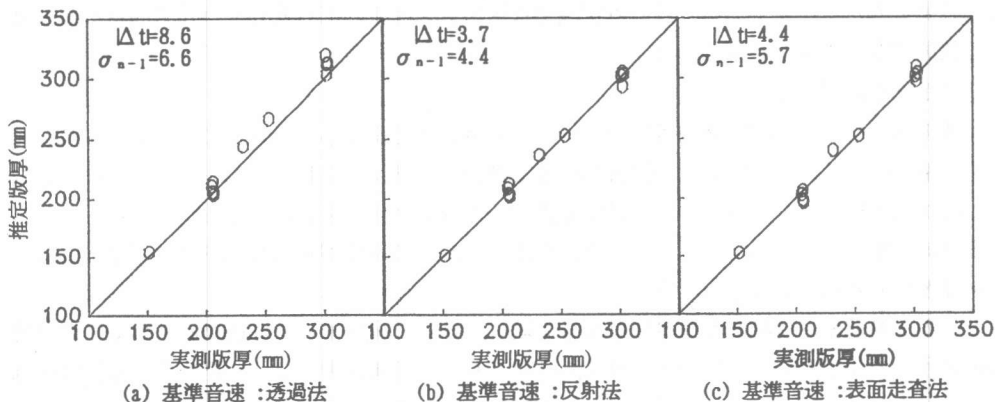


図9. 版厚の測定結果

3.4 ひび割れ深さの測定

(1) 測定方法

ひび割れの深さの測定方法を図10に示す。本研究では、ひび割れを挟むように送受信探触子を配置し（探触子中心間距離は任意）、ひび割れの先端で回折又は散乱する超音波を利用して測定した。（以下、回折波法という）本装置では回折波の立上がり位置にカーソルを一致させるとともに探触子中心間距離をインプットすることにより、測定値は自動的に測定面に垂直な深さに換算されてデジタル表示される。尚、ひび割れ深さの算定に必要な基準音速は実構造物への適用を考慮し、表面走査法により測定した。

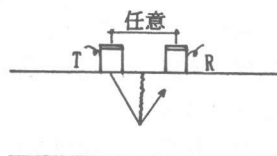


図10. ひび割れ深さの測定方法

(2) 測定結果及び考察

本研究では、人工ひび割れ（スリット）と自然ひび割れ（曲げ試験によりひび割れを発生）を対象に、これらの深さを回折波法で測定した。尚、自然ひび割れの実際深さは、ひび割れにエポキシ樹脂を注入し硬化させた後コアを採取して、その断面で測定した。

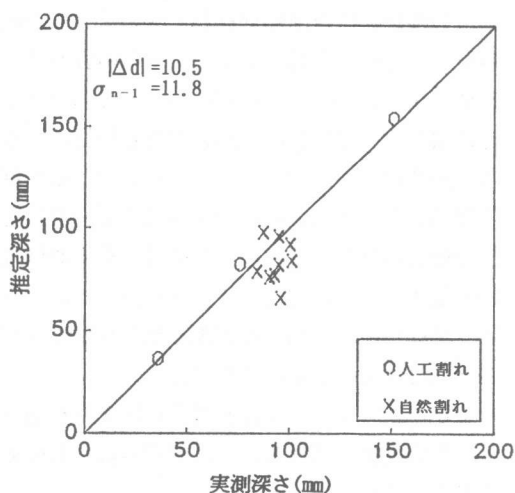


図11. ひび割れ深さの測定結果

ひび割れ深さの測定結果を図11に示す。人工ひび割れ（幅=0.3mm）の場合、深さの測定精度は $\Delta d=4.6\text{mm}$ （誤差の平均）である。自然ひび割れ（幅=0.2mm）の場合、探触子をひび割れに近接した状態で測定すると、ひび割れ深さを極めて過少評価（測定誤差の平均=-64.6mm）することが明らかになった。これは試験後の断面観察から当該深さに内部空隙や枝割れしたひび割れの交差部等が認められることから、これらからの反射波を受信したものと考えられる。一方受信波形を観察しながら探触子を走査して測定すると、ひび割れ深さは12.0mm以下の精度で評価できることが明らかである。この結果から、本方法ではひび割れ先端の回折波をほぼ適正に評価していると考えられる。またひび割れ先端部のひび割れ幅は断面観察から0.015mmであることが確認されており、ひび割れの検出能力に於いても十分であることが確認された。

実構造物に発生するひび割れは、より複雑な形状を呈しているのが一般的である。またひび割れには水分、ごみ、炭酸カルシウム等が付着している場合や鉄筋が貫通していたりする場合も多い。したがって今後、これらの影響を検討する必要があると考えられる。

