

非破壊検査によるコンクリートの強度推定に関する一考察

Estimation of Concrete Strength by Non-Destructive Testing

魚 本 健 人*・伊 東 良 浩*

Taketo UOMOTO and Yoshihiro ITO

1. はじめに

コンクリート強度を非破壊で推定する手法として、シュミットハンマー法、弾性波法、さらにこれらを組み合わせた方法（複合法）などが提案されている。これらの方法はいずれも直接強度を測定するものではなく、それぞれ硬度、動弾性係数といった比較的強度との相関性のある物性値を非破壊で求め、これを回帰分析などを用いて実験式を得ることにより、圧縮強度を推定しようとするものである。

しかしこのような推定を行うとき、使用材料、配合、材齢、暴露環境などの条件が異なると得られる実験定数はかなり変動し、また広範囲の条件を取り扱おうと推定精度は低いものになる。これらは本来物理的に意味の異なるものを回帰分析などにより結びつけているためであり、推定に誤差の生じるのはやむを得ないところである。

本研究では、非破壊検査結果や配合条件などの既知情報の中で、コンクリート強度を推定する場合に重要となる因子について改めて検討を行い、非破壊検査による強度推定の妥当性について考察した。

2. 検 討 内 容

検討に用いたデータは参考文献¹⁾付表 2, 3 に記載されているもので、W/C およびスランプを変化させた場合のコンクリートの反発度、弾性波速度および圧縮強度が材齢ごとに示されている。実験の概要は表 1 に示すとおりである。

本研究では、まず上記のデータについて、参考文献¹⁾と同様に重回帰分析の手法を用いて非破壊試験項目および W/C と圧縮強度の関係について検討する。次に、最適化手法として柔軟性のあるニューラルネットワークを用いて

表 1 実験の概要

粗骨材最大寸法	20mm
スランプの水準	12 cm 18 cm
W/C の水準	50% 60% 70%
空気量	4 %
供試体寸法	φ15cm × 30cm
測定時材齢	7, 28, 91, 182, 364days
非破壊試験項目	シュミットハンマー試験 弾性波速度試験

検討を行う。ここで用いるニューラルネットワークは階層型ニューラルネットワークと呼ばれるもので、出力値は中間層を介して適当な重み付けで入力値と結合しているというモデルである。この出力値と実測値との差異が微小になるような重みが得られれば、入力値による実測値の推定が可能になる。またこの関係がわかれば、入力値が出力値に及ぼす影響を求めることができる。

ここでは、W/C、スランプ、材齢、反発度、弾性波速度を入力データとしてニューラルネットワークに学習させ強度の推定を行う。そして、各入力データについて感度解析を行い、圧縮強度推定に及ぼす影響因子を抽出する。

3. 検 討 結 果

3.1 測定結果の経時変化

まず、参考文献¹⁾に示されているデータについて圧縮強度、反発度、弾性波速度のそれぞれの経時変化を図 1 に示す。

図より、次のようなことが示される。

① 圧縮強度、反発度、弾性波速度のいずれも W/C が小さいものほど大きな値を示している。また、その影響は圧縮強度に対するものももっとも大きい。

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

研究速報

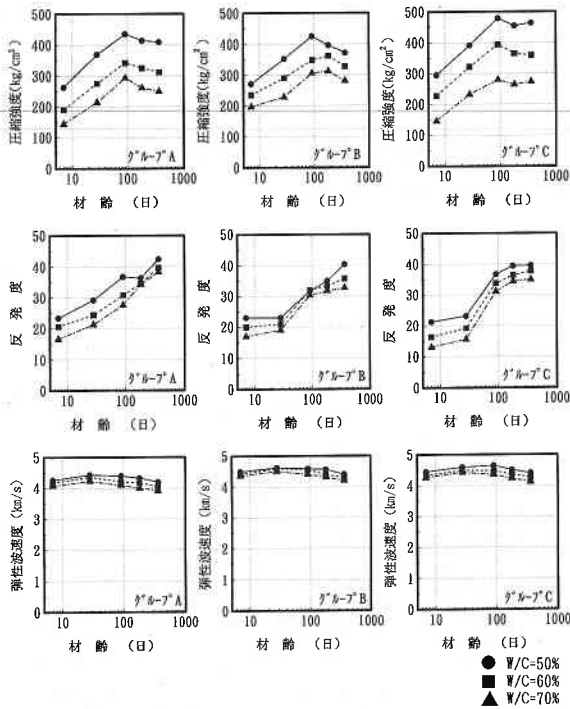


図1 圧縮強度、反発度、弾性波速度の経時変化

- ②圧縮強度の増加に対応して値が大きく変化しているのは、反発度であり、弾性波速度は材齢7日においてほぼ所定の値に達した後は、圧縮強度の変化に対応してわずかに増減する程度である。
- ③圧縮強度は材齢91日で最大になり、その後若干低下している。これに対して反発度は材齢364日まで増加し続ける。一方、弾性波速度は材齢91日以降圧縮強度の低下に対応してわずかに遅くなっており、反発度の傾向とは一見矛盾するような結果が示されている。

