

[5] 複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定式

正会員○谷川 恭雄(三重大学工学部)
 正会員 小阪 義夫(名古屋大学工学部)
 正会員 山田 和夫(名古屋大学工学部)
 正会員 熊谷 茂(名古屋大学大学院)

1. まえがき

コンクリートの複合非破壊試験法については、RILEMでも1976年に国際指針を作成するための委員会を設置し、現在第2次案について審議中である。¹⁾複合非破壊試験法は、コンクリートの圧縮強度と正の相関を有する種々の非破壊試験値を組み合わせることによって、強度推定精度を向上させることを意図したものであるが、各種組合せ法のうち、シュミットハンマー法による反発硬度と、超音波伝搬速度法(以下、音速法と略記)による音速の測定値を併用する方法が、実用性と強度推定精度の点で今のところ最も優れた方法であると考えられる。^{2)~4)}

筆者らも、ここ数年反発硬度と音速を組み合わせた複合非破壊試験法に関する一連の研究^{5)~9)}を行ってきたが、本報では、これまでに実施した7シリーズにわたる実験によって得られたデータを用いて、コンクリートの材令や、粗骨材の最大寸法、単位セメント量、単位粗骨材量などの調合要因が変化する場合にも適用できるような強度推定式について考察することにした。また、縦打ちによって製作した柱状コンクリート試験体および実構造部材を対象として、提案した強度推定式の適用性についても併せて検討した。

2. 実験の概要

現在までに行ってきた実験の内容については、文献5)~9)に詳しいため、ここではその要点のみを再録する。

2.1 測定対象コンクリート

測定の対象としたコンクリートの使用材料、調合、養生方法、材令などは、以下のとおりである。

1) 使用材料：普通ポルトランドセメント、川砂、川砂利(一部砕石使用)。2) 水セメント比：50~70%。3) 粗骨材最大寸法：15~25mm。4) 単位セメント量：250~430kg/m³。5) 単位粗骨材容積：300~450ℓ/m³。6) 養生方法：標準水中養生および空中養生(ただし、材令4週以降は空中養生のみ)。7) 材令：7日~1年。

2.2 試験体の形状・寸法

1) 反発硬度・音速測定用：10×10×20cm, 15×15×30cm, 15×15×15cm。2) 圧縮強度測定用：Φ10×20cm。

2.3 測定方法

1) 反発硬度：N型またはNR型シュミットハンマー使用(打撃時の試験体拘束圧は、通常8kg/cm²の一定としたが、一部の試験体については、拘束圧の影響についても検討した)。2) 音速：コンクリート用超音波伝搬速度測定装置(周波数50kHz)使用。3) 圧縮強度：JIS A 1108の規定に従って測定。

3. 強度推定の手順

上記の実験によって得られた結果並びに複合非破壊試験法に関するルーマニア指針⁴⁾などを参考にして、コンクリートの圧縮強度を以下の手順で推定する。

3.1 基準コンクリートの強度推定式

ルーマニア指針と同様に、ある特定調合のコンクリートを基準コンクリートと設定し、基準コンクリートの強度推定式としては、次式を用いる⁸⁾⁹⁾。

$$F_c = 10.2(kR) + 223V_{pc} - 960 \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 F_c ：圧縮強度(kg/cm²)、 R ：反発硬度、 V_{pc} ：音速(km/s)、 k ：反発硬度の経年補正係数。

なお、本研究では、普通ポルトランドセメント、川砂および最大寸法20mmの川砂利を使用し、単位セメント量

を $300\text{kg}/\text{m}^3$ 、単位粗骨材容積を $390\ell/\text{m}^3$ としたコンクリートを基準コンクリートと設定した。

