

非破壊試験方法によるコンクリート強度の推定

I 各種方法間の相違

小山健悟*・服部九二雄*・柘植巳一*

平成2年5月31日受付

Estimation of the Compressive Strength by Non-Destructive Methods

I Differences among Four Non-Destructive Methods

Kengo KOYAMA*, Kunio HATTORI* and Miichi TSUGE*

In 1989, we carried out an experimental study on the estimation of compressive strength by non-destructive methods. The non-destructive methods used to estimate the strength are as follows :

- a rebound method (Schmidt hammer N type and P type)
- b penetration method (Pin tester)
- c resonant frequency method (dynamic modulus of elasticity)
- d pulse velocity method (ultrasonic pulse velocity)

The compressive strength estimated these methods was compared to the measured compressive strength from cylinder or cube. As we were not able to get a lot of date on the strength, it was difficult to estimate the reliable compressive strength. The results obtained are as follows.

- ① Among the non-destructive methods, Pin tester method showed the closest estimation to the measured strength, but this method took much time to carry out the test.
- ② The estimation from Schmidt hammer method disperses frequently because the surface hardness of concrete is greatly affected by the surface condions such as moisture content and surface roughness.
- ③ Pulse velocity method is promising to estimate the strength of concrete because the unskillful people can use it easily.

* 鳥取大学農学部農林総合科学科生産環境工学講座

* Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University

まえがき

既にでき上がっているコンクリート構造物が、設計どおりの強度を有し、構造物の安全性が期待できるかどうか、また施工管理の面から契約どおりのコンクリートが打ち込まれたかどうかを判定するには、通常、現場の実施コンクリートと並行して作製した標準供試体の設計基準強度により判定する。設計基準強度とは、JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」¹⁾およびJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」²⁾により求められた材令28日における圧縮強度である。すなわち、約20°Cの恒温水槽内で養生した直径の2倍の高さを持つ円柱形の供試体（標準供試体）の圧縮強度である。

しかし、標準供試体と現場における構造物コンクリートとは、締固め、型枠、養生などの諸条件が異なり、設計基準強度と構造物のコンクリート強度では、かなりの差異が生じてくる。とくに、養生条件は、現場の気象条件に大きく左右されるために、両者間に強度の差が生じるのは避け難く、設計基準強度が構造物コンクリートの強度を代表しているとは言い難い。もちろん、構造物から直接コアを採取して諸試験を行うのが望ましいが、それには、構造物の部分的損傷や、経費等の点で問題がある。そこで、簡便でコンクリート構造物に損傷を与えず強度を推定するために、非破壊試験方法が利用されてきている。この非破壊試験方法には、多くの種類があり、それらをまとめると以下のようになる⁴⁾。

- ① 釘またはボルトの引き抜きによる方法
- ② 表面硬度法（反撥硬度、くぼみ直径の測定）
- ③ 共振法（動弾性係数の測定）
- ④ 超音波法（超音波伝播速度の測定）
- ⑤ 貫入抵抗法（貫入抵抗値の測定）

①は、釘またはボルトをコンクリートの型枠内面に取り付け、脱型後これを引き抜き、この引抜き力からコンクリートの強度を推定する方法である。この方法は、強度推定精度は良いが、あらかじめボルトなどを装着しておく必要があり、また局部的損傷を与えるという欠点がある。

②の表面硬度法は、シュミットハンマーにより反撥硬度を測定する方法と落下式ハンマー、回転式ハンマー、ばね式ハンマーなどによりくぼみ直径を測定する方法である。実際にくぼみ直径を正確に多数測定するのは面倒であるため、最近ではシュミットハンマーが広く使用されており、測定に要する時間も少なく簡便であるという利点がある。

③の共振法は、供試体に縦振動、たわみ振動、ねじり振動を与えてそれらの一次固有振動数を測定し、動弾性係数を求める方法である。この方法の利点は、供試体の経年変化あるいは物理的、化学的なコンクリートの劣化、侵食される性状などを同一供試体を繰り返し使用して精度よく知りうることである。しかし、供試体の寸法に制限があり、大きな構造物には適用しにくいという欠点もある。

