

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

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

近年、マンションや高速道路、新幹線等においてアルカリ骨材反応や塩害によるひびわれ、剝離、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一つの社会問題となっている。このため、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および超高層ビルさえも、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、普通コンクリートに替えて高品位の高強度コンクリートを使用する必要があるところから、新しい品質管理手法の開発が切望されている。

このような背景から、本研究では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久診断などに必要とされる、圧縮強度の非破壊的推定方法について検

討した。特に、ここでは非破壊試験法として超音波試験法を採用し、種々の超音波情報と材料特性および圧縮強度との相関関係について調査するとともに、超音波による圧縮強度の推定方法について検討した。その結果、従来法に比較して高精度で推定可能な方法が開発できたので報告する。

§ 2. 圧縮強度の推定方法に関する既往の研究

コンクリートの非破壊試験方法に関する研究は1934年頃に開始され、現在に至っている。この間の研究の目的や手段などは極めて多様であるが、特にコンクリートの圧縮強度の推定方法としては、表-1に示すように打撃法、振動法および複合法の3種類が主として提案されて

試験法の種類		測定原理	利 点	欠 点
打撃法	反発硬度法	シュミットハンマー法	測定が簡便で、被測定物の形状・寸法に制約なく適用できる。測定値が多数得られる。	測定部位がコンクリートの表層部に限られる。同一箇所での再測定ができない。
	振動法	共振法	縦共振法 たわみ共振法 ねじり共振法	特定な形状・寸法のコンクリート供試体の共振振動数や対数減衰率などを測定し、その値から動弾性係数や動ポアソン比および圧縮強度を推定。
複合法		音速法	超音波法 衝撃波法 位相法	超音波(縦波)または衝撃波の伝播速度を測定し、その値から圧縮強度を推定。
	音速・シュミットハンマー法	超音波(縦波)の伝播速度とシュミットハンマーの反発硬度から圧縮強度を推定。	超音波法またはシュミットハンマー法を単独で用いるよりも、圧縮強度の推定精度が高い。	強度の判定式が確立されていない。
	音速・音波減衰率法	超音波(縦波)の伝播速度と減衰率を測定し、その値から圧縮強度を推定。	同上	減衰率の測定が困難である。
	動弾性係数法・対数減衰率法	動弾性係数と対数減衰率を測定し、その値から圧縮強度を推定。	動弾性係数のみよりも強度の推定精度がよい。	被測定物の形状・寸法に制約がある。

表-1 コンクリート圧縮強度の主な非破壊試験法の種類と特徴

いる。これらの概要は、以下のようにまとめられる。

打撃法に関する研究は既に1934年頃からイギリス、ドイツ、ソ連などで開始され、上記の3種類の推定法の中では最も古い歴史がある。1948年、Shumidtが考案したシュミットハンマー法は、我国でも日本材料学会の指針案や東京都材料検査所の試案などがあるところから明らかかなように、現在世界中で実用に供されている。しかし、シュミットハンマー法による推定強度はコンクリート表面の強度であるとともに、必ずしも満足すべき精度を有しているとはいえないのが実情である。

振動法には表-1に示すように共振法と音速法とがあり、さらに音速法には超音波法(超音波伝播速度法)、衝撃波法および位相法などがある。しかし、共振法は適用可能な供試体の形状・寸法に制約があり、実コンクリート構造物の強度推定には適さない。超音波法は、1948年Jonnsが超音波の音速とコンクリート強度(曲げ、圧縮強度)との関係を調べ強度推定の可能性を論ずるに及んで急激に研究が進み、1950年代以降に内外で多数の研究報告が見られるようになった。しかし、本方法の基本である音速の測定精度はまだ十分ではなく、次に示す複合法が開発されるまで研究は遅々として進まなかった。なお、超音波音速法の試験要領については、ASTM 標準、BS 標準などがあるが、いずれも強度推定の具体的な手法は示されていないのが実情である。

