

正会員 ○ 谷川 恭雄 (名古屋大学)

同 山田 和夫 (同)

同 小阪 義夫 (同)

1. まえがき

複合非破壊試験法, すなわち2種類以上の非破壊試験法の併用によってコンクリート強度を推定する方法の有効性については, 既に Făcăoaru¹⁾, Malhotra²⁾, Wheen³⁾ などによって指摘されているが, 研究成果はいまのところ極めて乏しく, この方法の現場コンクリートへの適用性について検討した研究は, 我が国では皆無と言ってよい。現場コンクリートの強度推定に適用可能な非破壊試験法としては, 超音波速度法(以下, 音速法と略記), シュミットハンマー法, 引抜き法, 化学分析法などが挙げられるが, 試験方法の標準化という観点から言えば, 測定が容易で, かつ高価な装置を要しないことが前提条件である。そのため, 本研究では, まず現在常用されている音速法とシュミットハンマー法を組み合わせた複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定方法および推定精度などについて検討することにした。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本研究では, 次に示す2シリーズの実験を行った。

(1) 実験-I; 実験-Iは, 複合非破壊試験法によるコンクリートの推定強度に及ぼす水セメント比, 養生方法, 材令および試験体形状の影響について調べることを目的として行ったものである。実験には, 10×10×20 cm 角柱試験体およびφ10×20 cm 円柱試験体を用い, 実験要因としては, 水セメント比(W/C = 50, 60 および 70%の3種類), 養生方法(水中および空中養生の2種類)並びに材令(1週, 2週および4週の3種類)を取り上げ, 合計210個の試験体を製作した。

(2) 実験-II; 本実験は, 主として複合非破壊試験法によるコンクリートの推定強度に及ぼす粗骨材容積比, 骨材粒径および水セメント比の影響を調べるための実験であり, 実験-Iと同様に, 10×10×20 cm 角柱試験体とφ10×20 cm 円柱試験体を用いた。実験要因としては, 粗骨材容積比(V_a/V_c = 0.35, 0.39 および 0.43の3種類), 粗骨材最大粒径(φ_a = 10, 15, 20 および 25 mmの4種類)並びに水セメント比(W/C = 50, 60 および 70%の3種類)を取り上げ, 合計288個の試験体を製作した。

なお, 本研究では上記の他に, 埋め込み鉄筋(帯筋)および載荷(圧縮)応力度の大きさの影響を調べるための実験並びに複合非破壊試験法の現場コンクリートへの適用性に関する若干の実験も併せて行った。

2.2 試験体の製作および養生方法

(1) 使用材料; 試験体の製作には, 普通ポルトランドセメント(4週圧縮強さ = 40.2 kg/cm²), 木曽川産の川砂および天竜川産の川砂利を用いた。使用骨材の諸性質を Table 1 に示す。 Table 2 Mix proportions of concrete

(2) コンクリートの調合, 養生および試験材令; 各実験に使用したコンクリート

の調合表を Table 2 に示す。実験-I では, 材令2日目に脱型後, 水中養生試験体は水温 20° ± 1°C の恒温水槽中で所定材令まで養生し, 空中養生試験体は実験室内に放置した。一方, 実験-II では, 材令2日目に脱型後, 水温 20° ± 1°C の水槽中で1週間養生し, その後実験室内に放置した。

Table 1 Properties of aggregates

(a) Experiment-I					
Kind of aggregate	Maximum size (mm)	Specific gravity	Fineness modulus	Water absorption (%)	Bulk density (kg/l)
Fine	5	2.55	2.90	1.83	1.61
Coarse	15	2.64	6.25	0.63	1.70

(b) Experiment-II					
Kind of aggregate	Maximum size (mm)	Specific gravity	Fineness modulus	Water absorption (%)	Bulk density (kg/l)
Fine	5	2.53	3.74	2.56	1.56
Coarse	10	2.65	5.98	1.21	1.61
	15	2.65	6.31	0.70	1.66
	20	2.65	7.06	1.06	1.69
	25	2.64	7.55	0.96	1.71

