

7. 構造体コンクリートの強度管理に関する研究 (その2. 非破壊試験によるコンクリート強度推定式の提案)

立松 和彦

山崎 順二

要 旨

構造体コンクリートの強度管理を非破壊試験の結果を用いて推定する手法について検討するために、様々な調合による無筋コンクリートブロックを作製し、反発度法、超音波伝搬速度法の非破壊試験およびコア採取を実施した。

実験の結果、反発度あるいは超音波伝搬速度試験で単独にコンクリート強度を推定するよりも、反発度と超音波伝搬速度を複合させて推定したほうが、精度の高い結果を得られることが確認できた。本報告ではその実験経過を述べるとともに、単独法によるコンクリート強度の推定式および、反発度、超音波伝搬速度および水セメント比を変数とする複合法からコンクリート強度を推定できる式を提案した。

キーワード

複合法／反発度／超音波伝搬速度／コア強度／推定強度／管理用供試体強度

目 次

1. はじめに
2. 実験概要
3. 実験結果および考察
4. コンクリート強度推定式の提案
5. ま と め

7. STUDY ON STRENGTH CONTROL OF STRUCTURAL CONCRETE (PART 2. THE PROPOSAL OF ESTIMATING FORMULAS OF CONCRETE STRENGTH IN STRUCTURES)

Kazuhiko Tatematsu

Junji Yamasaki

Abstract

In order to investigate methods for estimating concrete strength in non-destructive testing, we cast many concrete block specimens by various mix proportion and carried out non-destructive testing, that is Schmidt hammer rebound tests and ultrasonic pulse velocity tests with Pundit equipment, and took concrete core specimens.

As a result of testing, it was confirmed that combined use of rebound and ultrasonic pulse velocity tests could enable much more accurate estimation of concrete strength than the use of one of the testing methods.

In addition, multiple regression analyses were made using the results of non-destructive testing as explanatory variables, and an equation was proposed for estimating concrete strength by combined testing, using rebound, ultrasonic pulse velocity and water-cement ratio as variables.

1. はじめに

構造物の耐久性や安全性を正確に評価するためには、構造体コンクリートの強度を精度良く推定することが必要とされる。推定のための方法として、これまで、構造体からコンクリートコアを採取して強度を確認する方法がとられてきた。しかし、構造物によってはコア採取が制限を受けたり不可能であったりすることがあり、一般的には、フレッシュコンクリートから供試体を作製し、標準、現場水中および現場封かん(管理材齢が28日以上)養生などをした管理用供試体での圧縮試験結果や、反発度、超音波伝搬速度およびそれらの複合による非破壊試験結果から、構造体コンクリートの強度を推定する方法がとられている。

著者らは前報(その1)¹⁾で、管理用供試体強度とコア強度の関係について報告を行った。

引き続き本稿では、管理用供試体強度とコア強度との関連性、非破壊試験による推定強度とコア強度との関連性について分析した結果から、構造体コンクリート強度を精度良く推定できるコンクリートの強度推定式を提案するに至るまでの経過について述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体の作製および養生

試験体として、レディーミクストコンクリート工場で製造した普通コンクリートを用いて、非破壊試験およびコア採取に供する600×600×高さ900mmの無筋のコンクリートブロックを作製した。実験に使用したコ

ンクリートは、呼び強度21～40の、計13種類である。調査の概要および打設時期を表-1に示す。打設時期については、4～6月を標準期S、7～8月を暑中期H、9～11月を中間期A、12～3月を冬期Wとした。コンクリートに使用した材料は、セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は最大寸法20mmの砕石(高槻産、実績率58%)、細骨材には山砂(城陽産)と砕砂(高槻産)を7:3もしくは8:2の比率で混合したものである。