④の超音波法は、超音波パルスを供試体に発射させて既知距離間の伝播時間を測定し、超音波伝播速度を求め、コンクリートの品質を判定するものである。この方法は、供試体、構造物のいかなる間を問わず10～20mの区間から数cmの小さいものまで測定可能で、測定に際して個人差が入りにくいという利点がある。

⑤の貫入抵抗法は、コンクリートピンテスターを使用し、ピンに一定量の運動エネルギーを与え、これがコンクリートに貫入した時の貫入深さ（貫入抵抗値）を測定し、この値からコンクリートの強度を推定するものである。この方法は、他の試験方法に比べて部分的損傷、費用、安全性、測定が比較的面倒などの問題点がある。

これらのうち、筆者らは、②、③、④、⑤の試験方法によるコンクリートの推定強度と実測強度との相関関係について検討した³⁾。

実験材料および方法

(1) 実験材料

実験に使用したマサ土は、風化がさほど進んでいない岡山県下足守七鼻付近で採取したものを、川砂と川砂利は、鳥取県千代川産を用いた。骨材の物理的性質を第1表に示す。セメントは市販の普通ポルトランドセメント（比重：3.16）を、混和剤はヴィンソル70S（ロジン石鹼、非イオン系界面活性剤、脂肪族化合物を混合したもので、標準使用量はセメント重量の0.03～0.05%）を使用した。

第1表 骨材の物理的性質

	マサ土	川砂	川砂利
比 重	2.54	2.59	2.60
粗 粒 率	3.27	2.75	6.54
吸 水 率(%)	2.51	2.67	1.81
有効吸水率(%)	1.65	1.64	1.30

(2) 実験に用いたコンクリートの種類

配合設計は、粗骨材最大寸法20mm、スランプ12±2 cm、水セメント比0.55として計算し、その結果を第2表に示す。この表からわかるように、川砂、川砂利からなるA E剤を混入しない空気量2%のコンクリートを川砂プレーン、マサ土と川砂利からなるA E剤を使用しない空気

量2%のコンクリートをマサプレーン、マサ土と川砂利からなるA E剤を使用した空気量4, 6, 8%のコンクリートをそれぞれ、マサ4%, マサ6%, マサ8%と以下呼ぶことにする。なお、ここでいう空気量とは、示方配合設計時における空気量である。

第2表 示方配合表

種類	図中の記号	最大骨材寸法 mm	スランプ cm	空気量 %	W/C %	S/a %	単 位 量 (kg/m ³)				
							水	セメント	細骨材	粗骨材	A E剤
川砂プレーン	○	20	12±2	2±1	55.0	45.0	174	316	824	1,009	-
マサプレーン	●●	20	12±2	2±1	55.0	45.0	200	364	759	952	-
マ サ	4% □	20	12±2	4±1	55.0	45.0	188	342	759	949	0.229
	6% △	20	12±2	6±1	55.0	45.0	174	316	762	952	0.411
	6% ▲	20	12±2	6±1	55.0	45.0	176	320	757	949	0.411
	8% ▣	20	12±2	8±1	55.0	45.6	172	313	752	918	0.618

(注) 川砂プレーン：川砂+川砂利 マサ4%：マサ土+川砂利+A E剤 (配合設計時空気量4%)
 マサプレーン：マサ土+川砂利 マサ6%：マサ土+川砂利+A E剤 (配合設計時空気量6%)
 A E 剤：ヴィンソル70S マサ8%：マサ土+川砂利+A E剤 (配合設計時空気量8%)

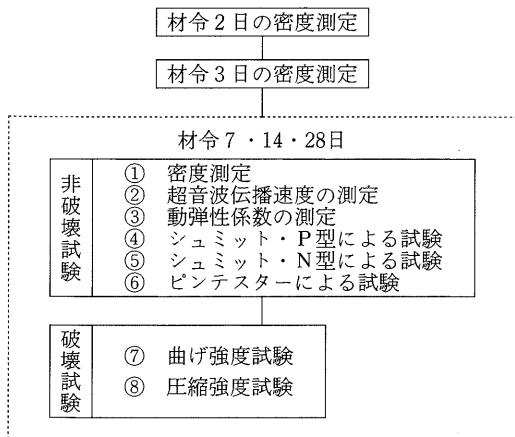
(3) 実験方法

供試体は、50リットルの強制練りミキサーを用いて、各配合一種類につきφ10×20cmの円柱形供試体9本、10×10×40cmの角柱形供試体6本ずつ作製した。第1図に示す手順に従って諸実験を行った。密度測定は、供試体

