

コンクリート用マルチ超音波測定器の開発と品質測定例

倉持 貢
(技術研究所)
矢部 喜堂
(技術研究所)
今井 実
(技術研究所)

§ 1. まえがき

半永久的と考えられてきたコンクリート構造物でも、アルカリ骨材反応や鉄筋腐食などが生じると、より早期に劣化し、耐用年数が極端に短縮されることがある。都市施設の多くがこのコンクリートで造られていることから、耐久性向上技術や劣化診断技術を早急に確立する必要が切望されている。一方、コンクリート構造物を取り巻く社会ニーズは高層化、高強度化、省力化、多様化へと変遷しつつあり、これに伴い新しい品質管理手法や施工管理技術の開発が切望されている。

表一は、コンクリートの劣化現象と既に提案されている各種非破壊試験法との関係をまとめたものである。いずれの非破壊試験法も、原理的もしくは実験室レベルでは有効であるが、実用化の段階に至っているものは少

ない。

このような背景から、筆者らは超音波試験技術に着目し、コンクリートの非破壊的品質評価手法について研究し、新しい内部空隙の測定方法や圧縮強度の推定方法などを提案してきた¹⁾。本報では、さらにこれらの品質が測定可能なコンクリート用マルチ超音波測定器を開発するとともに、その仕様性能および適用性について検討したので報告する。

§ 2. コンクリート用マルチ超音波測定器の仕様性能

2.1 概要

コンクリート用超音波試験器は既に数多く開発されている。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。このため、昨今の劣化診断や品質評価にお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。

筆者らは写真一に示すようなコンクリート用マルチ超音波測定器を開発した。本装置は、送信周波数可変型の測定器本体と広帯域型の低周波探触子から構成され、劣化診断時の評価項目である音速の測定を始めとして版厚測定、アルカリ骨材反応や塩害によるひび割れの深さ測定、打継ぎ部に発生する内部空隙の検出、さらにかぶり厚さの測定および圧縮強度の推定などが可能である。

	超 音 波	可視光・赤外線系			電気抵抗・電位系			電磁・渦流系		変 位 計
		電子カメラ	赤外線	X線	電気比抵抗	自然電位	イオン電極	電磁波	渦電流	
ひび割れ	ひび割れパターン		○		○					
	ひび割れ幅		○							
	ひび割れ深さ	○								○
中性化	中性化深さ							○		
	強度劣化	○								
鉄筋腐食	コンクリート中の塩分量						○			
	かぶり厚さ	○						○	○	
	腐食量(鉄筋径)					○		○	○	
	腐食性				○					
	腐食モニタリング				○					
圧縮強度	○									
内部空隙、充填度	○		○							
版厚	○									

表一 劣化現象と各種非破壊試験法



写真一 コンクリート用マルチ超音波測定器

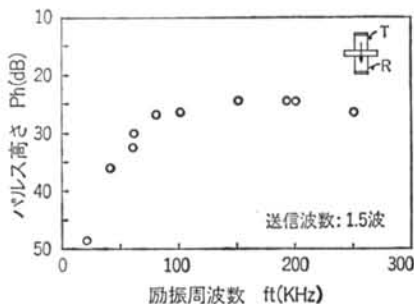
2.2 本装置の仕様性能

表一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、励振パルスとしてトーンバースト波を採用し、送信周波数は約20 kHz～約650 kHz（3段階切換え）の範囲で連続可変できる。

図一は、励振周波数とパルス高さの関係を二探触子透過法で調査した結果である。広帯域型の低周波探触子では卓越する中心周波数は見られず、約50～250 kHzの範囲ではほぼフラットな周波数帯域を有しているといえる。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述の研究¹⁾で確認されており、上記の実験結果で所要の性能を充分満足していると判断される。図二は、横波探触子の伝達特性を調査した結果である。前面板に凹凸を加工した新型の横波探

	名称	仕様	
超音波測定装置	励振周波数	20～1000 kHz 連続可変	
	送信電圧	約 65V _{p-p}	
	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 10m/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 1mm
ひび割れ深さ		3桁表示, 最小値 1mm	
寸法	約W250mm×H130mm×D300mm		
重量	約8kg (NiCd バッテリーを含む)		
探触子	縦波	0.5C40N, 0.5C20N(広帯域, ダンパ付)	
	横波	0.5Z40 SN(広帯域, ダンパ付, 前面板凹凸有)	
接触媒質	縦波	ソニコートE	
	横波	Multi Purpose Ultrasonic Couplant	