複合法は、超音波音速法(縦波)とシュミットハンマー法を併用するもので、1960年の後半からWiebeaga, Facaoaru, 谷川・山田・小坂ならびに尼崎・明石らによって研究が進められた。いずれも、超音波縦波速度法あるいはシュミットハンマーの反発硬度法を個別に用いるよりも、コンクリートの圧縮強度は高精度で推定できることを明らかにしている。したがって、今後の非破壊によるコンクリートの圧縮強度の推定は、本複合法によることが主流を占めるであろうといわれている。

§ 3. 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の2種類とした。これらの形状・寸法を図-1に、コンクリートの配合を表-2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。試験体数は超音波試験用として18個、圧縮強度試験用として9個作成した。いず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。

§ 4. 実験装置

実験に用いた超音波探傷装置および探触子を写真-1, 2に示す。また、超音波探傷装置の主要性能を表-3に示す。本超音波探傷装置は、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

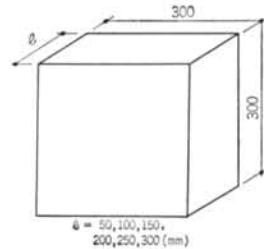


図-1 試験体の形状・寸法

TP No.	水セメント比 W/C (%)	スランプ (cm)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				試験体数	
				水 W	セメント C	砂 S	ポリス No.70 G		
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

表-2 コンクリートの配合

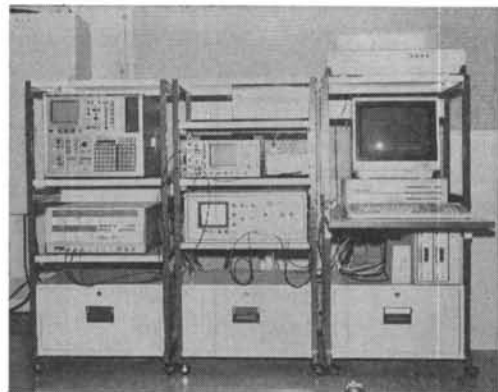


写真-1 送信周波数可変式超音波探傷装置

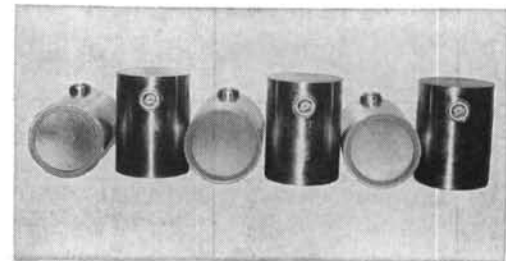


写真-2 高ダンピング・低周波探触子

名称	型式	主要性能
超音波 試験装置	スウェプト フリケンシー	①励振周波数範囲： 80 KHz～10 MHz ②パルス幅： 0.4～140 μ s 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： W164×H177×D325
パルサ レシーバ	MODEL 5052 PR (PANAMETRICS社製)	①帯域幅： 1 KH～35 MH ②ゲイン調整器： 68 dB ③寸法： W175×H89×D250
デジタル メモリ	DM-2350 (岩通社製)	①周波数帯域幅： DC～12.5 MHz ②記憶長： 4096 word/ch ③サンプル感度： 20 ns～1 s ④寸法： W420×H199×D527
シグナル アナライザ	SM-2100 A (岩通社製)	①周波数帯域幅： DC～12.5 MHz ②記憶容量： 62 Kword ③フロッピーディスク記 憶容量：256 k バイト ④寸法： W420×H350×D504
探 触 子	0.5C40N, 1Z40×40SN (ジャバンプローブ)	

表—3 超音波探傷装置の主要性能

るための駆動パルスとして単パルスと変調パルスのいずれかが選択できる機能を有している。また、変調パルスには Sin と Triangle の 2 つのモードがあり、しかも変調乗数を 1, 2, 4 乗の 3 段階に切換えることが可能である。送信周波数可変式超音波探傷装置を本実験に採用したのは、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、また駆動パルスとして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、できる限りシンプルな超音波を伝播させるために効果があると考えられるからである。