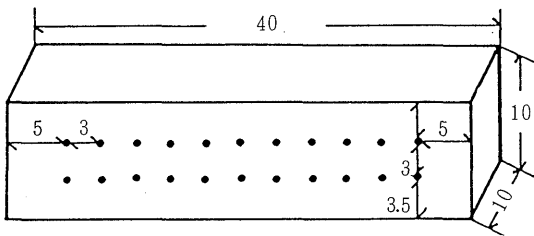
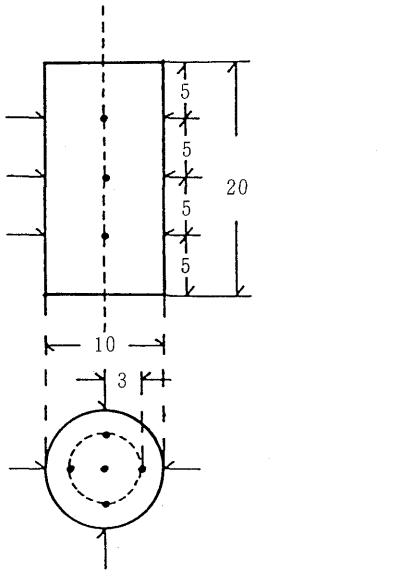
の空中重量と水中重量により求めた。超音波伝播速度の測定には、ウルトラ・ソニック・テスターを使用した。動弾性係数の測定は、角柱形供試体ではたわみ振動、円柱形供試体では縦振動によって一次固有振動数を測定して求めた。

シュミットハンマー（以下Sハンマーと呼ぶ）による角柱形および円柱形供試体の表面硬度の測定箇所を第2図に示す。打撃によりその局部は、かなりの塑性変形を起こすので、互いに3cmの間隔をあけて試験を行った。角柱形供試体の測定は、型枠に接した側面を使用した。また、骨材が露出している箇所や気泡跡のある箇所は避けた。角柱形供試体に用いたSハンマーP型（低強度用ハンマー）は測点数11、角柱形供試体と円柱形供試体に用いたSハンマーN型（普通強度用ハンマー）の場合は測点数22とし、全測定値の算術平均をその個所の反撓硬度(R)とするが、とくに反響音や、くぼみ具合いなどから判断して明らかに異常と認められる値、または、その偏差が平均値の約20%以上になる値があればそれを除外してから平均値を求めた。

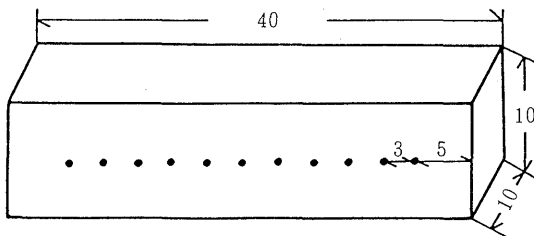
貫入抵抗値の測定には、アメリカのジャメス社により製品化された「コンクリートピンテスター」を用いた。



第1図 実験の手順

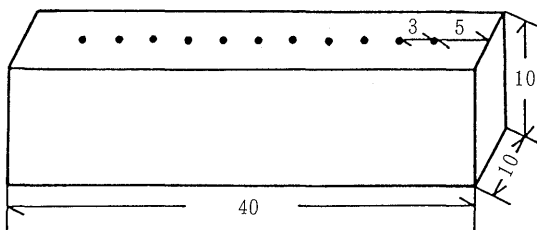


SハンマーN型の測定箇所



SハンマーP型の測定箇所

第2図 Sハンマーの測定箇所 (単位: cm)



第3図 ピンテスターの測定箇所 (単位: cm)