3.2 基準コンクリート以外のコンクリートの強度推定式

調合が既知で、かつ基準コンクリートと調合要因が異なるコンクリートの強度推定は、次の(2)式による。

$$F_c = C \{ 10.2 (kR) + 223 V_{pc} - 960 \} \quad (2)$$

ただし

$$C = C_\phi \cdot C_v \cdot C_k \cdot C_c \quad (3)$$

ここに、 C : 調合要因による補正係数、 C_ϕ : 粗骨材最大寸法による補正係数、 C_v : 単位粗骨材容積による補正係数、 C_k : 粗骨材種類による補正係数、 C_c : 単位セメント量による補正係数。

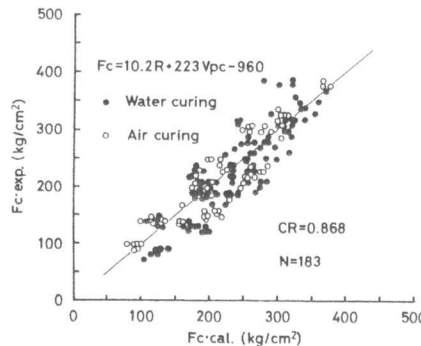


図-1 実測強度 ($F_c \cdot \text{exp.}$) と推定強度 ($F_c \cdot \text{cal.}$)

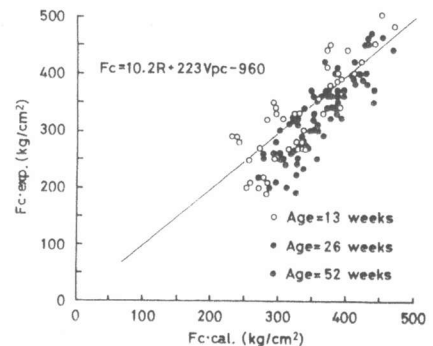


図-2 実測強度 ($F_c \cdot \text{exp.}$) と推定強度 ($F_c \cdot \text{cal.}$) と

4. 各種補正係数の決定

4.1 経年補正係数 (k) の決定

図-1は、材令4週に至るまでのコンクリートの実測強度 ($F_c \cdot \text{exp.}$) と、 $k=1.0$ とした場合の(1)式による推定強度 ($F_c \cdot \text{cal.}$) とを比較したものである。図によれば、材令が4週に至るまでの比較的若材令のコンクリートの圧縮強度は、養生方法にかかわらず(1)式によってほぼ推定することができる。一方、図-2は、材令13週~1年の比較的長期材令下にあるコンクリートの実測強度 ($F_c \cdot \text{exp.}$) と、 $k=1.0$ とした場合の(1)式による推定強度 ($F_c \cdot \text{cal.}$) との比較を示しているが、材令26週以降については、推定値は実測値を上廻っている。そこで、推定値を実測値に一致させるための k の値を求めると、各材令ごとに図-3のような頻度分布図が得られる。図-3から明らかのように、 k の値は、材令13週 (3ヶ月) から26週 (6ヶ月) に至る範囲で減少するが、26週以後は0.90のはほぼ一定となる。そのため、本研究では、材令13週までは $k=1.0$ 、材令26週以降は $k=0.9$ を採用し、13週と26週の間は、線形補間によって求める方法を用いることとした。なお、材令1年以上については現在実験を続行中であり、次の機会に改めて報告する。

との比較 (材令4週以下)

との比較 (経年補正前)

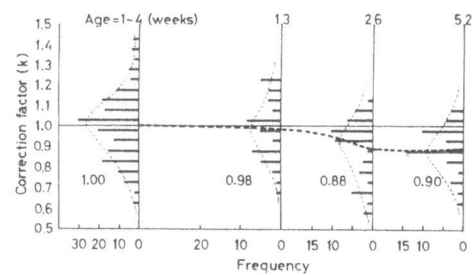


図-3 反発硬度の経年補正係数 (k) の頻度分布図

図-4は、材令13週以後のコンクリート強度の実測値 ($F_c \cdot \text{exp.}$) と、上述の k の値を(1)式中に代入して求めた推定値 ($F_c \cdot \text{cal.}$) とを比較したものであるが、両者間の相関は、図-2に比べてかなり改善されている。