探触子は縦波、横波の 2 種類とした。いずれも、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。

§ 5. 実験方法および実験条件

実験条件およびデータ採取条件を表—4、表—5に示す。超音波試験は探触子の型式、駆動パルスの形状、パ

試験体	試験体数	探 触 子	駆 動 パルス	パルス幅	励振周波 数 (KHz)
A-1-5 ～30	6	0.1Z40N (ジャバンプローブ)	単パルス	PW=5	$f_i = 100$ $f_i = 200$ $f_i = 400$
A-2-5 ～30	6	0.1S40HB (カールドイフェ)	sin ¹	PW=10	$f_i = 600$ $f_i = 800$ $f_i = 1000$ $f_i = 2000$ $f_i = \text{Max.}$
A-3-5 ～30	6	1Z40SN (ジャバンプローブ)	sin ⁴		

表—4 実験条件

TP 長さ (ℓ)	プローブ	サンプル レート (ns)	ディレイ (%)	時間時解析長	時間軸 分解能 (ns)	周波数解析長	周波数 分解能 (KHz)
50	0.1Z40N	140	-4	-5.6～65.4	140	0～1.77MHz	14.0
	0.3C40N	140	-12	-16.8～54.7	140	0～1.77MHz	14.0
	0.1Z40SN	700	0	0.0～354.4	700	0～354.4KHz	2.8
100	0.1Z40N	140	4	5.6～77.1	140	0～1.77MHz	14.0
	0.3C40N	140	-4	-5.6～65.4	140	0～1.77MHz	14.0
	0.1Z40SN	700	0	0.0～354.4	700	0～354.4KHz	2.8
150	0.1Z40N	140	12	16.8～88.3	140	0～1.77MHz	14.0
	0.3C40N	140	8	11.2～82.7	140	0～1.77MHz	14.0
	0.1Z40SN	700	0	0.0～354.4	700	0～354.4KHz	2.8
200	0.1Z40N	140	20	28.0～99.5	140	0～1.77MHz	14.0
	0.3C40N	140	16	22.4～93.9	140	0～1.77MHz	14.0
	0.1Z40SN	700	0	0.0～354.4	700	0～354.4KHz	2.8
250	0.1Z40N	140	32	44.8～116.3	140	0～1.77MHz	14.0
	0.3C40N	140	24	33.6～105.1	140	0～1.77MHz	14.0
	0.1Z40SN	700	0	0.0～354.4	700	0～354.4KHz	2.8
300	0.1Z40N	140	40	56.0～127.5	140	0～1.77MHz	14.0
	0.3C40N	140	32	44.8～116.3	140	0～1.77MHz	14.0
	0.1Z40SN	700	0	0.0～354.4	700	0～354.4KHz	2.8
備 考	データ解析長：0.5Kword						

表—5 受信波形の採取および解析条件

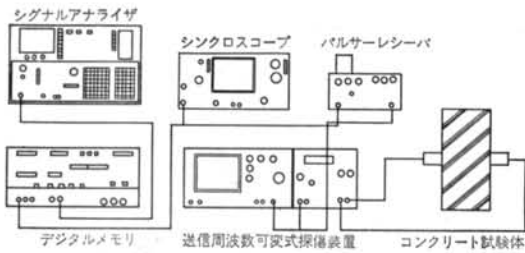
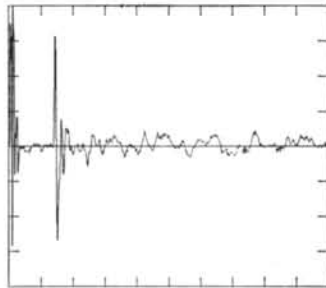
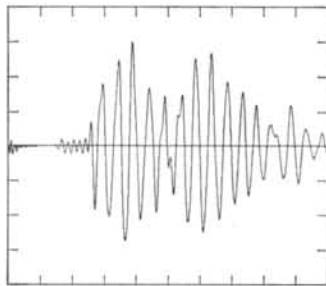


図-2 実験装置の構成



(a) 縦波



(b) 横波

図-3 受信波形

ルス幅および励振周波数を種々変化させ(66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-2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り, これらの超音波情報は以下に示すような手法に基づいて解析した.