ピンの打ち込みは、第3図のように角柱形供試体の型枠底面の中心線の両側5 cm間隔で11点の個所に行った。

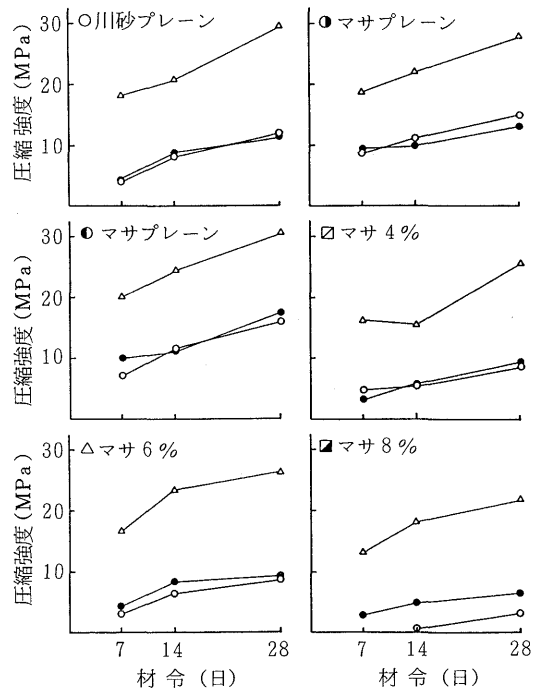
これらの非破壊試験を行った後、曲げ強度試験(角柱形供試体のみ)、圧縮強度試験(角柱形、円柱形供試体とも)を行い強度推定値との比較を行った。

結果と考察

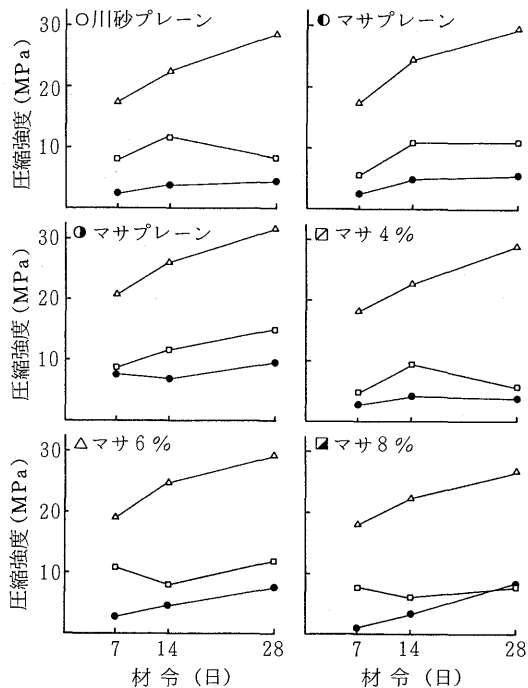
今回行った試験では、破壊試験のうち圧縮強度試験による強度との比較のみを行った。

(1) シュミットハンマー試験

第4図にSハンマーP型、N型から得られた圧縮強度の推定値と実測値の経日変化を示す。Sハンマーから得られた推定値は、P型、N型共にほとんど実測値の50%以下の値しか得られなかった。これは、水中養生されたコンクリートの強度は材令とともに増大するが、硬度はその割には増大しないためと思われる。また、空気量が増すにつれて実測値に対する割合は小さくなっている。これは、空気量が増加するにつれて気泡が供試体表面に集まる傾向が強まり、表面硬度が低下するためと考えられる。



第4図 SハンマーP型、N型による角柱供試体の圧縮強度の推定値と実測値の経日変化



第5図 SハンマーN型による円柱供試体の圧縮強度の推定値と実測値の経日変化

第5図には、SハンマーN型による円柱形供試体の上下端面と側面から得られた推定値と実測値の経日変化を示す。図より上下面が側面より大きい値が得られることがわかる。これは、側面は球面のためしっかり固定することが難しく測定が困難であるためである。また、コンクリートの打ち込み方向も関係している。