(a) Experiment-I

W/C (%)	V _a /V _c	Unit content (kg/m ³)			
		Cement	Water	Sand	Gravel
50	0.345	420	210	769	911
60	0.344	350	210	828	908
70	0.339	300	210	884	894

(b) Experiment-II

W/C (%)	V _a /V _c	Unit content (kg/m ³)			
		Cement	Water	Sand	Gravel
50	0.350	450	225	671	924
	0.390	450	225	569	1030
	0.430	450	225	467	1135
60	0.350	375	225	729	924
	0.390	375	225	627	1030
	0.430	375	225	525	1135
70	0.350	321	225	773	924
	0.390	321	225	671	1030
	0.430	321	225	569	1135

[Note] V_a/V_c: Unit volume of coarse aggregate

試験材令はすべて4週とした。

2.3 測定方法

(1) 音速；コンクリート中の音速の測定には，実験-Iでは超音波速度測定装置（マルイ製，周波数50kHz）を，また実験-IIでは，PUNDIT（周波数50kHz）を使用した。測定方向は原則として載荷軸方向としたが，帯筋と載荷応力度の影響を調べるための実験では，10×10×20cmおよび15×15×45cm角柱体の側面間の音速を測定した。

(2) 反発係数；N型シュミットハンマーを使用し，載荷応力度 $\sigma=8\text{kg/cm}^2$ 時の反発係数を測定した。角柱体および円柱体とも，側面10点における測定値の平均を，その試験体の反発係数とした。

(3) 圧縮強度；音速および反発係数の測定後，JIS A 1108の規定に準じて，コンクリートの圧縮強度を求めた。

3. 実験結果とその考察

3.1 音速および反発係数に及ぼす各種要因の影響

複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定方法について検討する前に，コンクリートの音速と反発係数に及ぼす各種要因の影響について簡単に考察しておく。

(1) 音速に及ぼす各種要因の影響；Fig.1(a)および(b)に，実験-Iと実験-IIによって得られたコンクリートの圧縮強度(F_c)と音速(V_{pc})との関係を示す。これらの図によれば，圧縮強度と音速が正の相関を示す要因は，水セメント比(W/C)と材令(Age)であり，粗骨材の容積比(V_a/V_c)と最大粒径(ϕ_a)は負の相関を示す。すなわち，粗骨材の容積比および粒径が大きいくほど，音速は増大するが，圧縮強度は逆に減少する。また，既に指摘されているように，両者の関係は養生方法によっても大きく相違し，同一調合のコンクリートでは，水中養生時の方が空中養生時よりも同一音速時の圧縮強度は小さくなる。次に $\phi 6\text{mm}$ の帯筋を10cm間隔(かぶり厚さ1.5cm)で配した15×15×45cm角柱試験体の音速の分布状況を測定した一例をFig.2に示す。図からわかるように，今回の実験に用いた帯筋が細径であったこともあって，少なくとも試験体中心軸上の音速(V_{pc1})は，埋め込み鉄筋によって顕著な影響を受けない。また，載荷応力度と音速との関係については，既往の実験結果と同様に，載荷応力度と圧縮強度との比(σ/F_c)が約0.6~0.7よりも小さい範囲では，音速はほぼ一定の値を示し，音速に及ぼす載荷荷重の影響は無視してもよいことがわかった。