これらのことから、圧縮強度が増進している若材齢時には、反発度が圧縮強度を示す良い指標と考えられるが、強度増加が完了した段階においても反発度は増加するため、両者の関係は不明確になることが考えられる。一方、弾性波速度は強度変化に比べ変化が少なく、初期の強度増進を捕らえるには不向きである。しかし、圧縮強度がほぼ一定に達した段階では、弾性波速度のわずかな変化は圧縮強度の変化と比較的対応しており、精度よく値を求めることができれば、長期材齢下のコンクリートの強度変化を予測することは可能であると思われる。

このようなことから、ここで得られるようなデータを回帰分析して定めた実験式では、反発度、弾性波速度の材齢ごとの特徴は考慮に入れられておらず、誤差を増大する原因になると考えられた。

3.2 重回帰分析による検討

経時変化の比較から、各測定値の変化のパターンが異なり、重回帰式のような一次多項式によってすべての材齢で精度良く強度予測を行うのは困難であると考えられた。

そこで、これらのデータを材齢91日を境として、圧縮強度の増加期と完了期に分け、それぞれについてW/C、スランプ(SI)、材齢(Age)、反発度(R)、弾性波速度(Vp)を説明変数、圧縮強度(Fc)を目的関数として、説明変数の組み合わせを変化させながら重回帰分析を行い、その違いを比較した。表2にその結果を示す。表からもわかるように、材齢7日から91日までの間では、反発度がもっとも圧縮強度と結びつきが強く、材齢91日から364日までではW/Cとの関係が最も強い。また、いずれの場合にも弾性波速度は主要因とはなっていない。このことから、反発度は若材齢においてコンクリートの強度増加を確認する方法として妥当であるが、長期材齢で強度を予測するにはW/Cに関する情報が重要となってくるのがわかる。

3.3 ニューラルネットワークによる強度予測

前述の重回帰分析により、W/C、スランプ(SI)、材齢(Age)、反発度(R)、弾性波速度(Vp)のすべてを説明変数として得た式(1)により推定圧縮強度(Fce)と実測値を比較したものが図2である。

$$Fce = -2.87(W/C) - 2.11(SI) - 0.07(Age) + 178.63(Vp) + 7.95(R) \quad (1)$$

また、同じデータについて同様にニューラルネットワークにより推定した圧縮強度と実測値を比較したものが図3である。すべてのデータを用いれば、いずれの場合も相関係数は95%以上とかなり良い一致を示す。

次に、入力データが推定強度に及ぼす影響について感度

表2 各材齢区分ごとに求められた重相関係数

説明変数	材齢：日		
	7 ~ 91	91 ~ 364	7 ~ 364
W/C	0.689	0.922	0.722
R	0.824	0.245	0.709
Vp	0.644	0.702	0.478
W/C, R	0.912	0.953	0.890
W/C, Vp	0.758	0.949	0.729
R, Vp	0.927	0.810	0.924
W/C, R, Vp	0.950	0.957	0.948

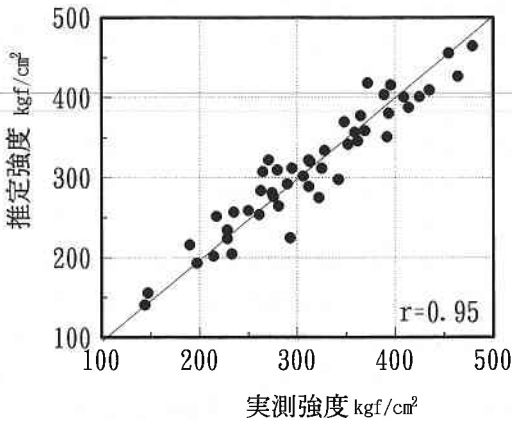


図2 重回帰分析による推定強度と実測強度の比較 (材齢7~364日)

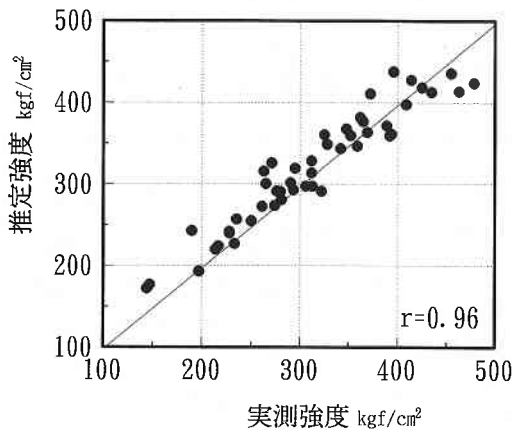


図3 ニューラルネットワークによる推定強度と実測強度の比較 (材齢7~364日)

解析を行い、強度推定に大きく寄与する因子について検討する。表3は、規準値が1%だけ増加した場合の推定強度の変化量を感度として、各入力データの推定強度に及ぼす影響を示したものである。この結果、ニューラルネットワークを用いた推定では、W/Cおよび弾性波速度が推定強度に強く影響を及ぼすことがわかった。一方、重回帰分析結果によると、弾性波速度の影響が最も大きく次に反発度であり、推定方法によって入力データの感度にかなり違いが生じることがわかった。

