実大モデルによる超音波法, 反発度法および複合法の検討

—非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法—

STUDIES ON ULTRA SONIC, REBOUND AND COMBINED METHODS
USING FULL SCALE MODEL STRUCTURES

—Estimation of strength of concrete in structures by non-destructive testing—

十代田知三*, 野崎喜嗣**, 小林幸一***

Tomozo SOSHIRODA, Yoshitsugu NOZAKI and Koichi KOBAYASHI

Full scale model structures with several mixes of concrete were used to study estimation of strength of concrete in structures by non-destructive testing. Estimation equations by rebound number method, pulse velocity method and combined method of rebound number and velocity were proposed.

Furthermore, supplement of parameters by the water cement ratio of concrete to equations decreased in estimation error. Ranges of dispersion of estimations, represented by two times of the standard deviation were approximately as follows : 80 kgf/cm² for rebound number method, 120 kgf/cm² for pulse velocity method, 74 kgf/cm² for combined method and 53 kgf/cm² for combined method with water cement ratio as an additional parameter.

Keywords : concrete in structure, non-destructive test, compressive strength, rebound number method, ultrasonic pulse velocity method, combined method

構造体コンクリート, 非破壊検査, 圧縮強度, 反発度法, 超音波伝播速度法, 複合法

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性や構造安全性の検討に際して, コンクリート自体の強度を把握することは極めて有効であり, 現在までに数多くの試みが行われてきた。それ等はコア供試体採取を前提とする場合が多いが, 構造物の条件によってはコア採取本数が制限され, 時には採取することすらも不可能とされる場合もあり, 非破壊試験への期待も増々大となってきた。コンクリートの強度推定を目的とした非破壊試験の試みは1930年代以降多くの検討例が報告されているが, 手軽さと推定精度および汎用性といった観点から, 現在利用されている代表的な方法としては反発度法と超音波伝播速度法が挙げられる。筆者らも幾つかの検討を行い, その結果を本学会等に報告してきた^{1)~13)}。強度推定の目的には, 反発度法が利用される場合が多く, 検討例の報告も多い。一方, 超音波法はコンクリートの内部状態の探査に適しているが, 強度推定の精度については, 反発度法に比較して高くないとする報告¹⁴⁾もある。しかし超音波法による強度

推定の精度は, 必ずしも反発度法に劣るわけではなく, 条件によっては, より高精度となる場合も少なくはないようである¹⁵⁾。超音波法を用いた構造体コンクリートの強度推定に関する検討は1940年代までさかのぼるが代表的な研究としてR. Jones¹⁶⁾, J.R. Leslie, W.J. Cheesman¹⁷⁾, E.A. Whitehurst¹⁸⁾, E. Kesler, Y. Higuchi¹⁹⁾らの報告が挙げられよう。

国内では奥島・小阪²⁰⁾, 近藤・明石²¹⁾, 亀田²²⁾らの報告中で, コンクリートの強度と超音波伝播速度との関連について検討されている。また, 1960年代には, 複数の方法の非破壊試験結果を組み合わせる強度推定を行う複合法(組合せ法)が検討され, その成果が報告されている。それ等はI. Faccaoru²³⁾, ルーマニア指針²⁴⁾および谷川²⁵⁾による超音波伝播速度法および反発度法の組み合わせについての報告が代表的と言えよう。

コンクリート中の超音波伝播速度と圧縮強度は理論的に直接的な関係はないが, 実験結果からおおよそ比例的な関係にあるということが経験的に分かっている, このこ

本報告の内容の一部は末尾の文献No.1)~13)として主に本学会等に発表済みであり, また一部分は, 本学会材料施工委員会[コンクリートの非破壊試験法研究小委員会]の活動として作成, 提出したものである。

* 芝浦工業大学 教授・工博

** 武蔵工業大学 講師・工修

*** セメント協会 研究員・工修

Prof., Shibaura Inst. of Tec., Dr. Eng.