(2) 反発係数に及ぼす各種要因の影響；圧縮強度(F_c)と反発係数(R)との関係を示したFig.3によれば， F_c と

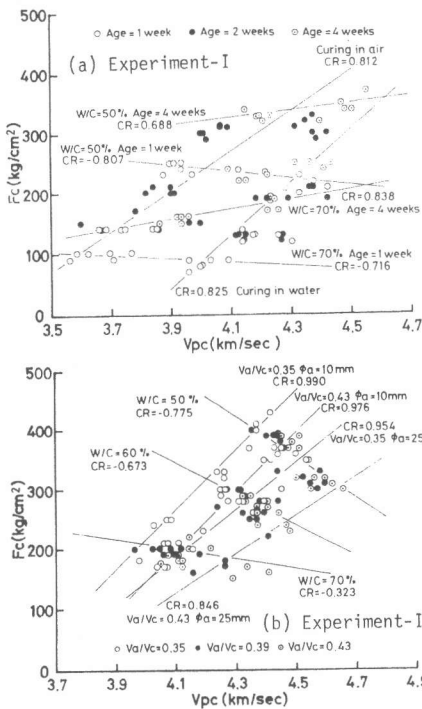


Fig.1 Relation between F_c and V_{pc}

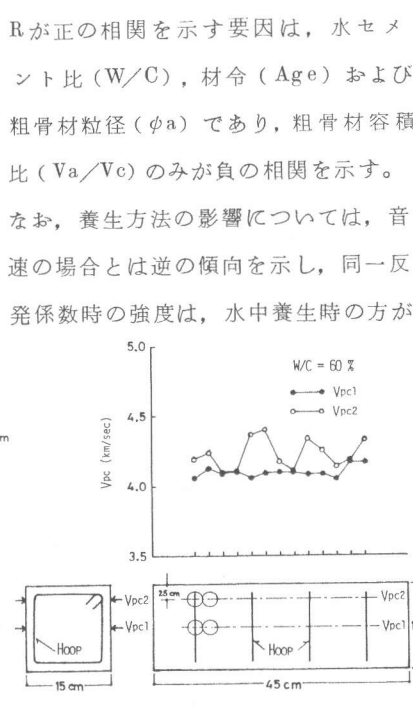


Fig.2 Effect of reinforcement on V_{pc}

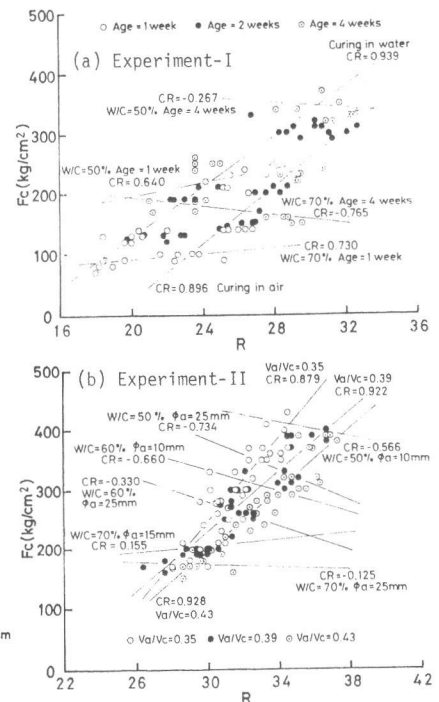


Fig.3 Relation between F_c and R

空中養生時よりも大きくなる。Fig.4は、実験-Iの結果とシュミットハンマー法に関する各国の規準式とを比較したものであるが、図中の各規準式は、本実験結果の下限を与えており、安全側にあると言える。

次に、音速の場合と同様に、反発係数に及ぼす埋め込み鉄筋の影響についても調べたが、今回の実験の範囲では、コンクリートの反発係数は埋め込み鉄筋によってほとんど相違しなかった。また、図に示していないが、反発係数に及ぼす載荷応力度の影響について調べた結果、コンクリートの反発係数は載荷応力度によって大きく相違し、試験体寸法が小さいほど、その影響の程度は顕著になることが明らかとなった。

上述のように、音速法またはシュミットハンマー法を単独で用いた場合は、水セメント比、骨材の粒径および混入量、養生方法、材令などがコンクリート強度の推定精度に影響を及ぼすため、これらの要因が不明もしくは大きく変動するようなコンクリートにあつては、良好な推定精度を期待することはできない。

