

論文

[1085] 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

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

近年、ビルや高速道路等に於いてアルカリ骨材反応や塩害によるひびわれ、剥離、鉄筋腐食などが顕在化されるに伴って、コンクリート構造物の耐久性が1つの社会問題となっている。この為、コンクリート構造物の劣化診断技術や耐久性向上技術の開発が急務とされている。一方、鉄骨造によることが一般的であった高層ビルさえも、経済的な優位性の観点からコンクリート構造で建設される傾向にある。この場合、高品位の高強度コンクリートを使用する必要性があるところから、現場施工に於ける新しい品質管理手法の開発が切望されている。

表1はコンクリートの劣化現象と各種非破壊試験法との関係をまとめたものである。何れも可能性はあるが、実用化する為には今後さらに研究・開発が必要であると言われている。

このような背景から、本研究では、送信周波数可変式超音波探傷装置を導入すると共に高ダンピングの低周波探触子を開発し、コンクリート構造物の施工管理や既存コンクリート構造物の耐力診断などに必要とされる内部空隙、版厚及び圧縮強度等の非破壊的評価方法について検討したので報告する。

2. 探傷装置の主要性能

実験に用いた送信周波数可変式超音波探傷装置及び探触子の主要性能を表2に示す。本探傷装置は、送信周波数を連続的に可変できる機能を有しているとともに、送信波を形成するための駆動パルスとして、単パルスと変調パルスの何れかが選択できる機能を有している。本探傷装置を採用したのは、コンクリート中の超音波の伝播特性を向上させるためであり、また変

調パルスを採用したのは、従来の単パルスによる励振方法で発生しがちな高調波成分を低減させる効果があると考えられるからである。また探触子は縦波、横波の2種類で、何れも受信波の距離分解能等を向上させる目的で本実験用に開発した高ダンピングの低周波探触子である。超音波データ(受信波)は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。

表1. 劣化現象と各種非破壊試験法

	超音波	可視光・赤外線系		電気抵抗・電位系		電磁・渦電流系		変位計
		電子カメラ	X線	電気比抵抗	自然電位	電磁波	渦電流	
ひびわれ	ひびわれパターン		○		○			
	ひびわれ幅	○						
	ひびわれ深さ	○						○
中性化	中性化深さ						○	
	強度・中性化深さ	○						
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2. 探傷装置及び探触子の主要性能

名称	型式	主要性能
超音波試験器	スウェプト フレイクンシー (KARLDEUTSCH製)	①励振周波数範囲: 80kHz ~ 10MHz ②パルス幅 : 0.4 ~ 140 μs ③変調モード : Sin、Triangle ④変調乗数 : 1, 2, 4 乗 ⑤ゲイン調整器 : 80 dB ⑥寸法 : W164XH177XD325
探触子	0.5C40N 1Z40X40SN (ツルハ・70-7製)	中心周波数 : 500kHz 中心周波数 : 1000kHz

### 3. コンクリートの空隙測定

#### 3.1 実験の目的

建築生産性向上技術の開発を目的として、各所でコンクリートの複合化工法の開発が進められている。PC版等を用いた複合化工法は型枠工事を簡素化できることから建設工期の短縮等の効果をもたらす一方でコンクリート打継ぎ部の品質評価方法の確立等、解決すべき課題も多い。

本研究では、コンクリート打継ぎ部に生じる空隙の検出方法として、前項に示した探傷装置を用いると共に垂直一探触子・反射法の適用を試み、これらの有効性について検証した。

#### 3.2 試験体

試験体の形状寸法を図1に示す。試験体数は7体で、コンクリート打継ぎ部には0.1~2.3mmまでの内部空隙を人工的に作成した。

#### 3.3 実験方法

従来の探傷器や探触子を用いた垂直二探触子・反射法では、超音波の伝播特性がコンクリートの材質によって大きく左右されるばかりでなく、内部空隙からの反射波は長時間にわたって振動する送信パルスと重なり合って、両者の判別が困難となるのが一般的である。また2個の探触子の適正な配置は内部空隙の位置によって変化するなどの問題点を有している。