表一 主な仕様性能



図一 励振周波数とパルス高さの関係

触子では、試験体表面におけるせん断抵抗が増加するために、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 14 dB（約5倍）向上するとともに、受信波形も一層鮮明となることが確認された。

2.3 本装置の特徴

本装置の特徴は、以下のようにまとめられる。

- ①音速、版厚、内部空隙、かぶり厚さおよびひび割れ深さなどの測定が1台で可能である。
- ②測定方法が単純で、いずれも構造物の片面からだけ測定できる。
- ③材質に適合する超音波が選定できるため、各種のコンクリートに対応できる。
- ④欠陥信号などの識別が容易で、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. 品質評価例

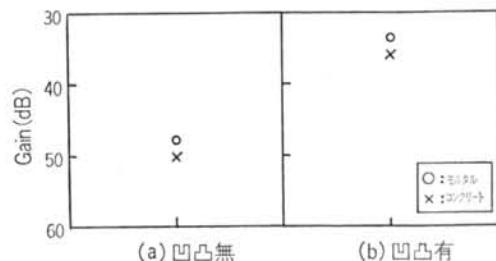
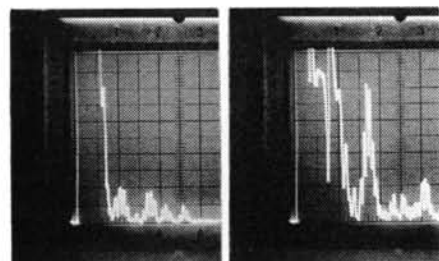
3.1 版厚の測定

(1)測定対象物

既存コンクリート構造物の健全度を評価し、補修・補強の要否を決める重要な評価項目に版厚がある。ここでは、建築構造物の床スラブ（建設後2年経過）および土木構造物であるシールド洞道（建設後15年経過、内径2.4 m）と、写真一に示すようなPC単純T桁橋（幅1 m、高さ1.1 m、長さ20 m）を対象に版厚を測定した。

(2)測定方法

超音波による版厚の測定方法には、一探触子反射法や



図二 横波探触子の受信波形と伝達特性

二探触子反射法および二探触子透過法などが提案されている。前2者は被検材の片面からの測定が可能であり、後者は送受信探触子を被検材を挟んで対向させるように配置する必要がある。ただし、二探触子透過法は実構造物には殆ど適用が困難である。また、二探触子反射法は現場計測における作業性が悪く、かつ探触子間のコンクリート表面を伝搬する受信波と底面からの反射波を識別することが困難となるなどの問題点がある。本装置では上記の3方法による版厚の測定が可能であるが、最も特徴的な方法は一探触子反射法である。本装置による測定方法の概要を図-3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、 $T=V_0 \cdot t$ (mm)として表示するものである。本装置では、透過法、反射法および表面走査法のいず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した後、CRT上の第1回底面エコーの立ち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