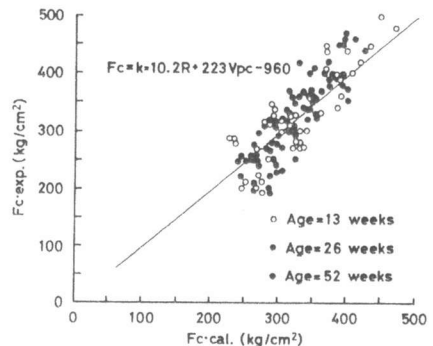


図-4 実測強度 ($F_c \cdot \text{exp.}$) と推定強度 ($F_c \cdot \text{cal.}$)

4.2 調合要因による補正係数 (C) の決定

図-5は、粗骨材の最大寸法、単位セメント量、単位粗骨材量などを広範囲に変化させたコンクリートの材令28日における実験結果であり、縦軸は実測強度 ($F_c \cdot \text{exp.}$) を、また横軸は(1)式による推定強度 ($F_c \cdot \text{cal.}$) を示している。上述のように、この実験に用いたコンクリートは、各種調合要因を広範囲に変化させているため、前掲の図-1の結果と比べて、実験値にかなりのばらつきがみられる。そのため、(2)式を用いて推定強度の補正を行うことにした。

との比較 (経年補正後)

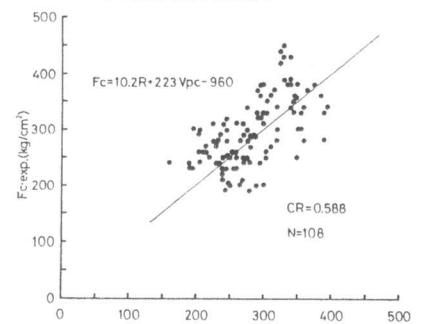


図-5 実測強度 ($F_c \cdot \text{exp.}$) と(1)式による推定強度 ($F_c \cdot \text{cal.}$) との比較

図-6, 7, 8 および 9 は、(3)式で表わされる補正係数 (C) の値を、各

要因ごとの頻度分布で示したものである。図-6および7によれば、粗骨材の最大寸法(ϕ)および単位粗骨材容積(V_a/V_c)が増大するほど、 C の値は小さくなっている。これは、水セメント比が同じ場合は、粗骨材の最大寸法および単位容積が大きいほど、音速は増大するが、強度は逆に減少する⁵⁾ことに起因すると考えられる。また、単位セメント量の影響については、実験値のばらつきが大きいので、あまり明確ではないが、補正係数は単位セメント量の増加とともにわずかに増大する傾向を示した。

次に、(3)式を対数変換した後に重回帰分析を行って各要因ごとの補正係数値(C_i)を求めた。各要因の特定値に対する C_i の値の計算結果を表-1に示す。また、図-10は、強度補正後の推定値($F_c\text{-cal.}$)と実測値($F_c\text{-exp.}$)との関係を示したものであり、図-11(a)および(b)は、それぞれ強度補正前と補正後のコンクリート強度の推定誤差をヒストグラムによって評価したものであるが、(2)式を用いた場合の強度推定精度が格段に向上することがわかる。

なお、本報と類似の強度推定法は、既にLacázar⁴⁾、Cianfrone¹⁰⁾、Bellander¹¹⁾など、主としてヨーロッパ諸国の研究者によって報告されている。圧縮強度測定用供試体の形状・寸法の相違などのため、これらの各研究者による強度推定式と本推定式とを直ちに比較することはできないが、傾向としてはほぼ一致しているといえる。

5. 強度推定式の適用例

5.1 柱状コンクリート試験体の強度分布の推定

本報で提案した強度推定式の適用性について調べるために、断面寸法 $20 \times 20\text{cm}$ 、打込み高さ 160cm の柱状コンクリート試験体を縦打ちによって製作し、強度推定実験を行った。試験体の製作には、普通セメント、川砂および最大寸法 15mm の川砂利を使用し、単位セメント量を 334kg/m^3 、単位粗骨材容積を 390 l/m^3 とした。試験体は材令7日目に脱型後空中養生を行い、材令28日に実験に供した。(2)式による強度