(1)音速

コンクリート中の超音波の伝播速度, すなわち音速(V_L, V_S)は伝播時間(t)と試験体の寸法(l)から, 式(1)のように求めることができる.

$$V_L(V_S) = l/t \quad (\text{m/s}) \quad \dots\dots(1)$$

ここで, $V_L(V_S)$: 縦波および横波音速,

l : 伝播距離, t : 伝播時間

図-3に示す受信波形から明らかのように, 縦波は比較的きれいな受信波形となるところから, 受信波の立上がりを目測して縦波の伝播時間とした. しかし, 横波の場合横波成分の他に若干の縦波成分が発生するため, 両者の干渉により横波自体の受信波の立上がり不明と

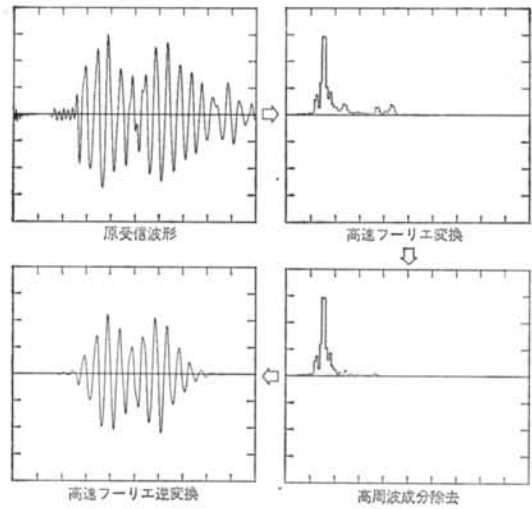


図-4 横波の音速測定法

なるのが一般的である. したがって, 図-4に示すような信号処理技術を応用した「横波の音速測定法」を考案し, 実験に供した. すなわち, 本測定法では横波探触子から併発する横波と縦波は各々が持っている周波数成分が異なる点に着目し, 原波形を高速フーリエ変換(FFT)することにより両者を分離する. ここで縦波である高周波成分をカットし, その後高速フーリエ逆変換(IFFT)して受信波形を再現すると, 縦波成分を除去したほぼ横波だけの受信波形が得られるというものである.

(2)受信周波数

受信周波数は, 原受信波形をハニング処理した後, 高速フーリエ変換して求めた.

(3)透過パルス高さ

透過パルス高さは, 受信波の第1波のパルス高さに着目して測定した. なお, 透過パルス高さの基準は厚さ50mmの試験体のパルス高さとした.

§ 6. 実験結果および考察

6.1 超音波情報とコンクリートの配合条件との関係

1回の超音波試験で得られる6種類の情報, 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コンクリートの配合条件との関係を明らかにするために, 超音波情報を従属変数とし, 水セメント比, 細骨材率, 粗骨材率, 空気量, 試験体の長さ, 密度等の材料特性を説明変数とする重回帰分析を行なった. なお, F 値は2.0とした. また, 超音波試験の条件は \sin^4 , $PW=5\mu\text{s}$, $f_t=\max.\text{kHz}$ である. 重回帰分析の結果は表-6

従属変数	説明変数							重相関係数 寄与率
	水セメント比 W/C	細骨材率 S/a	粗骨材率 G/a	空気量 (%)	試験体長さ (mm)	密度 (t/m)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	
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

表一六 重回帰分析結果

および図一五、六、七に示すようである。表中の枠内の上段の数値は説明変数の順位を、下段の数値は重回帰係数を示している。

(1)縦波音速

これまでの超音波による圧縮強度の推定方法の中で用いられてきた縦波音速に及ぼす要因としては、水セメント比、試験体の長さ、密度などが挙げられる。しかも、分析結果の詳細は以下のように要約される。