表-1 コンクリートの種類

配 合 名	配 合 の 概 要				打設 時期
	W/C %	s/a %	W kg/m ³	C kg/m ³	
21-15-20N	60.0	45.6	179	298	H
24-12-20N	55.0	44.9	172	313	A
24-15-20N	55.0	44.9	179	325	H
24-18-20N	55.0	46.1	189	344	A
30-18-20N	47.0	43.8	194	413	W
30-18-20N	47.0	43.8	194	413	W
35-18-20N(SP)	41.0	44.0	180	439	H
40-18-20N(SP)	35.0	41.5	180	514	S
40-18-20N(SP)	35.0	41.5	180	514	H
40-18-20N	35.0	33.5	219	626	A
40-18-20N(SP)	35.0	41.5	180	514	A
40-18-20N(SP)	38.0	42.9	180	474	W
40-18-20N(SP)	35.0	41.5	180	514	W

SP：高性能AE減水剤使用

表-2 コンクリートの試験結果

配 合 名	フレッシュ試験結果			圧縮強度 , kgf/cm ²								
	スランプ cm	空気量 %	コン温度 ℃	標準養生			封かん養生			コンクリートコア		
				1 W	2 W	4 W	4 W	8 W	13W	4 W	8 W	13W
21-15-20N	13.0	5.1	30.5	160	210	246	230	237	235	212	228	233
24-12-20N	15.5	6.1	17.5	188	241	275	234	278	272	237	263	275
24-15-20N	10.5	4.9	32.4	243	294	325	275	298	308	282	285	296
24-18-20N	21.5	4.3	28.5	172	217	232	236	261	284	233	262	277
30-18-20N	19.6	5.3	13.0	241	292	337	271	313	329	300	314	343
30-18-20N	17.8	5.1	10.5	309	368	420	312	373	410	348	398	437
35-18-20N(SP)	18.0	3.7	36.0	284	349	390	362	388	388	311	333	363
40-18-20N(SP)	16.5	3.9	27.0	364	426	489	444	488	517	442	482	524
40-18-20N(SP)	13.0	3.9	35.0	475	539	593	481	519	495	474	490	510
40-18-20N	14.0	5.8	31.0	316	381	411	371	390	390	383	409	429
40-18-20N(SP)	19.5	7.2	17.5	297	358	413	367	411	438	374	426	430
40-18-20N(SP)	21.5	5.2	19.5	293	363	426	349	381	436	351	388	436
40-18-20N(SP)	19.5	5.3	13.0	360	439	442	361	429	453	415	470	504

コンクリートブロックは、棒状パイプレータを用いて十分に締固めを行いながら打設し、材齢約2週間で脱型した。その後、所定の試験材齢まで気中養生を行った。コンクリートブロックの打設と同時に、直径10cm×長さ20cmの管理用供試体を作製した。管理用供試体の養生は、標準養生(材齢1・2・4週)および現場封かん養生(材齢4・8・13週)とした。

2.2 非破壊試験およびコア採取方法

材齢4・8・13週において、シュミットハンマーによる反発度およびパンジットによる超音波伝搬速度をコンクリートブロック側面の上下2ヶ所で測定した。測定方法は、「コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル」²⁾に準じた。その後、同じ位置で直径100mm×長さ600mmのコンクリートコアを採取した。上下2ヶ所で採取したコアは、それぞれを3等分し、直径10cm×高さ約20cmの圧縮強度試験用の供試体(コア供試体)を作製した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの試験結果

表-2に、フレッシュコンクリートの試験結果を示す。同表に、管理用供試体強度およびコア強度の試験結果を併記する。

フレッシュコンクリートの試験は全車荷卸し時点で行った。フレッシュ性状については、スランプが管理基準値を外れたものがあるが、極端に状態の悪いものはなかった。

3.2 コア強度と強度管理用供試体の関係

材齢4週および13週のコア強度と管理用供試体強度との関係を図-1に示す。図中の点線は、コア強度と管理用供試体強度との等値線である。また表-3に、それらの関係について単回帰分析を行った結果を示す。

材齢4週コア強度は、材齢2週標準養生強度との間に高い相関が得られ、かつ、材齢4週コア強度の値は、その値と良く一致した。

材齢13週コア強度については、材齢13週封かん養生供試体強度との間に上記と同様の関係があった。

3.3 管理用供試体を用いた構造体コンクリート強度の推定

構造体コンクリートの強度は、通常、材齢13週のコア強度を用いて評価される。その代用として、管理用供試体を用いて構造体コンクリートの強度を推定する場合は、構造体コンクリート強度をやや安全側に評価