このため本実験では、図2に示すような手法的に簡便な垂直一探触子・反射法を採用した。実験で得られる超音波情報は、探触子を試験体表面に配置した後、送信周波数を連続的に可変して、反射波が最大を示した状態で採取した。なお、内部空隙の深さを算定する場合に必要な基準音速は試験体の端面を利用して二探触子・透過法により測定した。

#### 3.4 実験結果及び考察

コンクリート打継ぎ部に生じた内部空隙を探傷した場合の受信波形の例を図3に示す。超音波の駆動パルスを従来の単パルス型とした場合コンクリート打継ぎ部の内部空隙からの反射波はまだ明瞭とは言いがたい状態である。一方、駆動パルスに変調パルスを用い、しかも励振周

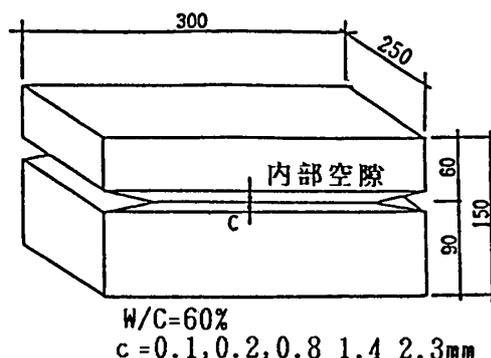


図1. 試験体の形状寸法

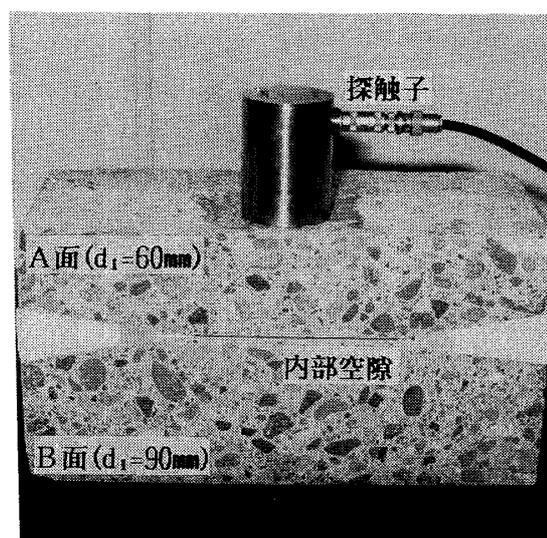


図2. 垂直一探触子・反射法

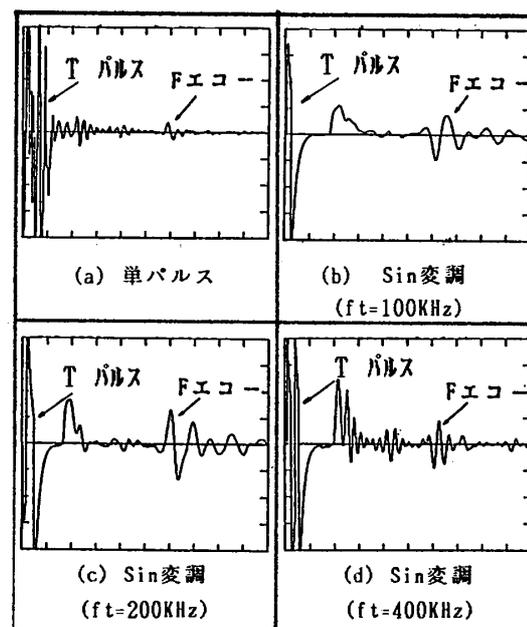


図3. 適性探傷条件の選定

波数を100～500kHzの間で変化させた場合で、約200kHzの励振周波数で最も明瞭でかつエコー高さの高い（従来法より約23dB高い）反射波が得られている。内部空隙が内在する試験体ではすべて図3(c)と同様にコンクリート打継ぎ部の空隙からの反射波が明瞭に受信されていることから、超音波では0.1mmまでの空隙を十分検出することが可能であると言える。これは、コンクリートの材質に適合する励振周波数が選択可能な送信周波数可変式超音波探傷装置では従来の単パルス型の探傷装置に比較して伝播特性及び欠陥検出能力を向上させる効果があることを意味していると考えられる。一方、送信パルスの長さに応じて試験体の表層部に生じる不感帯は約40mmである。