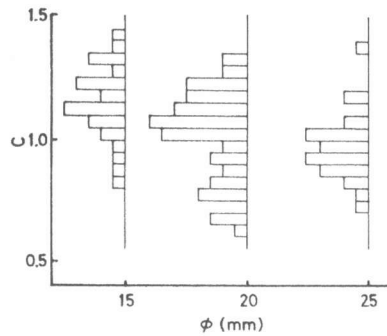


図-6 粗骨材最大寸法(ϕ)と補正係数(C)との関係

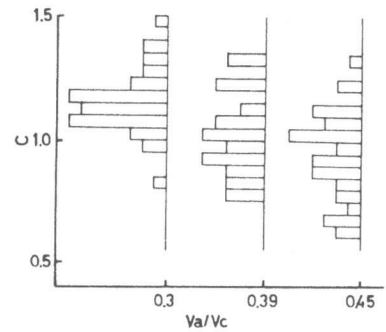


図-7 単位粗骨材容積(V_a/V_c)と補正係数(C)との関係

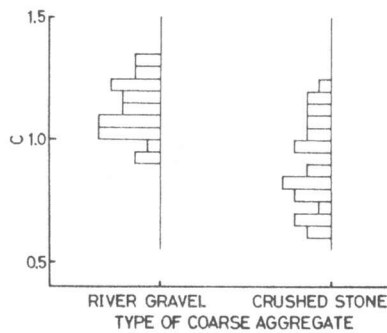


図-8 粗骨材種類と補正係数(C)との関係

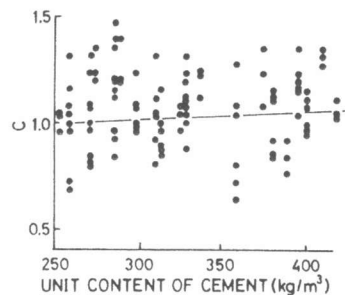


図-9 単位セメント量と補正係数(C)との関係

表-1 調査補正係数(C_i)

V_a/V_c	C_v	Type of coarse aggregate	C_k
0.30	1.142	River gravel	1.000
0.35	1.058	Crushed stone	0.846
0.40	0.988		
0.45	0.929		

Maximum size of aggregate (mm)	C_ϕ	Unit content of cement (kg/m^3)	C_c
15	1.098	200	1.044
20	1.000	300	1.000
25	0.931	400	0.980
30	0.877	500	0.960

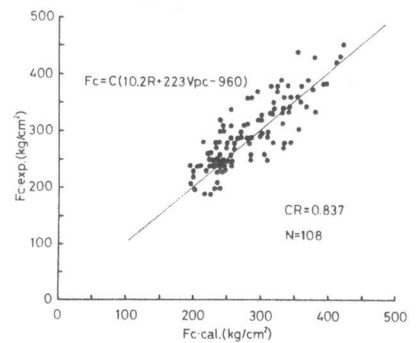
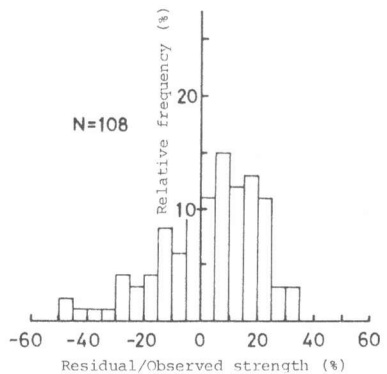
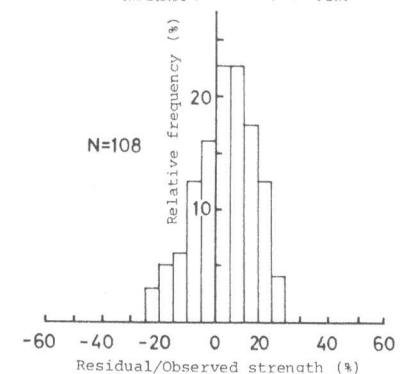