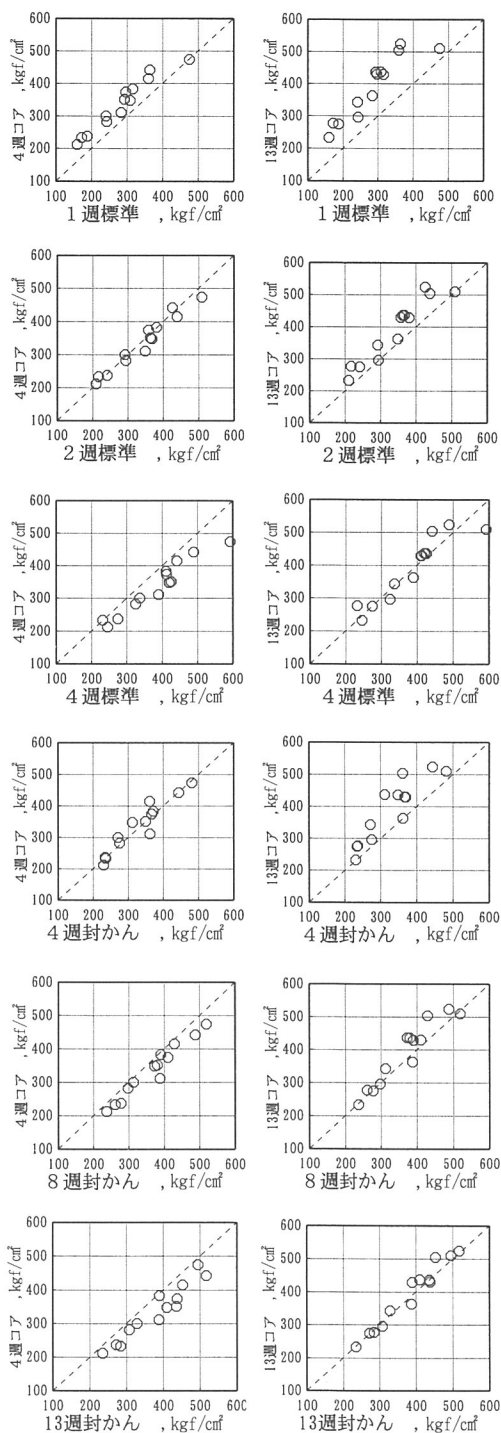


図-1 コア強度と管理用供試体強度との相関散布図

し、かつ、管理用供試体強度と構造体コンクリート強度との差が少ない（両者の関係が等値線上にある）ものが望まれる。

図－1 に示す相関散布図から、材齢2週標準養生強度および材齢4週封かん養生強度と材齢13週コア強度との関係が、これらの条件をほぼ満たしていると考えられる。表－3 に示す単回帰分析の結果から、材齢13週コア強度と材齢2週標準養生強度との相関係数は $r = 0.953$ 、標準誤差は $\varepsilon = 31 \text{ kgf/cm}^2$ であり、前者の強度が後者の強度を下回る確率は $P = 6.9\%$ であった。同様に材齢13週コア強度と材齢4週封かん養生強度との場合は、 $r = 0.902$ 、 $\varepsilon = 44 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $P = 9.3\%$ となった。材齢4週封かん養生強度を用いた場合は標準誤差がやや大きくなるが、これらの供試体を用いることによって、材齢13週コア強度すなわち構造体コンクリート強度を的確に評価できる。

これより、本実験の範囲内のコンクリートについては、構造体コンクリート強度の推定値として、材齢2週標準養生もしくは材齢4週封かん養生供試体の強度を用いることが可能と考えられる。