Lecturer, Musashi Inst. of Tec., M. Eng.

The Cement Assn. of Japan, M. Eng.

とが強度推定が可能となる理由である。これは、超音波伝播速度は弾性係数とは密接な関係にありまた、一方では弾性係数と強度がおよその比例的な関係にあることなどがその背景である。すなわち強度に影響する要因と弾性係数および超音波伝播速度に及ぼす要因とが共通するものが多い故と考えられる。

コンクリートの圧縮強度は、現在では $1\,000\text{ kgf/cm}^2$ 以上程度まで分布し、一方超音波伝播速度は最大値は極限的には岩石のそれに等しく、およそ $5\,000\text{ m/sec}$ 程度である。すると両者の関係は強度の増加に対して伝播速度が一定となった曲線的となり、コンクリートの条件の範囲を大きくした関係式の例として、しばしば指数関数式で定義されることがある。しかしその関係は、コンクリート条件を狭い範囲に限定すると、およそ直線的となることから、適用範囲を明示した場合は一次式で示す場合も多い。他方、反発度法による強度推定について、坂は最小二乗法から2次式の回帰式を導いたが、 400 kgf/cm^2 を超える程度のコンクリートでも、反発度と強度はおよそ直線的であることを示している²⁶⁾。そこで、伝播速度および反発度を、説明変数として併せて用いれば上記の超音波法による場合の推定式で、直線からずれる場合もカバーできると考えられる。

しかし、これらの既往の報告で提案されている推定式は、コンクリート条件、実験条件が異なるために相互の比較検討による分析が出来にくいこと、およびそのほとんどが実験室実験であって小寸法の供試体から得られた強度推定式であり、実施構造物への適用に際しては幾つかの条件についての検討が必要となるといった問題が提起される。

本研究は、構造体コンクリートの非破壊試験による強度推定法の確立を目標とし、反発度法、超音波伝播速度法およびその両者の複合法の実務への適用について検討を行ったものである。筆者らは小寸法の供試体による実験室実験を行ってきたが、本報告はそれらを踏まえ、実用されている種々の条件のコンクリートについて実大寸法のモデル壁体を作成し、その非破壊試験値とコア供試体強度との関連を分析し、強度推定式の提案、変動の検討および現行の試験結果との比較をねらいとした。

2. 実験の条件および方法

2.1 実験の概要

実験は実施構造物を想定した条件の試験体を準備し、その非破壊試験およびコア採取による試験結果との比較・検討を主たる目的とした。試験体は、図-1にその1例を示すが、高さは実構造物の階高に近い寸法の壁状とし、その厚さは 300 mm とした。型枠は合板製で、打設は実験シリーズによってポンプまたはバケットを用いた。その後の時間経過は図-2の工程図に示すように約

28日間シート掛け・散水養生を行った。供試体は、打設時に採取した円柱供試体と、壁状試験体より採取したコア供試体で、それらに対して非破壊試験の後に圧縮強度試験を実施した。なお、実験シリーズの全体概要は表-1に示したとおりである。

2.2 使用材料、調合

実験は各種の条件のコンクリートを対象として4シリーズにわたって行ったが(表-1)、シリーズ1は主に流動化コンクリートの特徴の検討、シリーズ2は造殻混練コンクリート(2段階練りコンクリート)の特徴の検討および粗骨材の寸法の影響に関する検討、シリーズ3は軟練りコンクリートおよび高強度コンクリートの特徴の検討、シリーズ4は分離低減剤の添加効果の検討等各シリーズごとに特徴があり、それによって材料条件・調