第6図にSハンマーP型、N型による推定値と実測値との相関関係を示す。図より、N型よりP型の推定値の方がばらつきが大きいことがわかる。

(2) ピンテスター試験

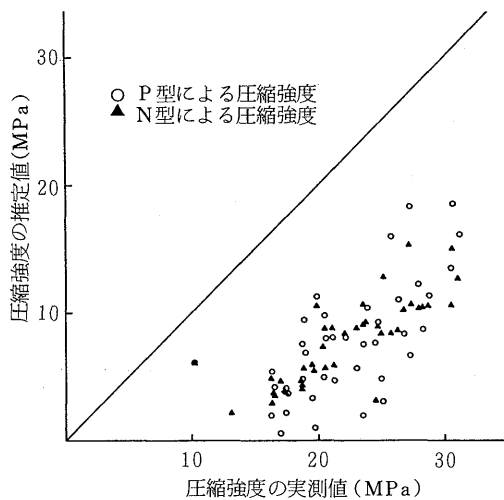
ピンテスター試験による圧縮強度の推定値は、以下の式により求めた。

$$Y = -3.75Rx + 37.84$$

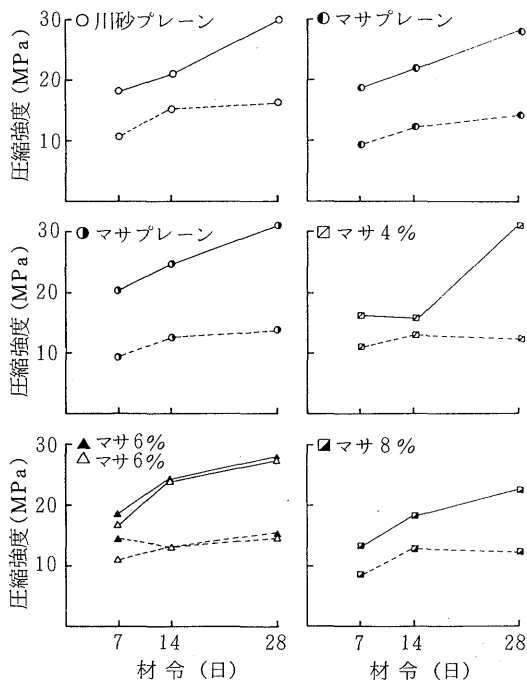
ここに、Y : 圧縮強度の推定値 (MPa)

Rx : 貫入抵抗値 (mm)

第7図に、ピンテスター試験による圧縮強度の推定値と実測値の経日変化を示す。これから、ピンテスター試験による推定強度値は、実測値の約50%程度以下の値しか示さないことがわかる。この関係は、上述のSハンマーによる場合とほぼ似ており、ピンテスター試験もコンクリートの硬さに関係が深いことがわかる。

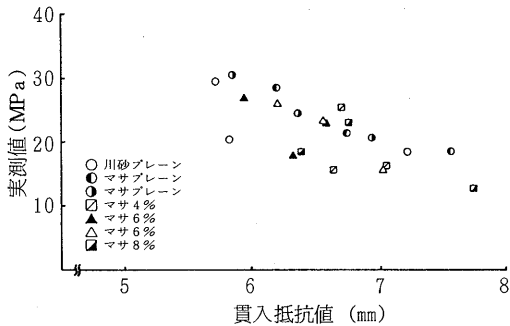


第6図 SハンマーP型、N型による推定値と実測値との相関関係



第7図 ピンテスター試験による圧縮強度の推定値と実測値の経日変化 (実線: 実測値, 破線: 推定値)

第8図には、圧縮強度の実測値と貫入抵抗値Rxとの関係を示す。これより、両者の関係を直線と仮定して回帰式を求めると以下ようになった。



第8図 圧縮強度の実測値と貫入抵抗値の関係

$$Y = -6.2Rx + 62.13$$

ここに、Y : 圧縮強度の推定値 (MPa)

Rx : 貫入抵抗値 (mm)