3.4 既往の強度推定式の検証

(1) 反発度法による推定強度

シュミットハンマーによって得られた反発度からコンクリートの強度を推定する方法としては、(1)式の日本材料学会の推定式、(2)式の日本建築学会の推定式を用いる方法がある。

$$\text{材料学会式：} F_c = 13R - 184 \quad \dots (1)$$

$$\text{建築学会式：} F_c = 7.3R + 100 \quad \dots (2)$$

F_c ：推定強度(kgf/cm^2)、 R ：反発度

今回の実験で得られた反発度を(1)式に代入して得られた推定強度とコア強度の関係を図－2 に示す。推定強度は、全体的にコア強度よりも小さくなり、高強度になるほどその傾向が顕著になった。これより(1)式を用いて圧縮強度を推定する場合は、構造体コンクリート強度を安全側に評価することになる。

表－3 コア強度と管理用供試体の単回帰分析結果

従属変数 Y	独立変数 X	相関係数 r	回帰式	Yの標準誤差 ε , kgf/cm^2
4週コア	1週標準	0.970	$Y = 0.915X + 75.0$	20.9
4週コア	2週標準	0.973	$Y = 0.850X + 42.7$	20.0
4週コア	4週標準	0.966	$Y = 0.786X + 33.2$	22.3
4週コア	4週封かん	0.950	$Y = 0.981X + 11.5$	26.8
4週コア	8週封かん	0.976	$Y = 0.935X - 7.32$	18.6
4週コア	13週封かん	0.960	$Y = 0.890X - 3.55$	24.0
13週コア	1週標準	0.924	$Y = 1.038X + 93.3$	39.2
13週コア	2週標準	0.953	$Y = 1.047X + 30.8$	31.1
13週コア	4週標準	0.931	$Y = 0.903X + 41.8$	37.4
13週コア	4週封かん	0.902	$Y = 1.110X + 22.3$	44.1
13週コア	8週封かん	0.953	$Y = 1.087X - 9.61$	31.1
13週コア	13週封かん	0.979	$Y = 1.080X - 22.8$	20.9

同様に、(2)式から得られた推定強度とコア強度の関係を図－3 に示す。(2)式はコンクリートの圧縮強度が約 350 kgf/cm^2 以下の場合は危険側に、それ以上の場合は安全側に構造体コンクリート強度を評価した。(2)式は(1)式よりも回帰直線の傾きが大きく、コア強度の変動に対して推定強度の増減が小さくなるため、実用的とは言えない。

(2) 超音波伝搬速度法による推定強度

パンジットによる超音波伝搬速度からコンクリートの強度を推定する方法としては、日本建築学会の共同実験結果から提案された(3)式を用いる方法がある。

$$\text{建築学会式：} F_c = 215V_p - 620 \quad \dots (3)$$

F_c ：推定強度(kgf/cm^2)、 V_p ：音速(km/s)

(3)式から推定した強度とコア強度との関係を図－4 に示す。(3)式は(1)式と同様の傾向であり、コア強度が大きくなるほど構造体コンクリート強度を安全側に評価した。単回帰分析の結果、推定強度とコア強度の相関係数は $r = 0.879$ であり、反発度もしくは超音波伝搬速度による単独法の中では最も相関係数が高く、標準誤差 ε も小さくなった。

(3) 反発度と超音波伝搬速度の複合法による推定強度

複合法によるコンクリート強度の推定方法としては、日本建築学会の共同実験結果から提案された(4)式を用いる方法がある。複合法による推定強度とコア強度の関係を図－5 に示す。

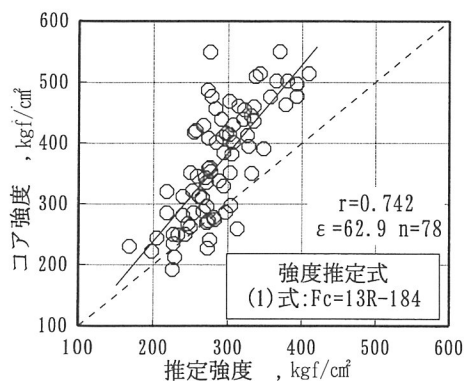


図-2 反発度法による推定強度とコア強度((1)式)