3.2 コンクリート強度の推定式

音速 (V_{pc}) と反発係数 (R) の併用によるコンクリート強度 (F_c) の推定式としては、既に次の二つの式が提案されている。

$$\text{Wiebenga 式}^4): \log(F_c) = k_1 R + k_2 V_{pc} + C \text{ ----- (1)}$$

$$\text{尼崎・明石式}^5): V_{pc}/F_c = k_1 R + k_2 R^2 + k_3 R^3 + C \text{ --- (2)}$$

ここでは、上式の外に、次に示す (3) ~ (5) 式を含め、合計 5 種類の推定式を用いてコンクリート強度の表示性能について検討することにした。

$$F_c = k_1 R + k_2 V_{pc} + C \text{ ----- (3)}$$

$$F_c/V_{pc} = k_1 R + k_2 R^2 + k_3 R^3 + C \text{ ----- (4)}$$

$$F_c/\rho V_{pc}^2 = k_1 R + k_2 R^2 + k_3 R^3 + C \text{ ----- (5)}$$

ここに、 $k_1 \sim k_3$: 実験定数、 C : 定数項、 ρ : コンクリート比重。

データの重回帰分析には、大型計算機用サブルーチン SPSS (統計用パッケージ) の変数追加モードを使用し、上式中の音速と反発係数の他に、

今回の実験で取り上げた各種要因を順次追加して回帰式を作製し、回帰式の重相関係数や各要因の寄与率などを算定した。それらの結果の一例を Table 3 に示す。Table 3(a) は、実験-I による実測値の解析結果であり、コンクリート強度の推定式として、(1) ~ (5) 式にいくつかの変数を追加した次の 5 式を用いている。

$$\log(F_c) = k_1 R + k_2 V_{pc} + k_3 (W/C) + k_4 AGE + k_5 CRC + C \text{ ----- (6)}$$

$$V_{pc}/F_c = k_1 R + k_2 R^2 + k_3 R^3 + k_4 (W/C) + k_5 AGE + k_6 CRC + C \text{ --- (7)}$$

$$F_c = k_1 R + k_2 V_{pc} + k_3 (W/C) + k_4 AGE + k_5 CRC + C \text{ ----- (8)}$$

$$F_c/V_{pc} = k_1 R + k_2 R^2 + k_3 R^3 + k_4 (W/C) + k_5 AGE + k_6 CRC + C \text{ ---- (9)}$$

$$F_c/\rho V_{pc}^2 = k_1 R + k_2 R^2 + k_3 R^3 + k_4 (W/C) + k_5 AGE + k_6 CRC + C \text{ --- (10)}$$

また、Table 3(b) は、実験-I と実験-II による実測値を一括して解析した際の重回帰分析結果であり、ここでは推定式として次式を用いた場合の結果のみが示してある。

$$F_c = k_1 R + k_2 V_{pc} + k_3 (W/C) + k_4 \phi_a + k_5 AGE + k_6 (V_a/V_c) + k_7 CRC + C \text{ (11)}$$

ここに、 R : 反発係数、 V_{pc} : 音速 (km/sec)、 W/C : 水セメント比 (%), ϕ_a : 粗骨材粒径 (mm), AGE : 材令 (週), V_a/V_c : 粗骨材容積比、 CRC : 養生方法 (1 = 水中養生、

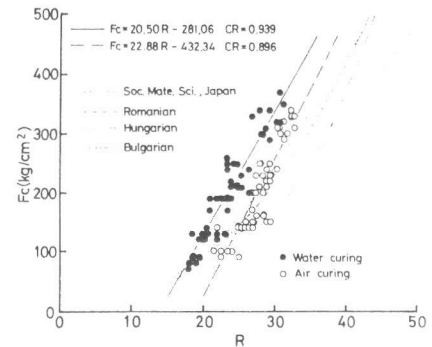


Fig.4 Relation between F_c and R (Comparison between test results and recommended equations by some countries)

Table 3 Results of regression analyses
(a) Eq.(6)-Eq.(10)