図-10 実測強度($F_c\text{-exp.}$)と(2)式による推定強度($F_c\text{-cal.}$)との比較



(a) (1)式による場合



(b) (2)式による場合

図-11 強度推定誤差

推定結果と抜取りコアによる圧縮強度試験結果を表-2および図-12に示す。この実験に用いたコンクリートについて、(3)式の補正係数(C)の値を求めると、次のようになる。

$$C = 1.096 \times 1.070 \times 0.990 \times 1.0 \approx 1.16$$

図-12から明らかなように、(2)式によるコンクリート強度の推定値は、コアによる圧縮強度とかなりよく一致している。

5.2 材令48年を経過したRC建物のコンクリート強度の推定

表-3は、材令48年を経過したRC建物のコンクリート強度に関する調査結果である。コンクリートの調合要因等が不明であったため、強度推定に際しては調合補正係数(C)を1.0とした。また、本報で提案した経年補正係数(k)の値は、材令7年までの結果に基づくものであるため、本建物のような長期材令下のコンクリートへの適用性については十分確認されていない。そのため、ここでは取りあえずk=1.0とした場合の(1)式による強度推定値を表-3中に示した。表-3によれば、推定強度は実測強度と比較的良好な相関を有するともいえるが、長期材令下のコンクリートの強度推定に関しては、今後さらに適用例を増して詳細に検討する必要がある。

6. 結論

本研究によって得られた結果は、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 普通ポルトランドセメント、川砂および最大寸法20mmの川砂利を使用し、単位セメント量を300kg/m³、単位粗骨材容積を390ℓ/m³としたコンクリートを基準コンクリートと設定した場合、基準コンクリートの圧縮強度は、(1)式によってほぼ推定できる。
- 2) (1)式中の反発硬度の経年補正係数(k)の値として、材令3ヶ月までのコンクリートについてはk=1.0、材令6ヶ月以降のコンクリートについてはk=0.9という値が得られた。
- 3) 調合が既知で、かつ基準コンクリートと調合要因が異なるコンクリートについては、(3)式で表わされる補正係数(C)を用いて推定強度の補正を行うと、推定精度は格段に向上する。各要因ごとの補正係数として、表-1に示す各値が得られた。

〔引用文献〕1) RILEM CNDT Committee, "RILEM Tentative Recommendations for In-situ Concrete Strength Determination by Non-Destructive Combined Methods (Second draft)", May 1981. 2) 谷川・小阪, コンクリート工学, Vol. 18, No. 1, 昭55.1, pp. 38-50. 3) Malhotra, V.M., "Testing Hardened Concrete: Non-destructive Methods," ACI Monograph, No. 9, 1976, 188pp. 4) Fácáoaru, I., I.C.F. Symp. on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber, London, June 1969, pp. 37-49. 5) Tanigawa, Y., K. Yamada and Y. Kosaka, Trans. of JCI, Vol. 1, 1979, pp. 79-86. 6) Tanigawa, Y., K. Yamada, S. Kumagai, and Y. Kosaka, Trans. of JCI, Vol. 2, 1980, pp. 163-170. 7) Tanigawa, Y., Y. Kosaka, K. Yamada and S. Kumagai, Trans. of JCI, Vol. 3, 1981, pp. 199-206. 8) Tanigawa, Y., K. Yamada and S. Kumagai, Proc. of 25th Japan Cong. on Mate. Res., 1982 (in press). 9) 阪・谷川・山田・熊谷, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第20号, 昭56.2, pp. 9-12. 10) Cianfrone, F., and I. Fácáoaru, Matériaux et Constructions, Vol. 12, No. 71, Sept.-Oct. 1979, pp. 413-424. 11) Bellander, U., RILEM Symp. on Quality Control of Concrete Structures, June 1979, Stockholm, Sweden, Vol. 1, pp. 37-45.

