

[36] 複合非破壊試験法によるコンクリートの強度推定値に及ぼす 材令の影響

正会員 小阪 義夫 (名古屋大学)
正会員 谷川 恭雄 (名古屋大学)
正会員 ○ 山田 和夫 (名古屋大学)
熊谷 茂 (名古屋大学)

1. まえがき

超音波速度法(以下、音速法と略記)とシュミットハンマー法を併用した複合非破壊試験法は、これらの各方法を単独に使用した場合よりもコンクリート強度の推定精度の点で格段に優れており、また、両方法とも既に多くの技術者に慣用されているため、この種の組合せ法は、コンクリートの非破壊試験法の今後の主流になるものと思われる。前報¹⁾では、材令が4週に至るまでの比較的早期材令におけるコンクリートを用いて、複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定式および推定精度に及ぼす各種調査要因、養生方法、材令などの影響について検討し、この方法によれば、材令や養生方法などの影響がほぼ消去できることを示した。しかし、このような利点が長期材令下のコンクリートにおいても同様に認められるか否かについては、さらに詳細な実験によって検討する必要がある。そのため、本報では前報の結果と併せて、材令26週に至るまでのコンクリートを用いて、音速法とシュミットハンマー法を併用した複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定精度に及ぼす材令、養生方法などの影響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

本報では、表-1に示すように、複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定精度に及ぼす水セメント比(W/C=50%、60%および70%の3種類)、養生方法(標準水中養生および空中養生の2種類)および材令(材令=4週、13週および26週の3種類)の影響を調べた。なお、圧縮強度測定用として $\phi 10 \times 20$ cm円柱試験体を、また音速および反発硬度測定用として $10 \times 10 \times 20$ cm角柱試験体(一部 $15 \times 15 \times 30$ cm角柱試験体も併用)を使用した。

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、木曾川産の川砂および天龍川産の川砂利を使用した。使用骨材の諸性質を表-2に示す。

(2) コンクリートの調合、養生および試験材令：本実験に使用したコンクリートの調合表を表-3に示す。いずれのコンクリートも実測スランプは約20~22 cmであった。角柱試験体は材令1日目に、また円柱試験体は材令2日目に脱型したのち、水中養生試験体は水温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 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。試験材令は表-1に示すとおりである。

2.3 測定方法

(1) 音速：マルチ製音速測定装置(周波数50 kHz)を用いて、角柱試験体の載荷軸方向の音速を測定した。

(2) 反発硬度：反発硬度の測定には、NR型シュミットハンマー(自記記録型)を使用し、試験の前にテストアンビルを用いて機器の較正を行った。角柱試験体に 8 kg/cm^2 の圧縮応力度を加えて試験機に固

定し、打設時の両側面について各5点ずつ、合計10点

表-1 実験の概要

Notation of specimen	W/C (%)	Curing condition	Age of concrete (weeks)	Number of specimen
70N 60N 50N	70 60 50	Water curing Air curing	4,13,26	10x20 cm prism: 24, $\phi 10 \times 20$ cm cylinder: 24, respectively

表-3 コンクリートの調合表

Notation of specimen	W/C (%)	Unit content (kg/m ³)			
		Cement	Water	Sand	Gravel
70N	70	321	225	671	1030
60N	60	375	225	627	1030
50N	50	450	225	569	1030

表-2 使用骨材の諸性質

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

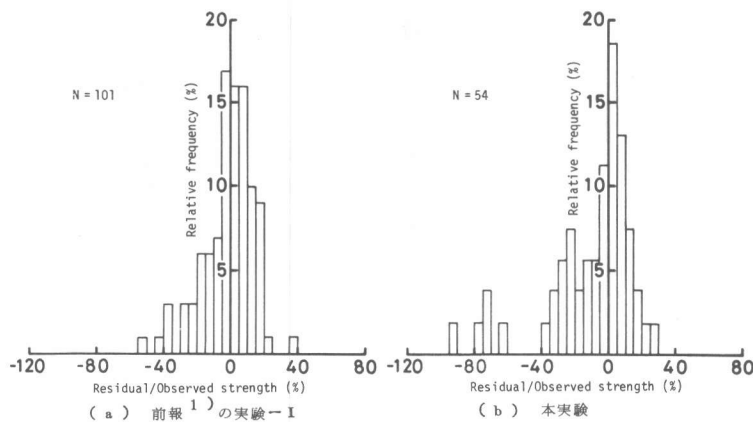


図-1 式(1)による推定強度のパラツキ

の反発硬度を測定した。結果の整理に際しては、とくにバラツキの大きいもの(原則として、平均値から±20%以上の誤差をもつもの)を除いた測定値の平均値をその試験体の反発硬度とした。