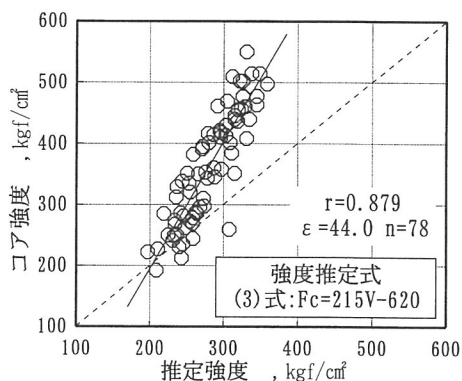


図-4 音速法による推定強度とコア強度((3)式)

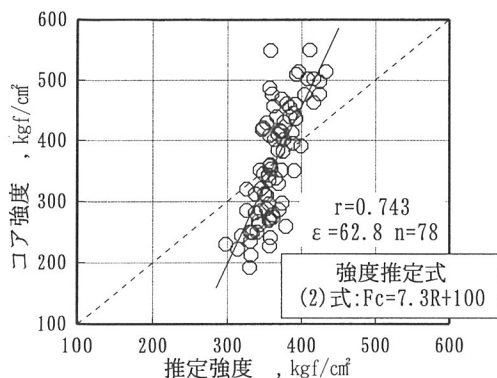


図-3 反発度法による推定強度とコア強度((2)式)

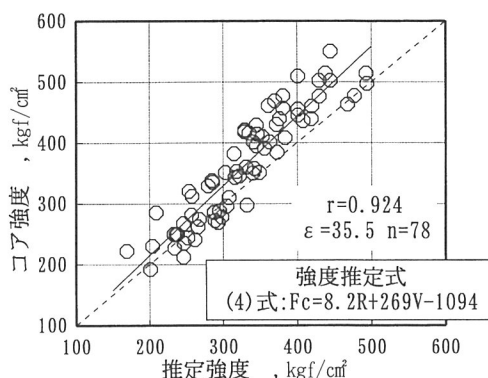


図-5 複合法による推定強度とコア強度((4)式)

建築学会式： $F_c = 8.2R + 269V_p - 1094$ ・・・(4)

F_c ：推定強度(kgf/cm²)、

R ：反発度、 V_p ：音速(km/s)

複合法を用いた場合は、反発度もしくは超音波伝搬速度を単独で用いた場合よりも相関係数が向上した。(4)式による推定強度は、コア強度が大きくなるほど構造体コンクリートをやや安全側に評価する傾向にあるが、コア強度の値と比較的よく一致していると考えられる。これらの相関係数は $r=0.924$ であり、今回の実験の範囲においては、(4)式がほぼ良好な強度推定精度を示した。

4. コンクリート強度推定式の提案

4.1 単独法：反発度・超音波伝搬速度についての分析

図-6にコア強度とシュミットハンマーによる反発度との相関散布図を示す。データ数 $n=78$ 個の単回帰

分析の結果、相関係数 $r=0.785$ となった。同図中に既往の推定式(1)式および(2)式を併記した。両式とも、コア強度が、350kgf/cm²程度までは比較的近似した値を示しているが、それ以上は推定誤差が大きくなった。

図-7にコア強度とパンジットによる超音波伝搬速度の相関散布図を示す。同様に分析した結果、相関係数が $r=0.879$ となり、やや良好な関係が得られた。図中に既往の推定式(3)式を併記したが、高強度になるほど推定誤差が大きくなった。

表-4に、コア強度と反発度および超音波伝搬速度法との単回帰分析結果を示す。本実験結果から得られた回帰式は、以下の2式である。

反発度 R ： $Y = 19.2R - 336$

音速 V ： $Y = 447V - 1512$

Y ：推定強度(kgf/cm²)

R ：反発度、 V ：超音波伝搬速度

表中に既往の推定式(1)、(2)および(3)式を併記した。実験結果から得られた回帰式は、相関係数から判断して、既往の強度推定式と同等以上の強度推定精度を有するものである。よってこれら2つの回帰式を、本実験の強度範囲のコンクリートを用いた場合の、構造体コンクリートの反発度および超音波伝搬速度の単独法による強度推定式として提案する。