表-1 各シリーズの特徴

シリーズ	壁体寸法 W X H X D mm	粗骨材 寸法 mm	調合上 の特徴	配筋条件	打設法	コア 数	試験 材令	コア 養生
1	2.4 X 2.4 X 0.3	20 mm	流動化	一部無筋 他ダブル	バケット	80本	49日	5日 水中
2	1.9 X 2.4 X 0.3	40	2段階 (SEC)	ダブル	ポンプ	60	42	7日 気中
3	2.2 X 2.4 X 0.3	40	高強度	シングル	バケット	80	37	7日 気中
4	2.2 X 2.4 X 0.3	25	分離 低減	シングル	バケット	45	31	3日 気中

図-1 モデル壁体寸法および各種測定位置(例)(シリーズ1, 2)

図-2 実験の実施工程(シリーズ1)

合条件はそれらの主旨に準じて決定している。

配筋は、主にひび割れ防止や破損防止が目的であって、実構造物とは条件が若干異なる。なお、コンクリートの使用材料、調合は各々表—2、3に示した。

2.3 実験項目および方法

測定項目、位置、試験項目およびその方法の概要は表—4に記載したとおりで、コンクリートは打ち込み時に各輸送車ごとにスランプ、空気量測定を行い標準供試体を採用して所定の養生・材令条件における超音波速度、JISに準ずる圧縮強度試験、吸水率測定を行った。試験壁体は打ち込み後所定の材令（およそ4週）までシート掛け・散水養生を行い、同表に示すように超音波伝播速度および反発度測定の実験を実施した。その後に、同壁体よりコア供試体を採用し室内気中または水中浸漬の所定の養生を行い、超音波速度および圧縮強度試験、吸水率試験を行った。また一部の供試体は断面観察、顕

表—4 試験項目、測定機器（特に記載無い項目は試験法は該当JISに準じた）

打 設 時	非破壊試験	コア供試体試験
スランプ値、空気量、ブリージング率、標準水中・現場水中供試体の音速・強度	反発硬度 音速	圧縮・引張強度 吸水率、密度、音速
超音波探傷器	CNS社製パンジット、 測定端子 54 KHz	
反発度ハンマー	PROCEQ社製テストハンマー NR-10 No.29357（'80購入）

写真—1 コンクリートの打ち込み（シリーズ1、バケットによる）

微鏡写真用として、別途の分析を行った。なお、主たる測定機器の名称、型式等を表—4に記した。また、モデル試験壁体へのコンクリートの打ち込み状況としてシリーズ1の場合で、バケットによる例を写真—1に示した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

実験結果の一覧を表—5、6に示す。表—5は使用したコンクリートの試験結果等を整理したものである。表中、圧縮強度は、コアおよび供試体ともに総平均で、各シリーズ内の結果については比較検討が可能であるが、材令その他主たる条件が異なるためにシリーズ間の比較にはいくつかの補正を含めて考える必要がある。一方、表—6は各シリーズの実験結果の一例としてシリーズ1の結果から、硬化後の試験体に対する非破壊試験および採取したコア供試体についての試験結果を高さ方向の位置ごとに集計した結果を示したもので、表中の値は各々2個～3個の試験値の平均値である。同表からは試験体間（調合条件間）の差は必ずしも明確には見られないが、位置による差（高さ方向）はかなり顕著な傾向があることが推定される。また同表で、超音波伝播速度および反発度は調合種別に余り影響を受けずに主に打ち込みの上下方向によって測定値が変化していることが観察されるが、一方コア供試体強度は、打ち込みの上下方向の要因のほかにも、調合による差が見られる。これはコンクリートの材質に対する、各特性値の敏感性を表しているものと

表—2 使用材料

シリーズ	AE剤	特殊混和剤	細骨材	粗骨材
1	リグニン スルホン 酸塩	スルホン酸 塩系高性能 減水剤	荒川+利 根川産川 砂 2.5mm ρ 2.55	荒川+栃 木産石 20mm ρ 2.65
2	天然樹脂 産塩系	ポリアルキ ルアルリ スルホン酸	大井川砂 5.0mm ρ 2.62	葛生産石 40mm ρ 2.69
3	リグニンス ルホン酸系	特殊分離低 減剤	酒匂川砂 5.0mm ρ 2.59	酒匂川砂 40mm ρ 2.63
4	天然樹脂系	特殊分離低 減剤	シリーズ3に同じ	