(3) 圧縮強度：上記の測定を終了したのち、JIS A1108の規定に従って、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 前報¹⁾の実験結果と今回の実験結果との比較

前報では、本実験に近い調査をもつコンクリート(前報の実験-I)の材令4週に至るまでの実験結果に基づき、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得た。

$$F_c = 15.0R + 162V_{pc} - 844 \quad CR = 0.936 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 F_c ：コンクリートの圧縮強度 (kg/cm^2)、 R ：反発硬度、 V_{pc} ：音速 (km/s)、 CR ：重相関係数。

ここでは、前報で示したような比較的早期材令下のコンクリートを用いて求めた強度推定式が、長期材令下のコンクリートにも適用できるかどうかを検討するために、まず上式による推定強度と本実験によって得られた実測強度との比較検討を行うことにする。図-1は、式(1)によるコンクリートの推定強度のパラツキを示したものである。ただし、

図-1(a)は、式(1)を作成するために使用した前報の実験結果である。図によれば、当然のことながら、図-1(b)に示した本実験に対する推定強度のパラツキは、図-1(a)のそれよりも大きい、とくに推定強度が実測強度よりも大きい範囲(横軸の値が負の範囲)でバラツキが顕著である。図-2、図-3および図-4は、それぞれ式(1)による推定強度と実測強度との比($cal.-F_c/exp.-F_c$)に及ぼす材令(Age)、養生方法および水セメント比(W/C)の影響を示している。これらの図中には、前報の実験結果も破線で示してある。図-2によれば、材令13週までの範囲では、今回の実験結果は前報の実験結果とほぼ同様の傾向を示し、式(1)によって強度を推定することが可能であるが、材令26週になると、推定強度が実測強度を大きく上回っており、かつバラツキも非常に大きい。これは、図-3および図-4からも明らかなように、主として空中養生を行った試験体における水セメント比の影響に起因している。したがって、早期材令から比較的長期材令に至るまでのコンクリートの強度を精度よく推定するためには、複合非破壊試験法による場合も、材令の経過に伴う養生方法および水セメント比の影響度合の変化について考慮する必要がある。

3.2 コンクリート強度の推定精度および各種要因の寄与率

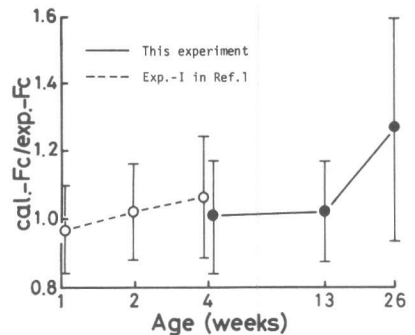


図-2 式(1)による強度の推定精度に及ぼす材令の影響

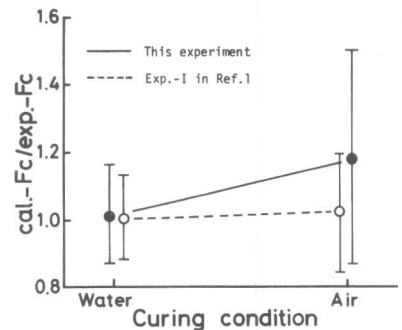


図-3 式(1)による強度の推定精度に及ぼす養生方法の影響

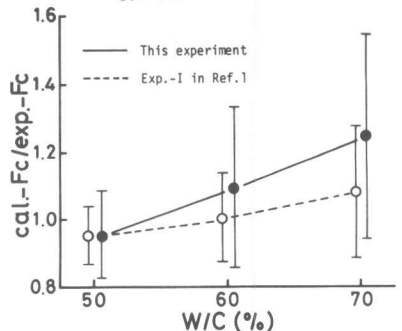


図-4 式(1)による強度の推定精度に及ぼす水セメント比の影響

コンクリート強度の推定式としては、前報で示したように各種のものが考えられるが、ここでは、これらのうち推定精度の点で優れている次式を用いて、重相関係数、各種要因の寄与率などについて検討することにする。

$$F_c = k_1 R + k_2 V_{pc} + k_3 W/C + k_4 \phi_a + k_5 AGE + k_6 (V_a/V_c) + k_7 CRC + C \cdots (2)$$