(3) 動弾性係数と超音波伝播速度による推定強度

第9図は、動弾性係数と圧縮強度実測値との相関関係を示す。図から、供試体によりばらつきがあるものの、動弾性係数が大きければ圧縮強度も大きくなるのがわかる。

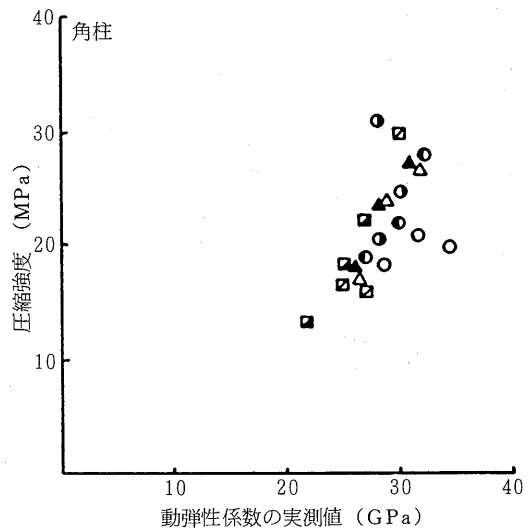
第10図は、超音波伝播速度と密度および圧縮強度の相関関係を示したものである。この図から、密度が大きい程度、超音波伝播速度が大きく、さらに圧縮強度も大きいといえ、超音波伝播速度と圧縮強度の相関性が高いことがわかる。

第11図は、圧縮強度と動弾性係数の実測値と超音波伝播速度による推定値との相関関係を示したものである。図より、圧縮強度、動弾性係数ともに相関性はみられるものの圧縮強度の場合、実測値が推定値よりも大きく、動弾性係数では推定値が実測値よりも大きくなっているのがわかる。

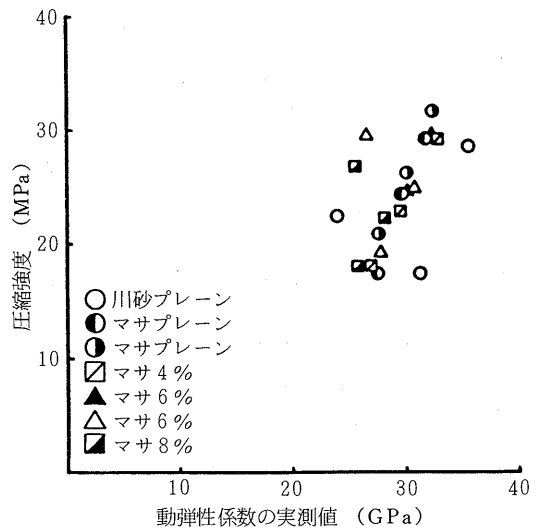
いずれにしても、実測値と推定値には差があり、超音波伝播速度による強度推定を行うには十分なデータ数とはいえない。今後、データ数を増やし、実験式の検討を含めて多くの実験を行う必要がある。

結 論

平成元年度、筆者らの行った非破壊試験及び破壊試験による圧縮強度をそれぞれ比較検討してみると、ピンテスター試験による推定値と実測値との相関性が、他に比べて高いことがわかった。しかし、ピンテスター試験は、ピン貫入時の試験者の体勢、力のかけ具合など個人的な微妙な違いで数値が若干変化することも否めない。また、1点を測定するのに熟練しても3~5分かかり、測定後のコンクリートには、部分的な損傷が生じ、現場に