図4は音速測定結果と反射波の立上がり時間から、内部空隙の深さを推定した結果である。図から明らかなように空隙の深さの測定精度は±3mmである。内部空隙深さの推定誤差が生じる主な原因としては、探触子の不感帯に起因して反射波の立上がり時間が不鮮明となることやコンクリートの音速が各試験体によって若干変化すること等が考えられる。更に鮮明な反射波を得るためには信号処理技術等の導入を考える必要があると考えられる。

送信周波数可変式超音波探傷装置を用いた垂直一探触子・反射法は内部空隙の検出のみならず床スラブ等の版厚測定やコンクリートの充填度の評価にも適用が可能である。参考までに建設現場の探傷状況と測定結果の例を図5、6に示す。

#### 4. 圧縮強度の推定

##### 4.1 目的

コンクリート構造物の耐力診断やビル建設時の施工管理等に必要とされる圧縮強度の非破壊的評価方法としては、これまでに反発硬度法、貫入抵抗法、引抜き法、ブレイク・オフ法、マチュリティ法、超音波法、併用法等が開発されている<sup>1)</sup>。しかし何れも充分には実用化された方法とは言いがたいのが現状である。

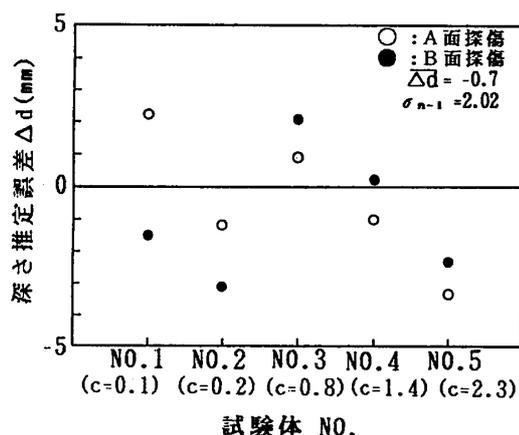


図4. 内部空隙深さの推定精度



図5. 探傷状況

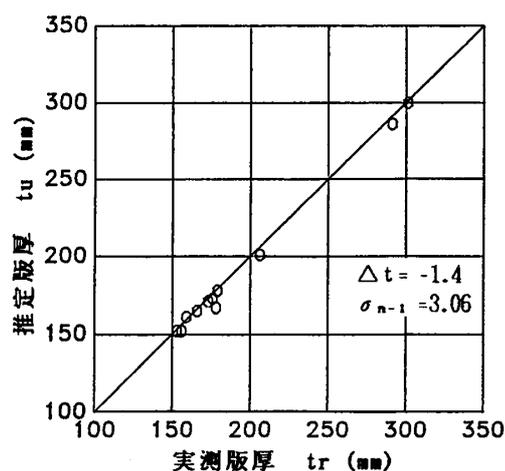


図6. 版厚測定結果

このような背景から、本研究では、種々の超音波情報と圧縮強度および材料特性との相関関係について調査し、更に超音波による圧縮強度の評価方法について検討した。

### 4.2 試験体

実験に供した試験体は、超音波試験用と圧縮強度試験用（ $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 円柱形）の2種類とした。超音波用試験体の形状寸法を図7に、コンクリートの配合を表3に示す。試験体の長さは6種類、圧縮強度レベルは3種類に変化させた。何れもコンクリート打設後3日目に脱型し、水中養生とした。