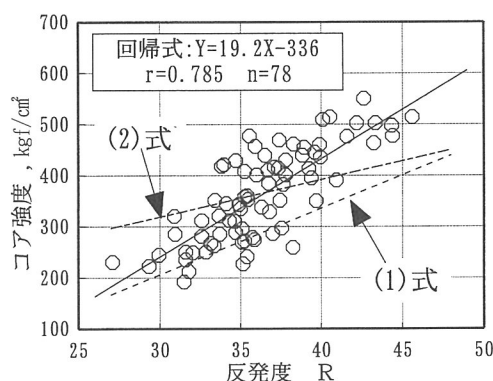


図-6 反発度とコア強度の相関散布図

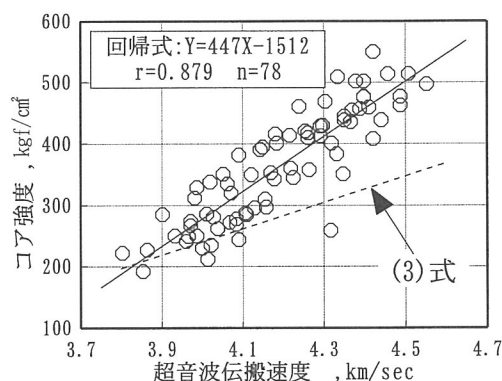


図-7 超音波伝搬速度とコア強度の相関散布図

表-4 非破壊試験結果とコア強度との単回帰分析結果

説明変数 X	相関係数 r	回 帰 式	Yの標準誤差 ϵ , kgf/cm ²
反発度	0.785	$Y = 19.22X - 336.4$	56.8
音速	0.879	$Y = 447.4X - 1512$	44.0
反発度	0.710	(1)式 $Y = 13X - 184$	—
反発度	—	(2)式 $Y = 7.3X + 100$	—
音速	0.457	(3)式 $Y = 215X - 620$	—

4.2 複合法についての分析

反発度および超音波伝搬速度を主たる説明変数として、その他水セメント比、材齢1週標準養生強度および材齢4週標準養生強度を変数として加えて、重回帰分析を行った。表-5に分析結果の一覧を示す。表中に、既往の推定式(4)式を併記した。

表-5より、強度の推定値のばらつきの範囲を標準偏差の2倍と考えると、表に示した回帰式の推定強度の誤差範囲は41kgf/cm²~70kgf/cm²であり、この誤差範囲は、反発度や超音波伝搬速度による単独法の約55%となる。

重回帰分析から得られた回帰式による強度推定精度の例として、(A)式および(C)式における推定強度とコア強度の関係を図-8および図-9に、それぞれの回帰式を以下に示す。