ここに、 W/C : 水セメント比 (％)、 ϕ_a : 粗骨材最大寸法 (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、2 = 空中養生)、 $k_1 \sim k_7$ および C : 実験定数。

重回帰分析結果を表 - 4 および表 - 5 に示す。ただし、表 - 4 は今回の実験結果に関する解析結果であり、表 - 5 は前報の実験と本実験による結果を一括して解析した場合の結果である。表 - 4 (a) によれば、反発硬度 (R) と音速 (V_{pc}) のみでコンクリート強度を推定した場合の重相関係数 (CR) は 0.620 であり、前報に示した材令 4 週までの結果 ($CR=0.936$) と比較して極めて小さい。また、 R および V_{pc} の寄与率は、前報の結果ではそれぞれ 0.615 および 0.261 であったのに対し、本実験結果ではそれぞれ 0.146 および 0.239 となり、とくに反発硬度の寄与率の低下が顕著である。強度推定式として非破壊試験値以外に水セメント比 (W/C) の要因を付加すると、 CR の値は 0.952 となり、前報の結果 ($CR=0.961$) とほぼ同程度となる。したがって、材令 13 週以上のコンクリートにみられる強度推定精度の低下は、早期材令下では反発硬度を用いることによって大部分の説明ができた水セメント比の効果が、長期材令下では説明できなくなるためと考えられる。また、複合非破壊試験値のみで推定した場合の強度推定式中の各実験定数は、音速に関しては前報の結果 (1.62) とそれほど大きな差は認められないが、反発硬度の係数は、前報の結果 (15.0) の約 1/3 になっている。したがって、日本材料学会の「シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法指針 (案)」に示されているように、複合非破壊試験による場合にも、長期材令下のコンクリート強度の推定に対しては、早期材令下のそれと比較して反発硬度の係数を低減させるなどの措置について一考する必要がある。表 - 4 (b) および (c) は、今回の実験結果を水中養生および空中養生別に解析した結果である。これらの表によれば、水中養生時のコンクリート強度に対する反発硬度の寄与率は大きいが、空中養生時のそれは極めて小さい。この点からも、長期材令下のコンクリート強度の推定精度が低下する原因は、主として空中養生を行ったコンクリートにおける反発硬度にあると推察される。

一方、材令 1 週から 26 週までの実験結果を一括して解析した場合の結果 (表 - 5 (a) 参照) によれば、上述の空中養生を行った長期材令下のコンクリートの反発硬度の影響によって、複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定精度はそれほど増大せず、重相関係数は 0.855 となった。図 - 5 から明らかなように、早期材令から長期材令に至るまでの結果を一括して解析すると、早期材令における結果のみで解析した場合よりも推定強度に及ぼす水セメント比の影響が材令にかかわらず大きくなる。また、養生方法の影響は、 W/C が 50 % およ

表 - 4 重回帰分析結果 (本実験)

No.	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	C	CR	ΔCR^2
(a)	4.77	-	-	-	-	-	-	135.4	0.338	0.114
	-	131.1	-	-	-	-	-	-300.7	0.488	0.239
	-	131.1	-	-	-	-	-	-300.7	0.488	0.239
	5.41	140.1	-	-	-	-	-	-494.9	0.620	0.146
	1.88	87.3	-5.84	-	-	-	-	187.8	0.952	0.521
(b)	-0.10	45.3	-6.42	1.84	-	-	-	438.3	0.963	0.021
	-0.01	41.2	-6.43	1.88	-	-2.2	-	456.9	0.963	0.001
	19.87	-	-	-	-	-	-	-238.6	0.857	0.734
	18.21	50.3	-	-	-	-	-	-422.9	0.863	0.012
	5.98	81.9	-4.96	-	-	-	-	50.6	0.952	0.161
(c)	4.81	32.2	-5.60	1.52	-	-	-	324.6	0.960	0.014
	-	216.2	-	-	-	-	-	-628.8	0.578	0.334
	-2.05	246.9	-	-	-	-	-	-710.7	0.589	0.012
	-0.42	128.3	-5.59	-	-	-	-	73.1	0.966	0.587
	-2.00	34.2	-6.22	2.68	-	-	-	521.0	0.982	0.030

[Notes] (a): All data, (b): Data of water curing, (c): Data of air curing, $k_1 \sim k_7$ and C : Empirical constant, CR : Correlation coefficient.