表—3 コンクリートの調合

シ リ ー ズ	略 号	種 類	W/C %	S/a %	単位水景 (kg/m ³)	AE剤 kg/m ³	流動化剤 l/m ³
1	N	標準	61.0	48.7	196	0.725	
	N'	Plain	68.6	49.0	221		
	B	ベース	61.0	48.7	175	0.725	
	F	流動化	61.0	48.7	175	0.725	0.35
	F'	流動化	61.0	48.7	175	0.725	0.45
2	N	普通軟練	62.3	45.1	188	0.107	
	N'	普通参考	58.6	42.9	172	0.105	
	B	ベース	60.5	45.5	169	0.100	
	S	造粒混練	60.6	45.3	172	0.100	
	F	流動化	59.1	45.7	164	0.100	1.045
	SF	造粒流動	61.9	45.1	173	0.100	1.435
3	N	普通軟練	57.0	44.8	189	0.830	
	C	分離低減	57.0	44.8	189	0.830	0.664
	Hh	高強軟練	37.5	38.2	188	1.335	
	Hm	高強中練	37.5	34.6	173	1.155	
4	N	普通軟練	57.0	44.7	190	0.167	
	C	分離低減	57.0	44.7	190	0.167	0.666
	C'	分離低減	57.0	44.7	190	0.167	0.999

表—5 コンクリートの試験結果

シリーズ	略号	種類	スランパ 値 cm	空気量 %	ブリージ ング率 *	圧縮強度 (kgf/cm ²)	
						コア	供試体
1	N	標準	21.0	3.9	1.01	239	255
	N'	Plain	21.0	1.2	1.46	204	201
	B	ベース	12.0	4.0	0.62	212	226
	F	流動化	21.0	4.4	0.89	247	239
	F'	流動化	23.5	4.2	0.82	223	219
2	N	普通軟線	18.0	4.1	0.63	310	268
	N'	普通参考	17.0	5.0	0.68	291	259
	B	ベース	10.0	5.4	0.66	334	298
	S	造設混練	7.5	3.6	0.18	342	320
	F	流動化	19.5	4.0	1.01	296	247
	SF	造設流動	18.5	4.5	0.24	323	298
3	N	普通軟線	19.0	3.9	0.44	268	288
	C	分離低減	16.0	4.1	0.06	238	268
	Hh	高強軟線	17.5	4.1	0.33	415	441
	Hn	高強中線	7.5	4.2	0.11	412	471
4	N	普通軟線	16.0	5.4	0.02	195	168
	C	分離低減	18.0	4.8	0.00	242	259
	C'	分離低減	20.0	3.0	0.00	209	229

注 養生法 シリーズ1: 現場水中(7W) 2: 標準水中(4W)
 3: 現場水中(6W) 4: 現場水中(5W) いずれも3個の平均
 * ブリージング総量/コンクリート容積 %

表—6 実験結果の例(シリーズ1)