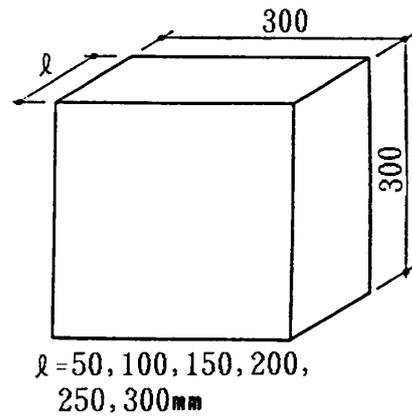


図7. 試験体の形状寸法

### 4.3 実験方法および実験条件

超音波試験は、探触子の型式、駆動パルスの形状、パルス幅および励振周波数等を種々変化させ（試験条件の総数=16種類）、しかも二探触子・透過法で実施した。実験装置の構成を図8に示す。試験項目は、各試験体の音速、受信周波数および透過パルス高さである。

表3. コンクリートの配合表

TP No.	水セメント比 W/C (%)	スランブ (cm)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					試験体数
				水 W	セメント C	砂 S	砂利 G	ボツス No70	
A-1	53	16+2	48.9	169	318	873	922	795	6
A-2	63	16+2	56.0	179	283	1001	794	708	6
A-3	43	16+2	43.0	155	355	769	1030	888	6

### 4.4 実験結果および考察

超音波試験で得られる情報（以下、超音波情報という）とコンクリートの材料特性との関係を明らかにする為に、変数増減法による逐次重回帰分析を行った。ここで、従属変数は6種類の超音波情報すなわち縦波と横波の音速、受信周波数および透過パルス高さとし、説明変数は7種類の材料特性すなわち水セメント比、細骨材率、粗骨材率、空気量、試験体の長さ、密度、圧縮強度とした。また変数の取り込み及び切り捨ての基準値であるF値は2.0として分析した。なお分析に用いた超音波情報はSin変調、パルス幅 (PW)=5  $\mu\text{s}$ 、送信周波数  $f_t = \text{Max kHz}$  の試験条件で測定されたものである。

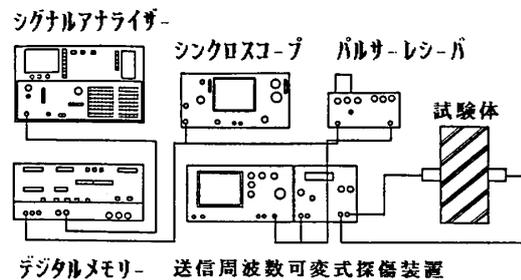


図8. 実験装置の構成

重回帰分析の結果は表4に示すようである。表中の枠内の上段の数値は説明変数として取り込まれた順序を、下段の数値は偏回帰係数を示している。

表4. 重回帰分析結果

従属変数	説明変数							偏回帰係数
	水セメント比 (W/C)	細骨材率 (S/a)	粗骨材率 (G/a)	空気量 (X)	試験体長さ (mm)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
縦波音速	1 -21.08				2 0.68			0.954 0.910
周波数	2 -0.84				1 -0.20			0.901 0.813
P高さ					1 -0.81			0.876 0.767
横波音速		1 18.91			2 0.36			0.978 0.957
周波数	4 -1.35			3 27.44	1 -0.10	2 113.28		0.916 0.840
P高さ					1 -0.05	2 43.69		0.857 0.735

これまでのコンクリートの超音波試験では上記に示すような6種類の情報すべてを得ることが困難であった。それは主に使用する超音波探傷器や探触子の性能に限界があったと考えられる。本実験に用いた送信周波数可変式超音波探傷装置はコンクリート中の超音波の伝播特性を向上させる効果があり、また高ダンピング探触