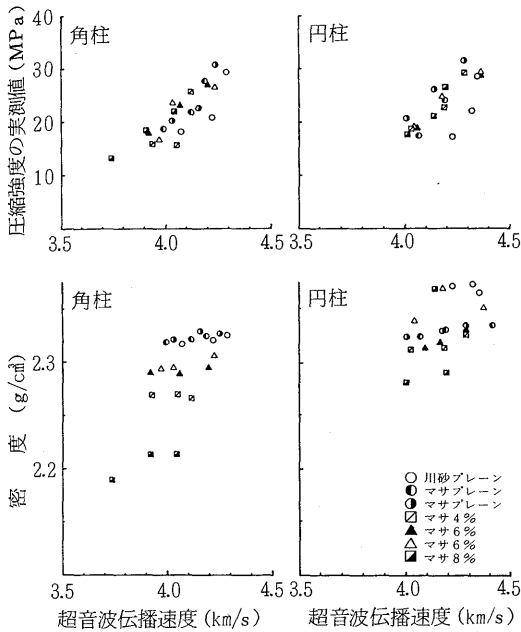


第9図 動弾性係数と圧縮強度の実測値との相関関係

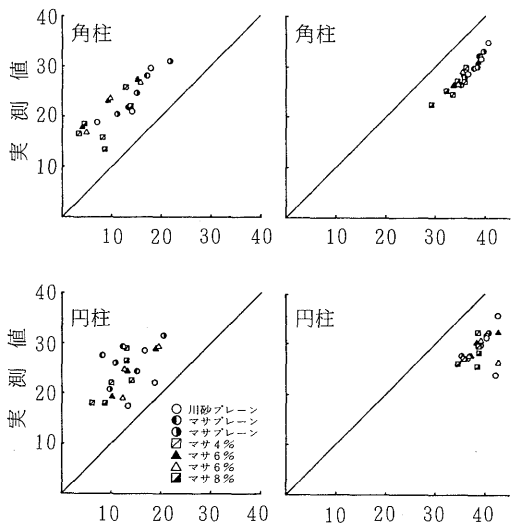


において使用する際には、ペーストラで傷を修理する必要がある。このように、測定にかなりの時間が必要なことや、部分的な損傷、費用などから考えても、ピンテスター方式は、他の非破壊試験に比べて普及にはまだ難点があるように思われる。

シュミットハンマー試験は、他の方法に比べて取扱いが容易であらゆる構造物について迅速に測定できるが、表面



第10図 超音波伝播速度と密度および圧縮強度の相関関係



第11図 圧縮強度と動弾性係数の実測値と超音波伝播速度による推定値との相関関係

の乾燥状態の影響を受け易く、一定の測定条件（表面の水分状態）を確保するには時間がかかるなどの欠点がある。

超音波による方法は、構造物を受信子と発信子で挟んで測定するもので、構造物に損傷を与えることなく迅速

に測定でき、また個人差が入りにくく、使用にあたって熟練を要しないので現場で直ちに使用できるという利点がある。したがって、この方法が非破壊試験において最も見込みのあるのと考えられる。しかし、壁や柱の構造によっては、使用が難しい場合もあり、さらに試験器そのものも高価である。

以上のことから、構造物に傷がついてもその後のセメントペーストによる補修程度でよいとするならば、ピンテスター試験が最も有効である。構造物に傷をつけず、その場で判定ができ、超音波の受信子と発信子とで構造物を挟むことができれば、超音波試験が有効である。しかし、過去の蓄積されたデータとか信頼度の面から考えれば、シュミットハンマーによる方法は捨てがたい。いずれの非破壊試験においても、一長一短があり、その場その場に応じて使い分けたり、組み分わせて利用することが望ましい。

あとがき

現在、非破壊試験は、実験室などのような特定の場所でのみ使用されることが多く、十分信頼に足る段階に至っておらずまだ研究段階にあるといえる。現場に適用されるケースは、まだ少ないのが現状である。

今回行った試験では、データ数が十分でなかったために、信頼のおける強度を推定することは難しかった。今後より多くの試験を重ねることにより、非破壊試験による圧縮強度の推定値と破壊試験による実測値との相関性を高めることができると考えられる。信頼できる相関性が得られれば、これらの非破壊試験は、破壊試験にはない特性を生かして、現場における活躍の場を広げていくことになる。今後、最適の非破壊試験の組合せを検討することも重要な問題点であるといえる。

最後に、本研究を実施するにあたり、当研究室の平成元年度専攻生、大田浩昭君、大槻憲太君、瀧澤博幸君、寺澤明人君、萩原貞二君の多大なる協力を得た。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：土木学会規準（昭和61年版），土木学会，東京（1988） pp. 277-282
- 2) 土木学会コンクリート委員会：土木学会規準（昭和61年版），土木学会，東京（1988） pp. 259-261
- 3) 萩原貞二・瀧澤博幸・小山健悟：非破壊試験方法によるコンクリート強度の推定，卒業論文（1989）
- 4) 岡田清・六車照：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，東京（1981） pp. 499-532