略号	位置	反発度	伝播速度 km/s		密度	圧縮強度 kgf/cm ²
			* 1	* 2		
N	1	26.8	3.87	3.95	2.22	194
	2	28.6	3.97	4.01	2.25	230
	3	28.3	3.93	4.00	2.25	220
	4	28.4	4.05	4.08	2.24	224
	5	28.3	4.08	4.13	2.26	242
	6	30.9	4.35	4.41	2.30	324
N'	1	25.2	3.74	3.83	2.26	163
	2	26.8	3.79	3.90	2.25	174
	3	25.0	3.87	3.91	2.26	182
	4	24.8	3.92	3.97	2.27	197
	5	26.1	3.99	4.04	2.29	217
	6	28.4	4.20	4.20	2.32	283
B	1	28.9	3.78	3.91	2.18	164
	2	30.1	3.88	3.95	2.18	204
	3	29.8	3.89	3.97	2.20	197
	4	31.1	3.93	4.01	2.22	215
	5	30.7	3.93	2.98	2.21	223
	6	32.0	4.07	4.13	2.24	269
F	1	29.5	3.84	4.00	2.24	198
	2	29.8	3.96	4.05	2.24	216
	3	30.6	4.01	4.11	2.26	230
	4	31.6	4.06	4.14	2.25	252
	5	31.8	4.15	4.24	2.27	275
	6	33.2	4.25	4.32	2.29	314
F'	1	29.7	3.60	3.86	2.23	175
	2	29.7	3.80	3.92	2.23	209
	3	30.4	3.84	4.01	2.25	214
	4	30.0	3.87	4.03	2.27	224
	5	30.5	3.91	4.03	2.27	232
	6	32.5	3.98	4.20	2.29	288

注: * 1 モデル壁体測定値、* 2 コア測定値

考えられ、圧縮強度は各種の調査条件に敏感であると言える¹²⁾。

3.2 結果の分析

(1) 超音波伝播速度の現位置における測定値と採取したコアの測定値との関係

全シリーズの全データについて、モデル壁体における現位置の超音波伝播速度と採取したコアの速度との相関散布図を図—3に示した。図中、データが、およそ等速度線上に分布していることが分かる。そこで、各シリーズごとおよび全体について、両速度の差異について分散分析を行った結果、全体的には有意差は認められずに、両者は同一の母集団とみなし得ることが分かった。コア採取後の養生方法は表—1に記したが、各シリーズによって気中または水中浸漬であって、試験時の含水率には差があるが、結果としてはその原因が超音波伝播速度に及ぼす影響はごくわずかで、実用上は無視し得ると言えよう。モデル壁体とコアの測定値とが同等であると見なされる理由として以下が推定される。

a) 測定に使用した周波数は50 kHz、波長はおよそ80 mmであることから、 $\phi 150 \times 300$ mm (一部の供試体は $\phi 100 \times 200$ mm)の供試体は寸法的には音速に影響する限界値に対し十分に大きいと考えられる。

b) 既に指摘されているが^{27), 28)}、コンクリート中の含水分の超音波伝播速度に及ぼす影響は無視し得ない程度に大きい。しかし、乾燥後の吸水初期(水中浸漬の数日間程度)では供試体の断面のごく周辺部のみ吸水して、内部は未飽和状態であり、この程度の場合では、吸水の音速への影響が少ない故と考えられる。

c) なお、伝播速度の壁体の現位置における測定とコアの測定では材令が異なるが、予備実験からも材令4週以降ではほとんど伝播速度の伸びがないことが確認され、この傾向は他の報告でも指摘されている²⁸⁾。

(2) 伝播速度および反発度による圧縮強度の回帰式

全シリーズの全データについて、コア供試体強度と反

図—3 超音波伝播速度の現位置測定値と採取したコアの測定値との関係

図-4 反発硬度とコア強度の関係 (各シリーズおよびシリーズ 全体)

図-5 超音波伝播速度とコア強度の関係 (各シリーズおよびシリーズ全体)

発度との相関散布図、および超音波伝播速度との相関散布図を各々図-4, 5 に示した。両図ともに、各シリーズごと、および全体データの回帰直線とまた比較対象として、建築学会の共同実験による回帰直線を併せて記入したが、各シリーズによって若干の差が観察される。なお、回帰式は表-7 にその一覧を示した。

図-4 は反発度と強度の相関散布図で、4 シリーズ合計 255 個のデータを集計すると、 $r=0.839$ となり、やや密接な関係と言えよう。各シリーズ共におよそ 1 つの回帰線に沿って分布していると言えよう。なお、参考として同図中に、材料学会による推定式および建築学会共同実験式を併記したが、比較的近似した関係にある。