(i)縦波音速と水セメント比は逆比例の関係にあり、水セメント比が高くなるほど縦波音速は減少する。

(ii)また、細骨材率も高くなるほど、縦波音速は減少する。しかも、音速の減少する割合は水セメント比よりも細骨材率の場合の方が高い。

(iii)コンクリート中の空気含有量が多くなるほど縦波音速は減少する傾向にある。

(iv)試験体の長さが100mm以下となると縦波音速は小さめとなるが、150mm以上の場合には水セメント比に相応した一定値を示すようになる。

(2)縦波受信周波数

縦波受信周波数に及ぼす主な要因としては、試験体の長さ、水セメント比等が挙げられ、しかも縦波受信周波数と各材料特性との関係は以下のように要約される。

(i)試験体の長さが長くなるほど縦波受信周波数は減少する傾向にある。これは、超音波の伝播距離が長くなると高周波成分が減衰し、低周波成分のみが透過するためであると考えられる。

(ii)水セメント比が高くなるほど縦波受信周波数は減少する傾向にあるが、水セメント比の差が読み取れるほど

に明確ではない。

(iii)前記(ii)の結果と同様に細骨材率が高くなるほど(粗骨材率が小さくなる)、またコンクリート中の空気含有量が多くなるほど縦波受信周波数は減少する。

(3)縦波透過パルス高さ

縦波透過パルス高さに及ぼす主な要因としては試験体の長さ等が挙げられ、しかも縦波透過パルス高さと各材料特性との関係は以下のように要約される。

(i)試験体の長さが長くなるほど縦波透過パルス高さは減少するが、ここには水セメント比などの材料特性の差は現われていない。

(ii)また、低い相関ではあるが、細骨材率や空気含有量が高くなるほど、縦波透過パルス高さは減少する。

(iii)逆に、ばらつきは若干あるが、密度が大きくなるに従って縦波透過パルス高さは増大する。

(4)横波音速

横波音速に及ぼす主な要因としては粗骨材率等が挙げられ、しかも横波音速と各材料特性との関係は以下のように要約される。

(i)横波音速は粗骨材率に比例して増大する。ただし、音速に対する粗骨材率の影響は縦波よりも横波の方が小さい。

(ii)横波音速は試験体の長さにかかわらず、ほぼ一定値を示している。

(iii)また、水セメント比や空気含有量が高くなるほど横波音速は減少する傾向にある。

(iv)縦波音速と横波音速を用いて式(2)からポアソン比を求めると、約0.2を示している。一般にコンクリートのポアソン比は0.18前後といわれているところから、音速の測定値がほぼ妥当な精度を示していると判断される。すなわち、ポアソン比は縦波および横波の音速測定値の妥当性を判断する一つの指標となると考えられる。

$$\mu = \frac{(V_L/V_S)^2 - 2}{2\{(V_L/V_S)^2 - 1\}} \quad \dots\dots(2)$$

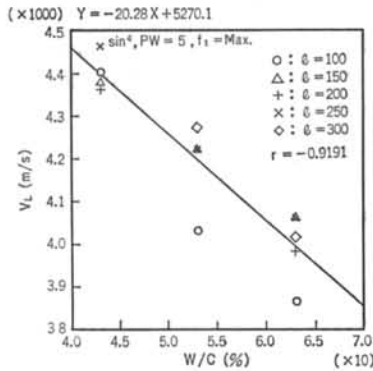
(5)横波受信周波数

横波受信周波数に及ぼす主な原因としては、試験体の長さ、密度、空気量、水セメント比等が挙げられ、しかも横波受信周波数と各材料特性との関係は以下のように要約される。

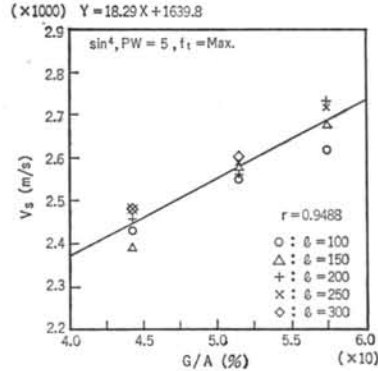
(i)横波受信周波数も縦波と同様に、試験体の長さが長くなるほど減少する。ただし、その低下する割合は縦波よりも緩やかである。