表 - 5 重回帰分析結果 (本実験および前報 1) の実験 - I)

No.	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	C	CR	ΔCR^2
(a)	-	12.46	177.6	-	-	-	-	-514.4	0.614	0.377
	-	-	-	-	-	-	-	-104.7	0.680	0.462
	12.46	-	-	-	-	-	-	-104.7	0.680	0.462
	11.04	151.9	-	-	-	-	-	-703.1	0.855	0.270
	7.33	118.9	-4.43	-	-	-	-	-199.4	0.939	0.151
	6.46	101.1	-4.84	3.86	-	-	-	-141.9	0.944	0.008
	6.54	103.5	-5.35	30.88	-	-2872	-	-455.8	0.945	0.003
	5.73	120.9	-5.42	32.62	-	-3109	11.7	447.4	0.946	0.001
	5.89	127.3	-5.34	34.31	-0.38	-3247	13.2	433.1	0.946	0.001
	21.43	-	-	-	-	-	-	-294.9	0.923	0.852
(b)	16.93	117.4	-	-	-	-	-	-696.5	0.945	0.041
	12.85	130.5	-2.16	-	-	-	-	-523.6	0.956	0.020
	12.59	98.4	-2.58	3.88	-	-	-	-417.2	0.959	0.007
	12.37	104.0	-2.93	19.89	-	-1709	-	-69.1	0.960	0.001
	12.34	99.7	-2.96	18.88	0.19	-1624	-	-63.2	0.960	0.001
	-	254.5	-	-	-	-	-	-794.7	0.772	0.595
	5.26	187.8	-	-	-	-	-	-679.8	0.790	0.029
(c)	2.33	149.7	-5.37	-	-	-	-	-119.2	0.959	0.296
	2.42	134.8	-5.50	1.74	-	-	-	-83.1	0.960	0.002
	2.52	137.6	-6.00	27.94	-	-2790	-	496.4	0.962	0.003
	3.06	145.5	-5.89	31.41	-0.72	-3078	-	492.6	0.962	0.001
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[Notes] (a): All data, (b): Data of water curing, (c): Data of air curing, $k_1 \sim k_7$ and C : Empirical constant, CR : Correlation coefficient.

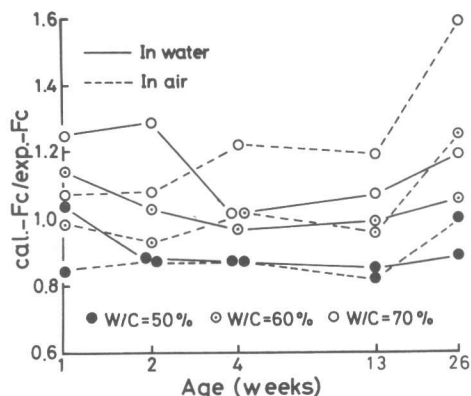


図 - 5 コンクリート強度の推定精度に及ぼす材令の影響

び60%の場合には複合非

表-6 重回帰分析結果
(材令18週までのデータ)

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	C	CR	ΔCR^2
15.15	-	-	-	-	-	-	-175.9	0.739	0.546
-	173.7	-	-	-	-	-	-499.7	0.580	0.336
15.15	-	-	-	-	-	-	-175.9	0.739	0.546
14.67	164.6	-	-	-	-	-	-846.2	0.920	0.301
10.60	130.0	-3.24	-	-	-	-	-401.9	0.955	0.065
8.94	112.3	-3.88	-	7.29	-	-	-263.0	0.959	0.008
8.16	98.0	-4.25	3.47	7.43	-	-	-219.1	0.963	0.008
8.22	99.8	-4.66	22.38	7.29	-2004	-	200.3	0.963	0.001
8.65	92.7	-4.60	21.40	7.19	-1880	-5.1	194.6	0.964	0.001

[Notes] k_1 - k_7 and C: Empirical constant, CR: Correlation coefficient.