また、図-5 は伝播速度と強度の相関散布図で、シリーズ 1, 2, 4 は、ほぼ同一の集合として散布しているが、シリーズ 3 のみ離れた位置に分布していることが観察される。このシリーズは、圧縮強度が 450 kgf/cm^2 程度の比較的高強度コンクリートを対象とした実験であり、特に他のシリーズに比してモルタルマトリックス強度がやや大きいことが特徴で、骨材の種類および量に関しては

他とおおよそ同様と考えられる。コンクリートの高強度化は、主にモルタルマトリックスの性質の改善による場合が主であるのに対し、超音波伝播速度は一般的に粗骨材の石質や量の影響が大であると考えられることから、超音波伝播速度法に関しては上記の傾向が得られたものと説明される。すなわち高強度コンクリートと普通コンクリートでは超音波伝播速度法の適用の問題が今後の検討課題として提起されよう。なお、建築学会共同実験による回帰式²⁸⁾を同図中に示したが、シリーズ 1, 2, 4 および全体の回帰式と近似していると言える。

次に、各シリーズごとおよび全体について回帰分析を行い、その結果を一覧として表-7 に示した。同表には反発度による分析結果も併せて示したが、相関係数のカラムに見られるように、反発度法および超音波法は各シリーズによって数値がまちまちである。このことは実験条件によって、強度推定に反発度法が有利となる場合と超音波法のほうが有利となる場合があることを示唆している。全シリーズでみると、相関係数は超音波伝播速度では 0.596 、反発度の場合では 0.839 となった。

(3) 複合法についての分析

次に、反発度および超音波伝播速度を主たる説明変数として、その他水セメント比、スランプ、空気量等の調査条件、打ち込み深さ、材令等を変数として加えて、重回帰分析を行った。その結果を、表-8 に一覧表として

表-7 各シリーズごとの相関・回帰分析

シリーズ	説明変数	相関係数	回 帰 式
1	反発度	0.546	$F_c = 9.4 R - 50$
	伝播速度	0.864	$F_c = 226 V_p - 670$
2	反発度	0.577	$F_c = 8.7 R + 31$
	伝播速度	0.448	$F_c = 114 V_p - 200$
3	反発度	0.907	$F_c = 17.4 R - 263$
	伝播速度	0.668	$F_c = 336 V_p - 1080$
4	反発度	0.609	$F_c = 6.2 R + 61$
	伝播速度	0.686	$F_c = 180 V_p - 1058$
全シリーズ	反発度	0.839	$F_c = 14.0 R - 157$
	伝播速度	0.596	$F_c = 157 V_p - 367$
建築学会回帰式	反発度	0.710	$F_c = 7.3 R + 100$
	伝播速度	0.457	$F_c = 215 V_p - 620$

表—8 圧縮強度推定式の重回帰分析

回 帰 係 数										定数	相関係数
K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	C	CR
13.99										-156.9	0.839
	156.9									-366.6	0.596
11.38		-2.43								62.8	0.864
13.07			-2.11							-92.6	0.847
13.77				5.8						-173.9	0.842
13.79					518					-301.1	0.856
11.15						2.4				-141.6	0.874
10.75							1214			-504.7	0.898
13.76								8.61		-160.2	0.843
14.47									-2.86	-53.4	0.877
	163.5	-6.5								-21.3	0.914
	130.5		-4.9							-175.5	0.658
	151.9			6.2						-371.4	0.601
	211.9				1612					-1057	0.777
	87.2					4.0				-204.7	0.736
	103.3						1836			-824.3	0.798
	151.4							12.3		-358.9	0.607
	166.6								-2.8	-290.1	0.646
12.02	62.9									-351.9	0.864
5.15	121.4	-4.7								-110.4	0.933
11.47	58.8		-1.6							-291.8	0.868
11.97	60.8			3.1						-354.3	0.865
9.96	115.5				1070					-812.5	0.919
10.35	42.7					1.9				-276.9	0.884
9.40	50.4						1127			-636.2	0.913
11.91	60.9							6.2		-348.2	0.866
12.27	71.8								-3.1	-266.0	0.908
5.15	125.5	-4.9	0.7							-128.8	0.933
4.54	133.3	-5.2		-8.1						-78.1	0.938
5.93	133.3	-3.4			565					-419.2	0.942
5.13	113.4	-4.4				0.5				-105.6	0.934