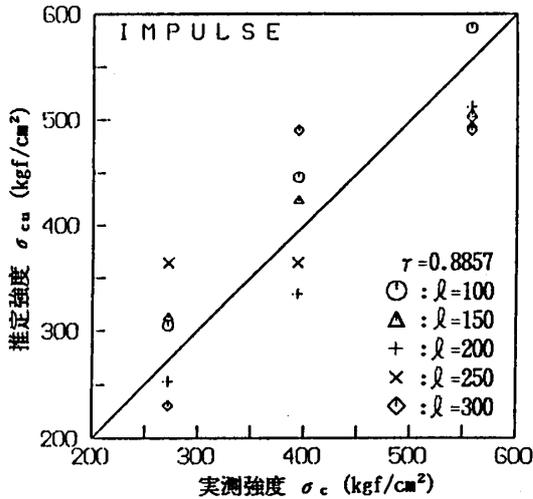
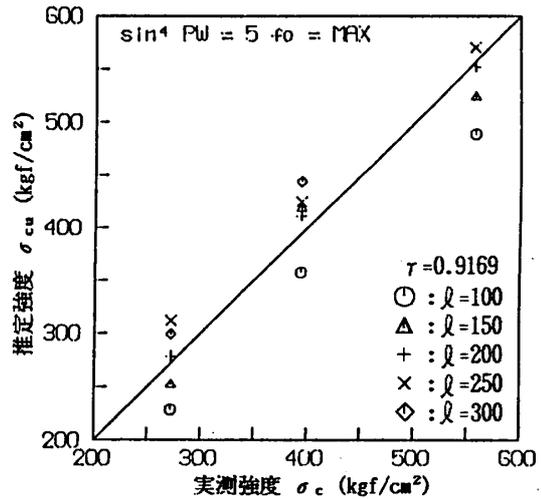


図9. 圧縮強度の評価結果 (単パルス)

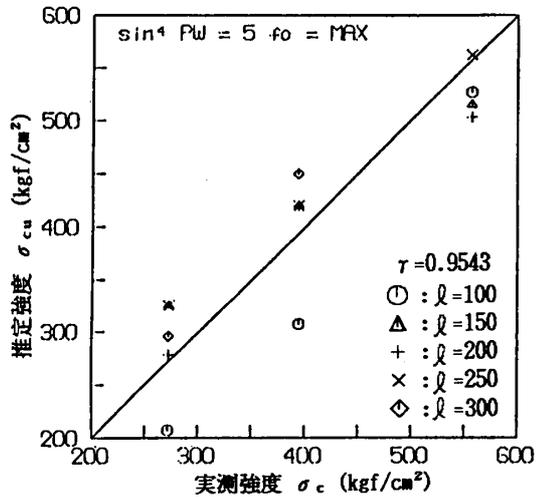
子は、特に横波の音速や受信周波数の測定精度を向上させることに大きな効果があったと考えられる。更に、6種類の超音波情報はそれぞれ異なる材料特性との相関があり、圧縮強度等の評価には有効な情報であると考えられる。

超音波試験に於いて得られる6種類の超音波情報（縦波と横波の音速、受信周波数および透過パルス高さ）を種々組合せたものとコンクリートの圧縮強度との相関を変数増減法による逐次重回帰分析し、この結果に基づいて圧縮強度の推定方法について検討した結果の例が図9、10であり、以下のように要約される。