$$Y = 7.56R + 343V - 1348 \quad \dots (A)式$$

$$Y = 4.90R + 222V - 4.32W/C - 553 \quad \dots (C)式$$

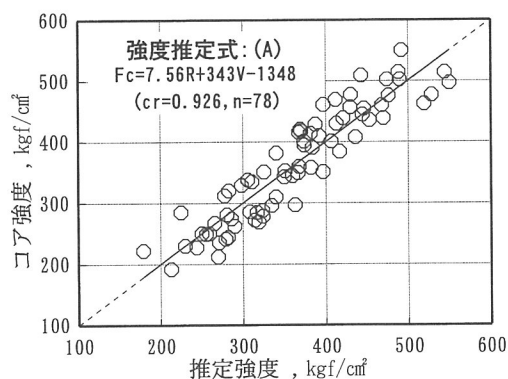


図-8 (A)式による推定強度とコア強度の関係

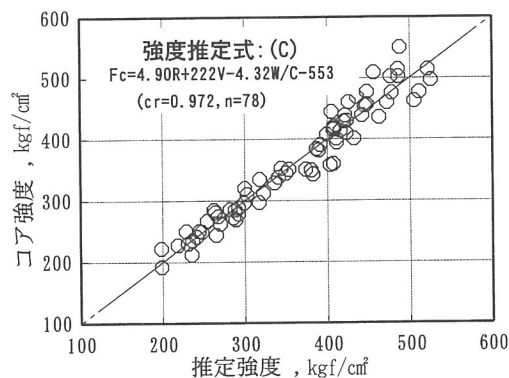


図-9 (B)式による推定強度とコア強度の関係

表－5 圧縮強度推定式の重回帰分析結果

式	回 帰 係 数					定 数 C	重相関係数 cr	標準誤差 ε kgf/cm ²
	K1(R) 反発度	K2(V) 音速 km/sec	K3(W/C) 水セメント比 %	K4($\sigma 7$) 標準 1 週 kgf/cm ²	K5($\sigma 28$) 標準 4 週 kgf/cm ²			
(A)	7.564	343.2				－1348	0.926	35.1
(B)	9.627		－6.202			289.4	0.934	33.2
(C)	4.901	222.3	－4.322			－553.2	0.972	21.8
(D)	4.992	226.5		0.3994		－877.9	0.939	31.8
(E)	5.094	231.1			0.3255	－912.4	0.937	32.4
(F)	5.413	245.6	－4.774	－0.1227		－614.6	0.973	21.5
(G)	6.056	274.7	－5.341		－0.2348	－682.9	0.975	20.6
(H)	5.998	272.1	－5.290	－0.1359	－0.1091	－679.0	0.974	21.2
(4)	8.19	268.8				－1093.9	0.909	－

回帰式： $F_c = K1 \times R + K2 \times V + K3 \times W/C + K4 \times \sigma 7 + K5 \times \sigma 28 + C$

Y：推定強度(kgf/cm²)

R：シュミットハンマーによる反発度、

V：パンジットによる超音波伝搬速度(km/sec)、

W/C：水セメント比(%)

重回帰分析の結果から、反発度と超音波伝搬速度を複合した(A)式に、説明変数として水セメント比を加えた(C)式、さらに(C)式に標準養生強度を加えた(F)、(G)および(H)式は、(A)式と比較して強度推定精度が大幅に向上した。しかし(F)、(G)および(H)式の実回帰式を実際に使用する場合、標準養生強度を説明変数として取り入れることは困難な場合が多いと考えられる。そこで、説明変数として反発度と超音波伝搬速度を取り入れた(A)式、もしくは(A)式に水セメント比を加えた(C)式は、(4)式と同等もしくはそれ以上の推定精度を有し、説明変数の面からも汎用的かつ実用的であると考えられる。

これより、(A)式および(C)式を、本実験の強度範囲のコンクリートを使用した場合の、構造体コンクリートの複合法による強度推定式として提案する。

5. ま と め

非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定に関して実験的検討および回帰分析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 構造体コンクリートの強度管理基準値として、材齢 2 週の標準養生強度もしくは材齢 4 週封かん養生強度を用いることが可能である。

- 2) 反発度もしくは超音波伝搬速度の単独法でコンクリート強度を推定するよりも、これらを複合させることによって、強度推定精度が大幅に向上する。
- 3) 本実験の結果から、以下の 4 式を、構造体コンクリートの強度推定式として提案する。

- I. 反発度法（単独法）：

$$F_c = 19.2R - 336$$

- II. 超音波伝搬速度法（単独法）：

$$F_c = 447V - 1512$$

- III. 複合 A 法（複合法）：

$$F_c = 7.56R + 343V - 1348$$

- IV. 複合 B 法（複合法）：

$$F_c = 4.90R + 222V - 4.32W/C - 553$$

ここで、

F_c ：推定強度(kgf/cm²)

R：シュミットハンマーによる反発度

V：パンジットによる超音波伝搬速度(km/sec)

W/C：水セメント比(%)

以上、本稿では、非破壊試験法による構造体コンクリート強度の推定式と推定誤差の範囲を明らかにした。これらの方法は、建築中の構造物の品質管理には十分対応できる。今後、長期材齢を経た構造物を想定した実験を行い、既存構造物の調査や診断に適用できるよう、推定式の汎用性を高めたい。

〔参考文献〕

- 1) 山崎・立松・福本、「構造体コンクリートの強度管理に関する研究(その1)」、浅沼組技術研究所報、No.6, pp.27-32, 1994
- 2) 日本建築学会、「コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル」、1983