説明変数

K1; 反発度 R

K2; 伝播速度 V_p
(km/sec)K3; 水セメント比
(%)K4; スランプ値
(cm)

K5; 空気量 (%)

K6; ペースト容積

K7; 粗骨材寸法
(mm)

K8; 粗骨材容積

K9; 打込み深さ
(m)

K10; 材令 (日)

C ; 定数項

示したが、上記の説明変数は K1~K10 として、その内容を表右欄に記した。表中の数値は対応する変数についての回帰係数で、定数項は右の [C] カラムに記し、さらに重相関係数を表の最右カラム CR 項に記した。同表から、反発度法のみおよび超音波法の場合の相関係数は、前述の表—7 と同一であるが、その両者を複合した場合は重相関係数は 0.864 となり、強度推定の精度の向上が見られる。さらに説明変数を追加していった場合の、重相関係数の変化の経緯を CR 項から読みとることが出来るが、最大値は 0.942 となった。

相関分析において、各説明変数を追加していった場合、特に水セメント比 (K3) を考慮した場合の相関係数の増加が著しいことが特徴的である。伝播速度法単独の場合には相関係数は 0.596 であるが、水セメント比を考慮すると 0.914 となり、また反発度および伝播速度の複合の場合

図—6 複合法による推定強度とコア強度の関係(シリーズ全体)

合も同様に、相関係数が0.864に対して、0.933となつて、本実験による相関係数の最大値に近い値となった。この関係は図—6と図—7との比較によつても明らかである（後述）。これは水セメント比の影響の度合いが強度と伝播速度とでは異なる故であると説明されよう。

反発度と伝播速度の複合法による推定値とコア強度の相関散布図を示したのが図—6である。図中に示す標準誤差 ϵ は等強度線に対する分布の標準偏差を示したものである。この場合は37.0 kgf/cm²、すなわち、ここで示した回帰式で強度を推定する場合に、推定値の誤差は標準差で表すと37.0 kgf/cm²であることを意味する。次に、強度の推定値のバラツキの範囲を、標準偏差の2倍として考えると^{注)}、ここで示した複合法による回帰式を用いた場合の推定強度の誤差範囲は、およそ74 kgf/cm²であると言える。この値は、超音波法の単独法による場合の誤差範囲に比して約50%である。

水セメント比を説明変数として追加した場合についての推定値と実測値の相関散布図を図—7に示した。先の図—6中で、高強度域で等強度線から離れた分布がこの場合では同線に近づき、推定精度が向上したことが分かる。すなわち、伝播速度法では高強度域でやや分布にズレが見られたのが、反発度および水セメント比を考慮することによって、それを消去するような効果があると言える。上記に準じ標準偏差を求めると26.5 kgf/cm²となり、強度推定における誤差は53 kgf/cm²以内である。ただし、水セメント比を追加すると推定精度は向上するが、実務上では実験とは異なり、水セメント比が不確定であることは考慮する必要がある。フレッシュコンクリートの水セメント比の推定試験法が実用化されつつあるが、これの併用が推定精度の向上の助けとなる。

図—7 複合法による推定強度とコア強度の関係(シリーズ全体、水セメント比を含む)