Eq. No.	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	C	CR	ΔCR^2
(6)	0.0345	-	-	-	-	-	1.3910	0.788	0.620
	0.0335	0.3579	-	-	-	-	-0.0493	0.938	0.259
	0.0259	0.2775	-0.0061	-	-	-	0.8458	0.958	0.039
	0.0146	0.1314	-0.0114	0.0380	-	-	1.9655	0.967	0.018
	0.0154	0.1008	-0.0115	0.0395	-0.0170	-	2.0982	0.967	0.001
(7)	-0.0019	-	-	-	-	-	0.0707	0.818	0.670
	-0.0066	0.0001	-	-	-	-	0.1296	0.835	0.028
	-0.0066	0.0001	0.0000	-	-	-	0.1296	0.835	0.000
	-0.0076	0.0001	-	0.0005	-	-	0.1027	0.909	0.128
	-0.0080	0.0002	-	0.0007	-0.0026	-	0.0963	0.957	0.089
	-0.0080	0.0002	-	0.0007	-0.0027	-0.0003	0.0950	0.957	0.001
(8)	15.46	-	-	-	-	-	-192.7	0.784	0.615
	-	172.5	-	-	-	-	-499.6	0.545	0.297
	15.46	-	-	-	-	-	-192.7	0.784	0.615
	15.01	161.8	-	-	-	-	-844.1	0.936	0.261
	11.22	122.0	-3.04	-	-	-	-400.5	0.961	0.047
	6.25	57.6	-5.35	16.76	-	-	93.2	0.970	0.017
	7.60	9.7	-5.55	19.07	-26.6	-	300.5	0.972	0.004
(9)	-	-	0.0019	-	-	-	15.61	0.849	0.721
	0.2537	-	0.0017	-	-	-	11.36	0.849	0.001
	0.2537	0.0000	0.0017	-	-	-	11.36	0.849	0.000
	0.6285	-	0.0009	-1.0708	-	-	82.21	0.934	0.151
	0.6376	-	0.0004	-1.3605	4.3170	-	98.50	0.967	0.063
	0.9689	-	0.0004	-1.2275	3.7078	-2.8272	86.53	0.968	0.002
(10)	-	0.0076	-	-	-	-	0.0798	0.894	0.800
	0.0000	0.0041	0.0001	-	-	-	0.8149	0.895	0.001
	-	0.0041	0.0001	-	-	-	0.8149	0.895	0.000
	-	0.0052	0.0000	-0.0841	-	-	6.6272	0.948	0.097
	-	0.0054	-0.0000	-0.0977	0.2026	-	7.3666	0.955	0.014
	-0.0038	-0.0000	-0.1137	0.2753	0.3388	-	8.4698	0.957	0.003

[Notes] $k_1 - k_6$: Empirical constants, CR: Correlation coefficient.

(b) Eq.(11)

Eq. No.	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	C	CR	ΔCR^2
(11)	15.15	-	-	-	-	-	-	-195.4	0.815	0.665
	-	239.6	-	-	-	-	-	-763.8	0.681	0.463
	15.15	-	-	-	-	-	-	-195.4	0.815	0.665
	11.78	129.4	-	-	-	-	-	-642.1	0.876	0.102
	9.22	73.9	-4.34	-	-	-	-	-75.6	0.939	0.114
	9.45	98.8	-3.89	-3.80	-	-	-	-150.6	0.956	0.032
	4.45	29.4	-6.38	-3.51	24.57	-	-	354.3	0.969	0.025
	7.71	69.3	-4.90	-3.51	17.83	-408	-	174.0	0.975	0.011
	7.25	76.7	-4.91	-3.63	17.56	-417	5.5	153.4	0.975	0.001

[Notes] $k_1 - k_7$: Empirical constants, CR: Correlation coefficient.

2 = 空中養生)。

3.3 各推定式による圧縮強度の推定精度および各種要因の寄与率

Table 3 (a)によれば、各推定式とも変数を追加することにより相関係数 (CR) は増大するが、その増大率は、反発係数に音速を追加した場合並びにそれらに更に水セメント比の項を追加した場合に大きくなる。例えば、(8)式を用いた場合、反発係数または音速のみでコンクリート強度を表示したときの重相関係数 (CR) は、それぞれ 0.784 および 0.545 であるが、両者を併用することにより、重相関係数は 0.936 にまで増大し、複合非破壊試験法の有効性が顕著に現われている。また、Table 3 (a) から明らかなように、音速と反発係数を併用した場合のコンクリート強度の推定式のうち、(6)式 (= (1)式) または (8)式 (= (3)式) の表示性能が最も優れている。