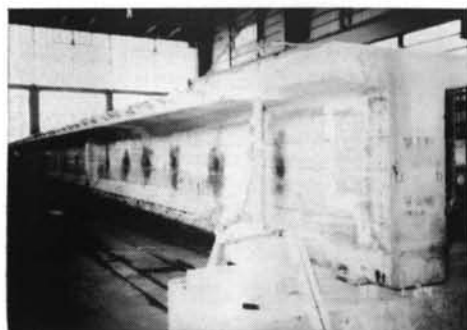


写真-2 PC単純T桁橋

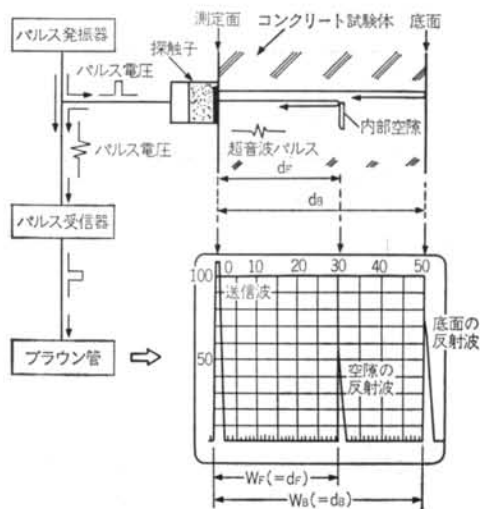


図-3 版厚の測定方法

換えることにより被検材の版厚がデジタル表示される。③測定結果および考察

建築構造物の床スラブおよびPC単純T桁橋で実施した版厚測定の結果を図-4に示す。縦軸は、被検体の片面から一探触子反射法で得られた測定値である。なお、版厚の算定に必要なコンクリートの基準音速(V_0)は表面走査法により求めた。横軸は、超音波試験後にコアを採取して計測した版厚の実測値である。版厚の測定誤差(誤差の平均値、 Δt)は約5mmであり、超音波による測定値は実際版厚と極めて良い対応関係にあることが明らかである。

シールド洞道では、二次覆工の版厚を測定した。調査箇所は108点で、測定は1断面3箇所(頂版、右壁、左壁)とし、1m間隔で実施した。ただし、当該構造物ではコアによる実際版厚の確認は実施していない。調査結果を図-5に示す。設計値を基準とすると、測定値の多くはこれより小さめで、薄肉となっている部分が多く見られる傾向にある。また、左右の側壁の版厚に差異が見られ、偏心している状態がうかがわれる。さらに、頂版の一部に著しく小さな版厚を示す部分のあることが判明した。薄肉部分は、コンクリートの充填が不十分であることを示していると考えられる。

一探触子反射法は手法的に簡単で、しかも現場計測時の作業性が良いなどの利点があり、壁や床スラブの版厚測定には有効な方法であるといえる。ただし、まだ底面

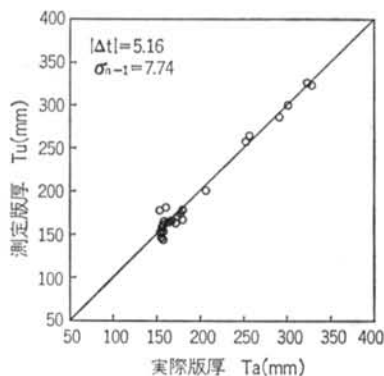


図-4 版厚の測定結果

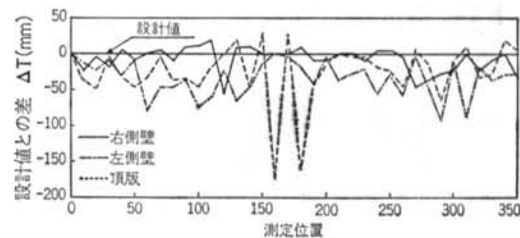


図-5 シールド洞道の版厚の測定結果

からの反射波と鉄筋や骨材からの反射波の識別には若干の経験が必要となる場合があり、特に内部ひび割れが発生した劣化部材や極厚部材などでは、反射波の識別法を確立する必要があると考えられる。

3.2 充填度の評価

(1)測定対象物

ハーフPC工法やPC型枠工法および鋼管型枠工法などは、型枠工事が簡素化できるとともに省力化や工期短縮が図れることから、本工法を採用したコンクリート構造物が数多く建設される傾向にある。しかし一方で、コンクリート打継ぎ部の品質管理法の確立など、解決すべき課題も多いのが実情である。ここでは、写真-3、4に示すようなPC型枠工法および鋼管型枠工法を用いたコンクリート構造物において、超音波によるコンクリートの充填度の評価を試みた。PC型枠工法を用いた試験体には、打継ぎ部(PC型枠と充填コンクリートとの界面)に種々の欠陥を挿入した。また、鋼管型枠工法の被検体は建設中の実構造物である。