3.5 圧縮強度の推定

(1) 測定方法

圧縮強度の非破壊的評価方法としては、これまでに超音波法（縦波）や併用法（シュミットハンマー法と超音波法の併用法）及び超音波複合法¹⁾（仮称）（6種類の超音波情報の組合せ法で筆者ら提案）等が開発されている。本実験は、1m×1mのコンクリート試験体から $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ のコアを58体を採取し、コア試験体で超音波試験とシュミットハンマー試験を行い、更に最終段階で圧縮強度試験を行う手順で実施した。超音波試験はコア試験体の底面から、縦波と横波の探触子を用いて一探触子・反射法で実施した。この場合の超音波データはマルチ超音波測

定器に接続したデジタルメモリーでA/D変換し収集し、受信波はシグナルアナライザーで再構築した後に解析した。またシュミットハンマー試験は、鋼製定盤(t=100mm)上にコア試験体を配置した状態で実施した。測定箇所は底面とし、5点の測定値の平均を反発硬度R₀とした。

(2) 推定結果及び考察

本実験では超音波音速法(縦波法)、シュミットハンマー法と超音波音速法との併用法及び超音波複合法の3種類の方法的推定精度を比較検討した。尚、併用法及び超音波複合法の圧縮強度の推定式は重回帰分析して求めた。推定結果は図12に示すようであり、以下のように要約される。①従来の強度推定法である超音波音速法では実測強度と推定強度との差の絶対値の平均値(以下、誤差の平均値という)は43.4kgf/cm²と大きくかつばらつきも大きい。②今後、非破壊的強度推定法の主流となると注目される併用法では、誤差の平均値は40.2kgf/cm²であり、超音波音速法やシュミットハンマー法を単独に用いるよりも圧縮強度の推定精度は向上する傾向にあると言える。③6種類の超音波情報(縦波と横波の音速、受信周波数、パルス高さ)を組合せた超音波複合法では、重相関係数からも明らかなように、圧縮強度の推定精度は併用法よりも更に向上していると言える。すなわち誤差の平均値は32.8kgf/cm²となり、また特に50kgf/cm²を越える誤差の発生する割合が超音波音速法や併用法に比較して大幅に低減する傾向にあることが明らかである。

上記の結果から、超音波複合法はより有効な評価方法であると考えられる。ただし、本報で示した強度推定式は最終的に確定されたものではなく実験を継続し更に検討を行う必要があると考えられる。

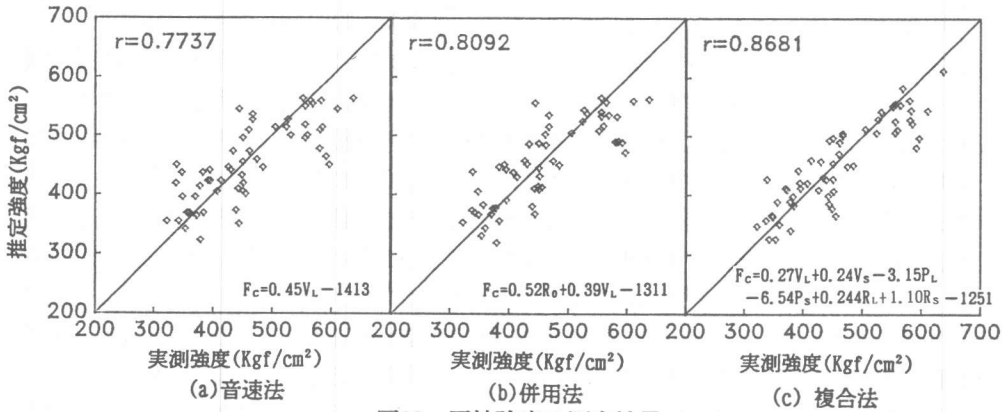


図12. 圧縮強度の測定結果

4. あとがき

今回、開発したコンクリート用マルチ超音波測定器は、コンクリート構造物の劣化診断や品質管理を行うに十分な性能を有していると考えられる。今後は、数多くの現場計測からデータの蓄積を行うとともに本装置の一層の改良を計る予定である。

(参考文献)

- 1) 倉持他; 送信周波数可変式超音波探傷装置を用いたコンクリートの品質評価方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 11-1, 1989. 6
- 2) 日本建築学会編; コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, 1983
- 3) 日本コンクリート工学協会; コンクリートのひびわれ調査・補修指針, 昭和55年 5月
- 4) 倉持他; 垂直二探触子・表面走査法によるコンクリートの音速測定について、日本非破壊検査協会 NDI第2分科会資料 NO. 21239、平成 1年 1月