次に、Table 3 (b)によれば、変数追加法によって解析した場合の反発係数と音速以外の要因の寄与率 (ΔCR^2) は、水セメント比が約 0.11、粒径と材令が約 0.03、粗骨材容積比が約 0.01、養生方法が約 0.001 となり、水セメント比の寄与率以外は極めて小さい。このように、音速または反発係数のみを用いる非破壊試験法では、コンクリート強度の推定精度に大きな影響を及ぼす養生方法や材令などの因子が、音速と反発係数を併用することによって消去しうることがわかる。

3.4 推定式の提案

上記の結果に基づいて、本研究では音速と反発係数を組み合わせた複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定式として、次式を提案する。

$$\text{水セメント比が不明な場合: } F_c = 11.8R + 129V_{pc} - 642 \quad \text{-----(12)}$$

$$\text{水セメント比が既知の場合: } F_c = 9.2R + 74V_{pc} - 4.3(W/C) - 74 \quad \text{-----(13)}$$

ただし、上式中の反発係数および音速は、10×10×20cm 角柱体を用いた場合の値であるため、実構造部材の強度推定に上式を適用する場合には、断面寸法、埋め込み鉄筋、圧縮応力度などの影響を考慮して補正を行う必要がある。これらの要因のうち、ここでは今回の実験結果を参考にして、反発係数についてのみ、Fig. 5 に示すように、圧縮応力度 (σ) による補正 (ΔR) を行うものとする。

3.5 提案式による RC 実柱部材のコンクリート強度の推定

本研究で提案した (12) 式の適用性を調べるために、RC 実柱部材のコンクリート強度の推定実験を行った。測定の対象とした RC 柱部材に使用されているコンクリートの調合・強度データ、断面寸法などを以下に示す。

- 1) 調合データ：設計基準強度 = 225kg/cm²、調合強度 = 270kg/cm²、スランブ = 20cm、骨材粒径 = 25mm。
- 2) 標準円柱体強度データ：平均値 = 323kg/cm²、標準偏差 = 20.3kg/cm²。
- 3) 断面寸法等：断面 = 70×70cm、高さ = 500cm、主筋 = 24-D25、フープ筋 = D13、@ 10cm。
- 4) 実測時材令：約 1年。

コンクリート強度の推定結果を Fig. 6 に示す。図中には、圧縮応力度 (σ) を 8 kg/cm² および設計基準強度の 1/3 (75kg/cm²) と仮定した場合の推定強度が示されている。図によれば、本提案式による強度推定値は、標準円柱体強度と比較してほぼ順当な値となり、また、打込み高さ方向のコンクリートの強度性状をほぼ合理的に表わしていると言える。しかし、本提案式の妥当性については、今後更に適用例を増して検討する必要がある。

〔謝辞〕本実験に際して御助力を得た小林宏史君、桐山伸一君、祖父江美陽君、平松義孝君および吉川学君に謝意を表します。

[REFERENCES]

- 1) Făcăoaru, I., Symp. on Non-destructive Testing of Concrete and Timber, 1970, pp.39-49.
- 2) Malhotra, V.M., ACI Monograph No.9, Detroit, Michigan, 1976, 188 pp.
- 3) Wheen, R.J., Building Science, Vol.9, 1974, pp.157-166.
- 4) Wiebenga, J.G., Institut TNO Voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, Aug.1968, 12 pp.
- 5) 尼崎, 明石, 第 32 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, 昭 52.10, pp.88-89.

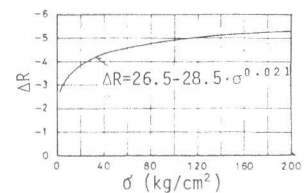


Fig.5 Correction value (ΔR) of rebound number

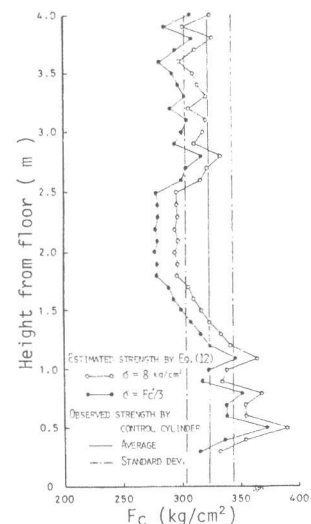


Fig.6 Strength distribution of RC column