(2)測定方法

PC型枠工法における打継ぎ部の充填度の評価は、前項の版厚測定と同様に一探触子反射法によった。また、鋼管型枠工法における充填度の評価も一探触子反射法を

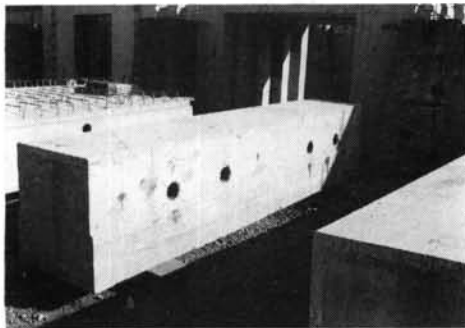


写真-3 PC型枠工法

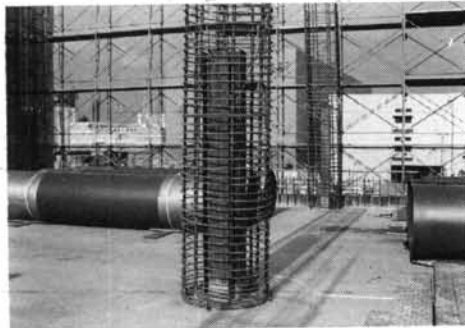


写真-4 鋼管型枠工法

採用したが、予備実験により評価の可能性を確認した後で実構造物に適用した。

(3)調査結果および考察

PC型枠工法における打継ぎ部の品質評価結果を図-6に示す。横軸は、超音波試験の後コアを採取し、目視により断面観察した結果を、良(○:欠陥無し)、やや不良(●:小さな欠陥有り)、不良(×:欠陥有り)に層別した結果を示している。縦軸は受信波のエコー高さである。打継ぎ部の充填度が良好な場合は、打継ぎ部分からの反射波は全く無いか、または約60dB以下とエコー高さが低いものが多く、逆に充填度が不十分と判断される部分(人工欠陥等)では約50dB以上とエコー高さが高くなる傾向にある。やや不良と判断される打継ぎ部では、エコー高さは前2者の中間値を示している。良好と判定されながらエコー高さが比較的高く(約50dB)なる部分は鉄筋のラップジョイント部等に対応している。また、図-7に示すように充填不足部分の深さは、適正な精度で評価できることが確認された。

上記の結果から、打継ぎ部の良否は超音波試験の一探触子反射法によって十分に判断できるといえる。しかし、充填度の最終的な合否基準は、部材強度への影響などを

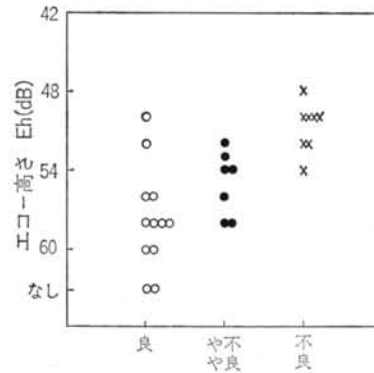


図-6 打継ぎ部の品質評価結果

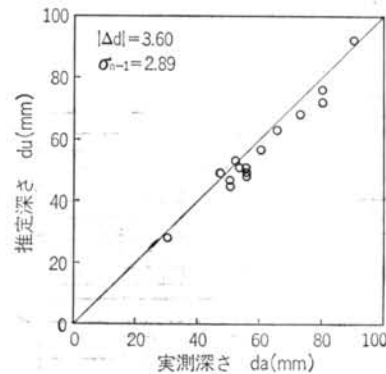
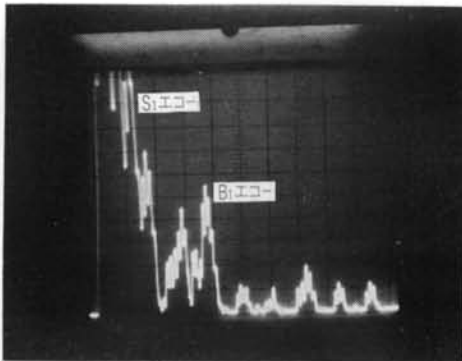
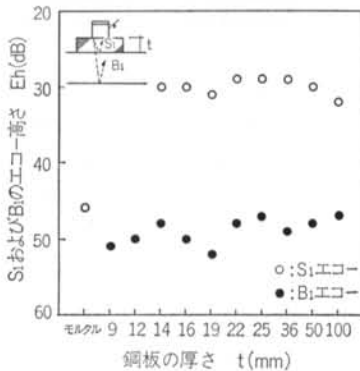