表-2 柱状コンクリート試験体に関する実験結果

H	ρ	R	Vpc	eFc	cFc	cFc/eFc
157.0	2.20	34.0	3.77	302	263	0.872
149.5	-	34.1	3.87	-	290	-
142.0	2.20	33.8	3.86	302	285	0.945
134.5	-	34.0	3.84	-	283	-
127.0	2.19	33.6	3.85	277	278	1.004
119.5	-	33.5	3.85	-	277	-
112.0	2.19	33.1	3.86	276	277	1.005
104.5	-	33.0	3.84	-	270	-
97.0	2.19	32.6	3.84	290	265	0.914
89.5	-	32.7	3.83	-	265	-
82.0	2.17	32.9	3.83	277	267	0.964
74.5	-	33.3	3.86	-	279	-
67.0	2.19	33.9	3.91	296	298	1.008
59.5	-	33.3	3.89	-	286	-
52.0	2.22	33.6	3.94	309	305	0.986
44.5	-	33.4	3.94	-	301	-
37.0	2.22	33.8	3.95	310	307	0.991
29.5	-	35.6	3.95	-	328	-
22.0	2.22	36.2	3.96	332	338	1.018
14.5	-	35.4	3.99	-	337	-
7.0	2.23	37.1	4.12	374	391	1.046
Average	2.20	33.9	3.88	304	292	0.961

[Notes] H: Height of measuring point (cm), ρ: Specific gravity, R: Rebound number, Vpc: Pulse velocity (km/sec), eFc: Measured strength (kg/cm²), cFc: Calculated strength (kg/cm²).

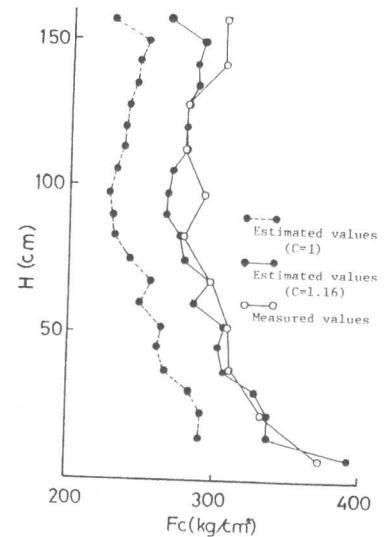


図-12 打込み高さ方向の強度分布の実測値と推定値との比較

表-3 RC建物の強度調査結果

Members	ρ	R	Vpc	eFc	cFc	cFc/eFc
Slab	2.22	39.6	3.31	169	182	1.077
	2.18	39.6	3.70	191	269	1.408
	2.16	34.3	3.49	157	168	1.070
	2.24	36.4	3.45	148	181	1.223
	2.20	36.8	3.38	136	169	1.243
	2.28	35.6	3.62	163	210	1.288
	2.21	40.4	3.70	234	277	1.184
	2.34	37.5	3.29	193	156	0.808
	Average	2.23	37.5	3.49	174	202
Beam	2.10	33.5	3.10	84	73	0.869
	2.17	36.5	3.07	115	97	0.843
	2.17	36.9	3.22	105	134	1.276
	2.23	30.9	3.19	121	67	0.554
	2.15	36.2	3.12	97	105	1.082
	2.29	38.7	2.92	73	86	1.178
	2.15	35.7	3.03	114	80	0.702
2.15	35.7	3.07	119	89	0.748	
Average	2.18	35.5	3.09	104	91	0.907
Wall	2.23	33.6	3.00	72	52	0.722
	2.19	39.4	3.16	86	147	1.709
	2.23	35.4	2.95	92	59	0.641
	2.17	38.6	3.11	113	127	1.124
	2.11	36.9	2.85	88	52	0.591
Average	2.19	36.8	3.01	90	87	0.957

[Notes] ρ: Specific gravity, R: Rebound number, Vpc: Pulse velocity (km/sec), eFc: Compressive strength by core specimen (kgf/cm²), cFc: Calculated strength (kgf/cm²).