(ii)また、水セメント比が高い試験体ほど、横波受信周波数は減少する傾向にある。

(iii)相関は低い、密度や空気含有量が高くなるほど横

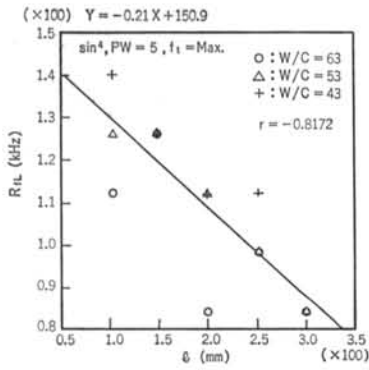


(a) 縦波音速と水セメント比の関係

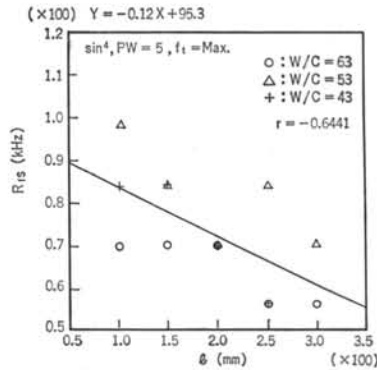


(b) 横波音速と粗骨材率の関係

図-5 音速に及ぼす影響因子

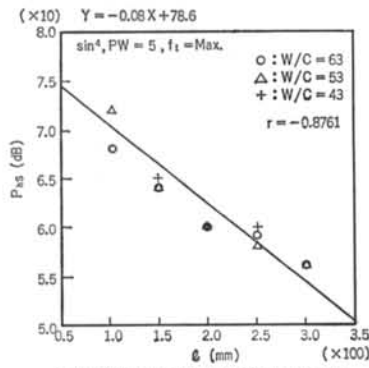


(a) 縦波受信周波数と試験体長さの関係

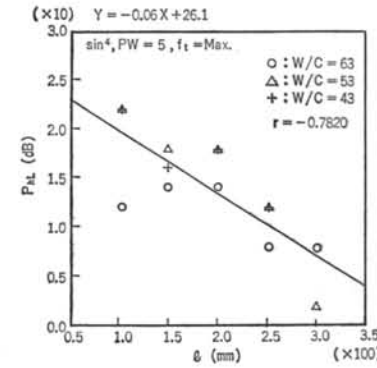


(b) 横波受信周波数と試験体長さの関係

図-6 受信周波数に及ぼす影響因子



(a) 縦波パルス高さとの関係



(b) 横波パルス高さとの関係

図-7 透過パルス高さに及ぼす影響因子

波受信周波数は減少する。

(6)横波透過パルス高さ

横波透過パルス高さに及ぼす主要な要因としては、試験体の長さ、密度等が挙げられ、しかも横波透過パルス高さと各材料特性との関係は以下のように要約される。

(i)試験体の長さが長くなるほど、横波透過パルス高さ

は減少する。

(ii)そのほか、水セメント比や空気含有量が高くなるほど、横波透過パルス高さは減少する傾向にある。

これまでのコンクリートの超音波試験では、上記のような情報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。さらに、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。

6.2 超音波による圧縮強度の推定

超音波試験において得られる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）を以下のように組合せたものとコンクリートの圧縮強度との相関を重回帰分析し、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。