よび(c)と同様に養生方法別に解析すると、表-5(b)および(c)のようになる。これらの表によれば、水中養生を行った試験体の場合には、長期材令下のコンクリートを含めても複合非破壊試験法による強度推定精度は極めて高く、重相関係数(CR)は0.945となる。一方、空中養生試験体の場合には、上述の反発硬度の影響のために推定精度はそれほど向上せずCRは0.790となった。

表-6は、材令13週までの実験結果を一括して解析した結果であるが、この程度の材令の範囲では、音速および反発硬度の併用によるコンクリート強度の推定精度は比較的良好(CR=0.920)であり、材令4週までの結果(CR=0.936)と同程度である。また、強度推定式の実験定数の値も前記の式(1)とほぼ同じ値を示し、材令13週までのコンクリートに対しては、式(1)で強度を推定することが可能である。図-6は、音速法、シュミットハンマー法および複合非破壊試験法による材令13週に至るまでのコンクリートに対する推定強度のパラツキを示したものである。ただし、強度の推定式としては表-6に示した重回帰分析によって得られたものを使用した。図-6からも明らかなように、複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定精度は、これらの方法を単独に使用した場合よりも著しく優れており、材令13週に至るまでのコンクリートに対してもその有効性が認められる。また、図-7は、図-6に示した結果を推定強度と実測強度との比で評価して養生方法別に示したものであるが、複合非破壊試験法による場合は、養生方法の影響をほぼ無視し得ることがわかる。

4. 結論

本実験によって得られた結果を要約すると、およそ次のようになる。

1)材令13週に至るまでのコンクリートの強度推定に関しては、複合非破壊試験法の有効性が認められる。

2)材令13週以上のコンクリートを含む場合にも、水中養生の場合には複合非破壊試験法によって精度よくコンクリート強度を推定できる。

3)空中養生を行った長期材令下のコンクリートの強度を推定するためには、複合非破壊試験法の場合も材令に伴う反発硬度の補正が必要である。

なお、現在材令1年に至るまでのコンクリートに関する実験を継続中であるため、これらの結果をまてさらに詳細な検討を行う予定である。

【謝辞】本実験に際して御助力を得た名大学生・三村浩君に謝意を表します。なお、本研究費の一部は、昭和54年度文部省科学研究費補助金(試験研究)によったことを付記する。

【文献】1) 谷川・山田・小阪, 第1回コンクリート工学講演会講演論文集, 1979, pp. 21-24.

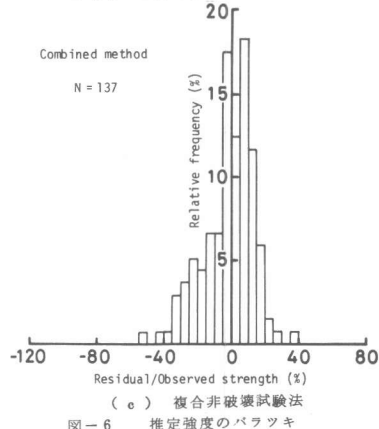
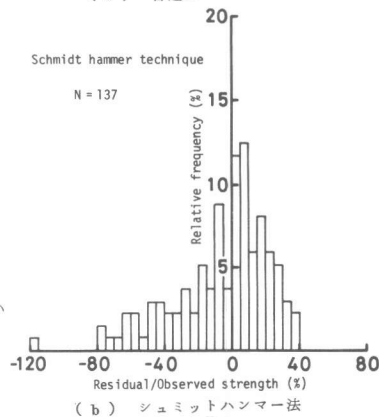
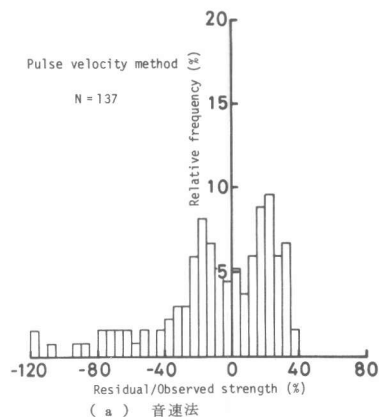


図-6 推定強度のパラツキ

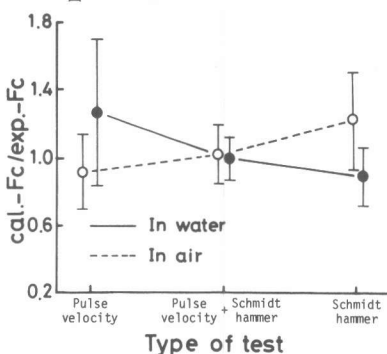


図-7 コンクリート強度の推定精度に及ぼす養生方法の影響