図-7 打継ぎ不良部の位置推定精度

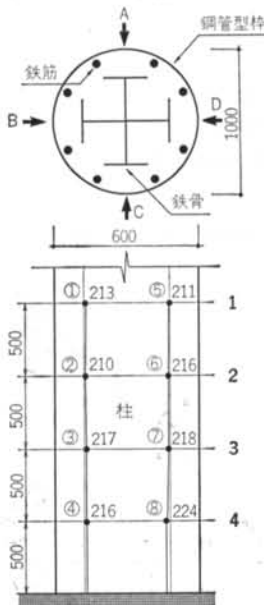
詳細に検討して決定する必要があると考えられる。
鋼管型枠工法における予備実験では、種々の板厚の鋼



写真—5 CRT 図形



図—8 鋼板—モルタル試験体における伝達特性



図—9 充填度の測定結果

板とモルタル試験体を用い、先ず鋼材上からモルタル中への伝搬特性を確認し、また同時に鋼板の板厚の影響などを調査した。予備実験で得られた CRT 図形を写真—5 に示す。鋼板とモルタルとの境界部からの反射波 (S_1) とともに、モルタルの裏面からの反射波 (B_1) が明瞭に観測されている。鋼板およびモルタルの裏面からの反射波すなわち S_1 および B_1 エコーに着目し、これらのエコー高さを調査した結果が図—8 である。モルタルの裏面からのエコー高さは、鋼板の板厚が薄くなるほど低下する傾向にあるが、最大でも 6 dB 程度の低下量である。したがって、鋼板上からでもモルタルおよびコンクリート中への超音波の伝搬は充分可能であり、またモルタルおよびコンクリート中の内部空隙の評価が可能であると考えられる。

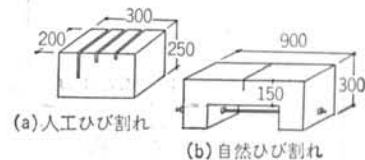
上記の方法を、鋼管型枠工法を用いた鉄骨鉄筋コンクリート構造(柱)の充填度の評価に応用した。測定は、柱 1 本当たり 1 断面 4 箇所 (A, B, C, D) とし、柱の上下方向に 500mm 間隔で実施した。この場合、コンクリート中の鉄骨フランジ面からの反射波が明瞭に検出されるか否かを基準に充填度の良否を評価した。結果を図—9 に示す。図には、超音波で計測された鋼管の表面から鉄骨フランジ面までの深さを測定値として表示した。これらの測定値は設計値に対して若干の差異が見られるが、鉄骨フランジ面からの反射波は全測定点で明瞭に検出できることから、当該柱のコンクリートの充填度は良好であると判断された。

以上の結果から、充填度の評価および内部空隙の検出にも、版厚測定と同様な一探触子反射法が有効であることが確認された。また、同様の手法を用いれば、最近話題となるタイル等仕上げ材の剝離の評価等への応用も充分可能であると考えられる。

3.3 ひび割れ深さの測定

(1)測定対象物

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測定し、その評価精度を調査した。試験体の形状を図—10 に示す。



図—10 試験体の形状寸法

(2)測定方法

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また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、回折波の立ち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。なお、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。また、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。