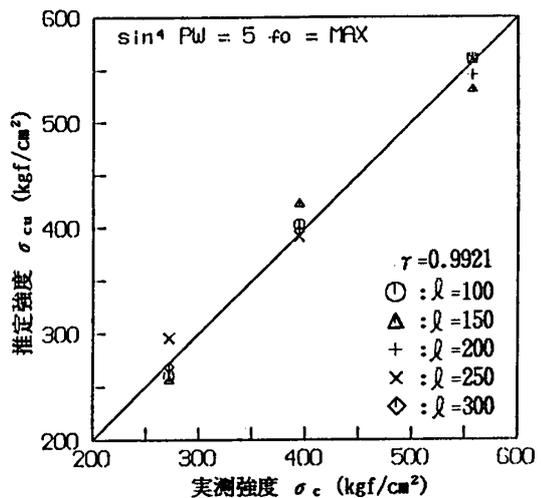
- ① 縦波音速など6種類の超音波情報をそれぞれ単独に用いた場合（従来の推定方法）では、圧縮強度との相関は縦波音速が最も良く（相関係数の平均値  $\bar{r}_{(n=16)} = 0.9216$ ）、次いで横波音速である。（ $\bar{r}_{(n=16)} = 0.8785$ ）ただし、受信周波数や透過パルス高さを単独に用いた場合は、相関係数の平均値は  $\bar{r}_{(n=16)} = 0.2565 \sim \bar{r}_{(n=16)} = 0.4126$ と低い相関を示すのみである。
- ② 次に、縦波、横波の2つの音速を超音波情報として用いた結果では、相関係数の平均値は  $\bar{r}_{(n=16)} = 0.9555$ となり、超音波情報が1つの場合に比較して高い相関が得られた。
- ③ 更に、縦波、横波の音速と受信周波数に関する4種類の超音波情報を組合せて用いた場合の結果では、相関係数の平均値は  $\bar{r}_{(n=16)} = 0.9921$ と最も高い相関が得られた。



(a)  $V_L$



(b)  $V_L + V_s$



(c)  $V_L + V_s + R_{fL} + R_{fs} + P_{hL} + P_{hs}$

図10. 圧縮強度の評価結果 (変調パルス)

9713と前者よりも更に高い相関が得られた。

④ また6種類の超音波情報全てを超音波情報として組合せた結果では、相関係数の平均値は $\bar{r}_{(n=16)}=0.9759$ となり、本実験の範囲で最も高い相関が得られた。本結果は、圧縮強度を推定する場合、出来るだけ数多くの情報を用いた方が有効であることを示していると考えられる。

⑤ 特に、駆動パルスとして変調乗数を4乗としたSin変調パルスを用い(パルス幅=5 $\mu$ s)、かつ透過パルスが最も高くなるように送信周波数を調整した場合、コンクリートの圧縮強度が約200から600(kg/cm<sup>2</sup>)の範囲に於いて、圧縮強度の推定値のばらつきは30(kg/cm<sup>2</sup>)であることが明らかとなった。

これまでの超音波による圧縮強度が推定精度に於いて不十分であったのは、超音波情報として縦波音速のみが用いられてきたことに起因していると考えられる。コンクリートの圧縮強度が水セメント比をはじめとする数多くの因子から成立っていることを考慮すると、材料特性と異なる相関を示す6種類の超音波情報を用いた

本方法(以下、超音波複合法という)がより有効であると考えられる。本方法は、尼崎・明石やWiebenga等が提案し、今後の非破壊的強度推定法の主流を占めるであろうと注目されている、超音波の縦波音速( $V_L$ )とシュミットハンマの反発硬度(R)による「併用法」<sup>2)</sup>(相関係数の平均値 $\bar{r}=0.8920$ )と比較しても、より高精度でコンクリートの圧縮強度を推定できると言える。

7. あとがき

コンクリート構造物の劣化診断技術や耐久性向上技術の開発が急務とされる今日、内部空隙や圧縮強度の非破壊的評価方法に関して検討した。特に、本研究では、送信周波数可変式の超音波探傷装置を導入するとともに高ダンピングの低周波探触子を開発することにより、従来法にないコンクリートの品質評価法を提案することができた。

今後はこれらに関する基礎データの蓄積を図るとともに現場計測を考慮した実用化の研究や装置化を更に進める予定である。

#### (参考文献)

- 1) 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
- 2) 柏：コンクリートの非破壊試験法、富士物産(株)、P102、1981
- 3) 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 N0.390、1989