なお、圧縮強度は表-7に示す試験結果を用いた。

- (a)圧縮強度：縦波音速
- (b)圧縮強度：縦波受信周波数

	コンクリート		
	W/C=63%	W/C=53%	W/C=43%
平均値(σ_c)	271.7	394.3	556.7
変動係数(%)	1.3	4.0	1.0

表-7 圧縮強度試験結果

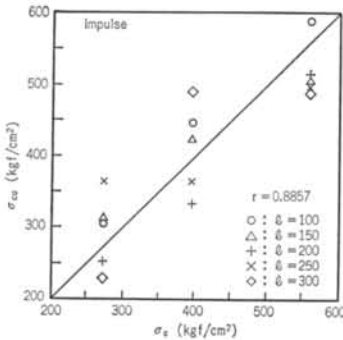


図-8 圧縮強度の評価結果（単パルス, V_L ）

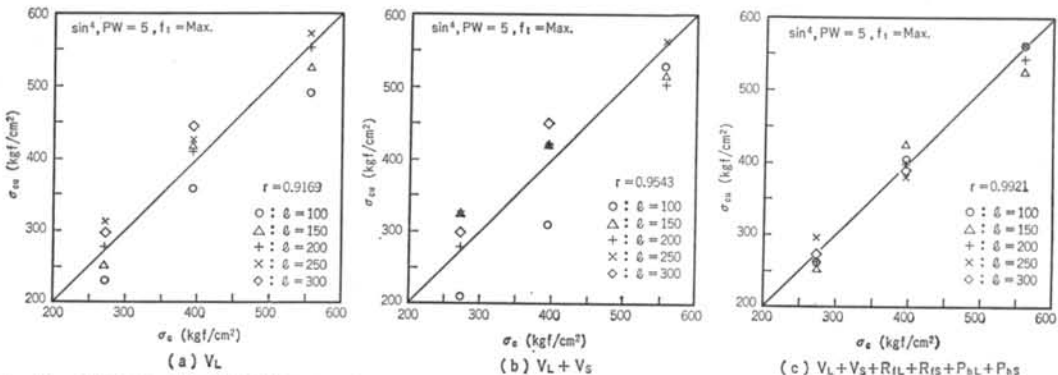


図-9 圧縮強度の評価結果（変調パルス）

- (c)圧縮強度：縦波透過パルス高さ
- (d)圧縮強度：横波音速
- (e)圧縮強度：横波受信周波数
- (f)圧縮強度：横波透過パルス高さ
- (g)圧縮強度：縦波音速+横波音速
- (h)圧縮強度：縦波音速+横波音速+縦波受信周波数+横波受信周波数
- (i)圧縮強度：縦波音速+横波音速+縦波受信周波数+横波受信周波数+縦波パルス高さ+横波透過パルス高さ

重回帰分析結果の例が図-8, 9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）、圧縮強度との相関は縦波音速が良く（相関係数の平均値 $\bar{r}=0.9216$ ）、次いで横波音速である（ $\bar{r}=0.8785$ ）。ただし、受信周波数や透過パルス高さを用いた場合は、相関係数の平均値は $\bar{r}=0.2565 \sim \bar{r}=0.4126$ と低い相関を示すのみである。

(2)次に、縦波、横波の二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 $\bar{r}=0.9555$ となり、超音波情報が一つの場合に比較して高い相関が得られた。

(3)さらに、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 $\bar{r}=0.9713$ と前者よりもさら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 $\bar{r}=0.9759$ 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（送信パルスを形成する振動子にかかる電圧）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=5μs）、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 200kg/cm² から 600kg/cm² の範囲において圧縮強度の推定値のばらつきは 30kg/cm² 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お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始めとする数多くの因子から成り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（超音波複合法（仮称））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ーの反発硬度 (R) による複合法（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いえる。

また、この場合の超音波試験方法は、送信周波数をある一定値に固定するよりも、コンクリートの材質に適合した超音波が選定できるように連続的に可変させる方法が有効であると考えられる。本方法は、圧縮強度を推定

するための有用な情報が得られるばかりでなく、コンクリート中の伝播特性を向上させる効果もあると考えられる。

§ 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、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、従来法にない圧縮強度の推定方法を提案することができた。これは超音波複合法といえるもので、超音波試験のみで得られる 6 種類の情報、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をを用いたコンクリート圧縮強度推定法である。

今後、超音波複合法による圧縮強度の推定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をさらに進める予定である。

<参考文献>

- 1) 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 No. 390 (1988年)
- 2) 柏：“コンクリートの非破壊試験法” 富士物産刊 (1981年)
- 3) 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)