(3)測定結果および考察

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 $\Delta d=4.6\text{mm}$

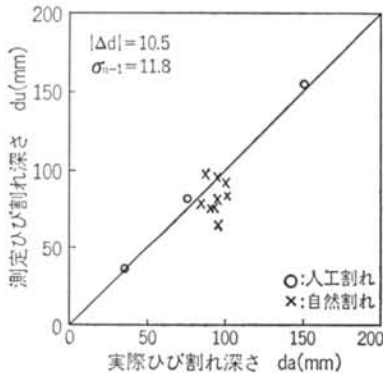


図-11 ひび割れ深さの測定結果

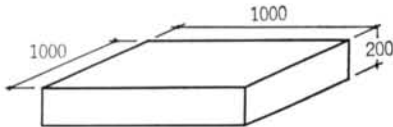


図-12 試験体の形状寸法

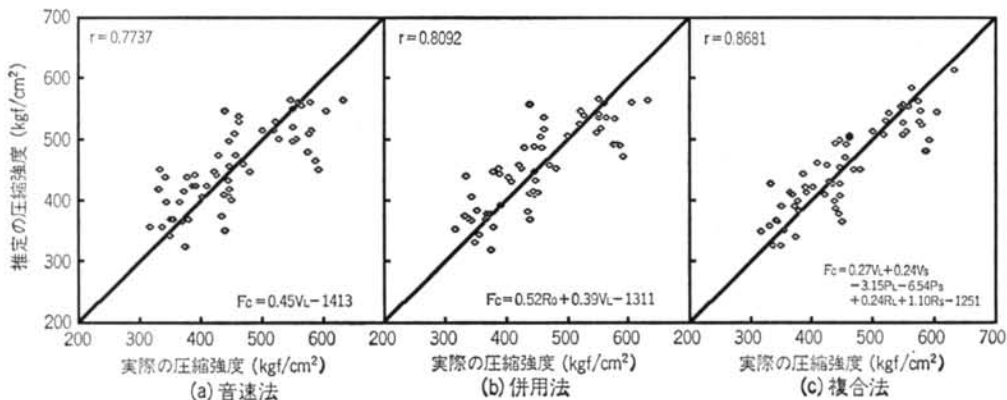


図-13 圧縮強度の推定結果

(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分かれしたひび割れの交差部などが認められることから、これからの反射波を受信したものと考えられる。一方、探触子を走査しながら測定すると、自然ひび割れの深さは12.0mm以下の精度で評価できることが明らかである。これは、探触子の走査中にひび割れ中間部の散乱波から先端部の回折波への受信波形の変化が観測されることから、両者を分離することが可能で、ひび割れ先端部の回折波をほぼ適正に受信できているためと考えられる。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おいても充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、炭酸カルシウムなどが附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。

3.4 圧縮強度の推定

(1)測定対象物

本実験に供した試験体の形状寸法を図-12に示す。試験体数は3体とし、これらの水セメント比 W/C は45, 55, 65%の普通コンクリートである。

(2)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)および超音波複合法¹⁾(仮称:6種類の超音波情報の組み合わせ法で、筆者らが提案)などが開発

されている。本実験は、図-12に示すコンクリート試験体から $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ のコア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ない、さらに最終段階で圧縮強度試験を行なう手順で実施した。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 変換して収集し、受信波はシグナルアナライザ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 ($t=100 \text{ mm}$) 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 R_0 とした。

(3) 推定結果および考察

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および超音波複合法の3種類の推定精度を比較検討した。なお、重回帰分析して求めた圧縮強度の推定式を以下に示す。

$$F_c \text{ (音速法)} = 0.45 V_L - 1413 \quad \dots\dots(1)$$

$$F_c \text{ (併用法)} = 0.52 R_0 + 0.39 V_L - 1311 \quad \dots\dots(2)$$

$$F_c \text{ (複合法)} = 0.27 V_L + 0.24 V_S - 3.15 P_L - 6.54 P_S + 0.24 R_L + 1.10 R_S - 1251 \quad \dots(3)$$

ここで、 F_c : 圧縮強度の推定値 (kgf/cm^2)

R_0 : 反発硬度

V_L, V_S : 縦波および横波の音速 (m/s)

P_L, P_S : 縦波および横波のパルス高さ (dB)

R_L, R_S : 縦波および横波の受信周波数 (kHz)

推定結果は図-13に示すようであり、次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 43.4 kgf/cm^2 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 40.2 kgf/cm^2 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いえる。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）を組み合わ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さらに向上しているといえる。すなわち、誤差の平均値は 32.8 kgf/cm^2 となり、また特に 50 kgf/cm^2 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、実験を継続しさらに検討を行なう必要があると考えられる。

§ 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な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図り、本装置の一層の改良を行なうとともに、評価技術の向上と普及を図る予定である。

コンクリート構造物の安全性・信頼性を向上させるために、これらの成果が少しでも役立てば幸いである。

<参考文献>

- 1) 倉持, 他: “超音波によるコンクリート圧縮強度の推定方法に関する研究” 清水建設研究報告 第48号 (昭和63年10月)
- 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” 日本建築学会 (1983年)
- 3) 日本コンクリート工学協会編: “コンクリートのひびわれ調査・補修指針” 日本コンクリート工学協会 (昭和55年5月)
- 4) 明石: “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 第390号 (1989年)
- 5) 柏: “コンクリートの非破壊試験法” 富士物産報 (1981年)