次に、強度増加がほぼ完了した材齢91日以降のデータについて比較を行う。図4は図2に示した重回帰式による結果のうち、材齢91日以降のものを取り出したものである。このときの相関係数は材齢91日以前のデータまで含めて推定した場合と比べて低下する。一方、ニューラルネットワークにより材齢91日以前のデータを除外して再度学習を行い推定した強度は、図5に示すようにほぼ実測値に一致

表3 各パラメータの規準値とその感度

パラメータ	規準値	感度 (kgf/cm ²)	
		ニューラルネットワーク	重回帰分析
W/C(%)	60	-3.57	-1.72
Sl	15.0	-0.02	-0.32
Age	91	-0.56	-0.06
Vp(km/s)	4.35	3.14	7.77
R	29.0	-0.05	2.31

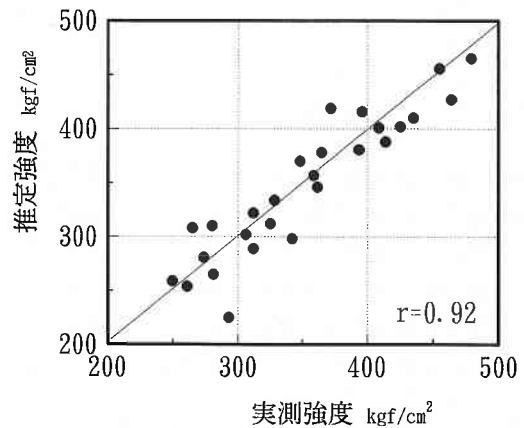


図4 重回帰分析による推定強度と実測強度の比較 (材齢91~364日)

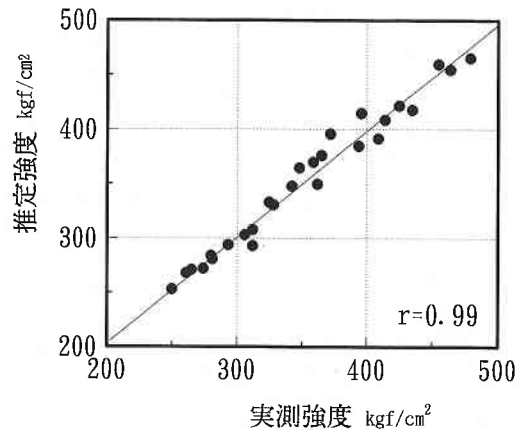


図5 ニューラルネットワークによる推定強度と実測強度の比較 (材齢91~364日)

している。このとき推定値と実測値の誤差は最大でも24kgf/cm²程度であった。

ここで、強度推定に最も影響を及ぼす因子を明らかにするために感度解析を行い、感度の低い項目を順に除去しながら強度推定を行った。その経過を示すと表4に示すよう

研 究 速 報

表 4 感度解析による要因の抽出

変数の数	W/C %	スランプ	材 齢 日	弾性波速度 km/s	反発度	相関係数
5	-4.51	-0.70	-0.02	3.34	-0.40	0.99
4	-4.32	-0.75	削除	3.85	-0.34	0.98
3	-3.93	-0.75	—	4.22	削除	0.98
2	-4.39	削除	—	2.01	—	0.93

枠内：感度 kgf/cm^2

になり、最終的には W/C と弾性波速度が最も影響を及ぼす因子として残った。これは、材齢 7 日から 364 日までのすべてのデータを用いた場合と同様であった。

4. ま と め

非破壊試験結果を用いてコンクリート強度を推定する際に、推定結果に影響を及ぼす因子について重回帰分析およびニューラルネットワーク手法を用いて検討した。ここでは、全材齢のデータをまとめて分析するだけでなく、コンクリート強度が増加する材齢 91 日までとそれ以降のデータを、それぞれ別個に分析した。その結果、次のようなことが明らかとなった。

①コンクリート強度の増加時と強度増加の完了後では反発度、弾性波速度などの説明変数と圧縮強度の相関関係が変化する。重回帰分析結果によると、強度が増加してい

る材齢 91 日までは、反発度が強度推定のためには最も重要な要因であり、強度増加が完了した段階では、W/C が最も重要な要因となる。

②ニューラルネットワークを用いると、強度を推定するための最も重要な要因は W/C となった。特に、強度増加時のデータを除外して強度推定を行ったところ、非常に推定精度が高められた。

③いずれの場合にも、弾性波速度は変動幅が他に比べ小さく補助的な要因として評価された。しかし、その変化は、圧縮強度の変化と定性的に一致しており、推定精度の向上に寄与していることがわかった。

以上のことから、コンクリート強度を推定するにあたっては、非破壊試験結果だけでなく、材齢や W/C など配合に関する情報を何らかの方法で取り入れることが重要であり、それにより実用的な強度推定が可能であると考えられる。

(1994年 6 月 10 日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊検査マニュアル，1983.2
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書，1992.3
- 3) 魚本健人・大矢孝・堤知明：現場におけるコンクリートの品質とニューラルネットワークを用いた品質推定，生産研究，VOL. 46, NO.3, pp 206-209, 1994.3