注) バラツキの範囲の目安として、標準偏差の2倍(2 σ 、すなわちその範囲内にデータの入る確率が95%)の値で表現した。

表—8に示した回帰式を整理し、代表的な式をまとめて表—9を得た。本研究で提案する強度推定式の一覧である。ここに示した強度推定式を、水セメント比を考慮した場合の建築学会の共同実験回帰式と比較すると、推定値のコア強度に対する誤差(標準誤差)が前者では26.5 kgf/cm²であるのに対し、後者は36.6 kgf/cm²となった。これらの強度推定式が相当に広範囲な調合条件のコンクリートに適用できる汎用性を有していることを示している。

(4) 現行試験法との比較

本項は、同時採取供試体の強度(JASS 5による構造体の推定強度)とコア強度(構造体強度と考える)および複合法による推定強度との関係についての比較・検討を行ったものである。表—10は各シリーズごとの平均の強度を比較したもので、シリーズ間に若干の差はあるが、最下欄で見ると、供試体強度はコア強度にほぼ等しいと言えよう。また、複合法による推定強度も同様にコア強度にほぼ等しい値となった。一方、壁体の上部および、下部から採取したコアの強度は供試体に比して、前者でおよそ7%小さく、後者でおよそ14%大きい値となり、壁体内に強度変動がある。したがってコア強度から構造体コンクリートの強度を推定する場合、打設深さに沿って上部、中部および下部から採取することが望ましいが、不可能な場合はその中央部から採取すれば、およそ平均的な値が得られよう。なお、表中には記していないが、

表—9 本研究で提案する強度推定式

説明変数	相関係数	回帰式	標準誤差 kgf/cm ²
反発度	0.839	$P_c = 14.0 R - 157$	40.2
音速	0.596	$P_c = 157 V_p - 367$	59.2
複合法	0.864	$P_c = 12.0 R + 62.9 V_p - 352$	37.0
複合法	0.933	$P_c = 5.2 R + 121 V_p - 4.7 w/c - 110$	26.5
複合法	0.909	$P_c = 8.2 R + 269 V_p - 1094 *$	—
複合法	0.936	$P_c = 7.0 R + 185 V_p - 2.9 W/C - 938 *$	—

注：回帰式中の*印は学会共同実験による回帰式

図—8 コア強度と同時採取供試体強度および推定強度の関係

非破壊試験の場合はコア強度ほど敏感ではないが、構造体内の強度の、打ち込みの上下差も把握が可能となる。

図—8 は上記の関係を示したもので、コア強度に対する供試体強度および複合法による推定強度の対応である。図から見られるように各実験シリーズの測定値ともにコア強度に対応して、等強度線上に精度良く分布していることが分かる。 t 検定の結果から、同時採取供試体の強度および複合法による推定強度共に平均値はコア強度に差がないことが分かった。この結果から、構造体コンクリートの強度（コア強度）の平均値は、同時採取供試体強度によって推定することが可能であると言える。しかし、構造体各部における強度の変動については、同時採取供試体強度からは把握できない。一方、複合法によっても同様に、構造体強度の平均値の推定が可能であることが示され、かつ構造体の各部における測定から、次項に述べるように、強度変動を推定することも可能であると言える。

(5) コア強度の変動と非破壊試験値の変動の関係

構造体強度は、現場に納入されたコンクリートの品質変動以外に、その後の打設条件、養生条件等多くの要因の影響を受けるが、それ以外にも部材内の位置、形状、寸法にも影響をうけて変動し、その実態を把握することは実務的には極めて難しいと言えよう。非破壊試験は測

表—10 同時採取供試体強度とコア強度および複合推定強度の関係

単位 kgf/cm^2 , () 内は供試体強度に対する%

シリーズ	供試体強度	コア強度			複合法推定強度
		平均	壁体上部	壁体下部	
1	228 (100)	225 (98.7)	179 (78.4)	295 (129.5)	227 (100.2)
2	282 (100)	299 (106.1)	294 (104.1)	338 (119.9)	319 (88.7)
3	367 (100)	333 (90.8)	332 (90.5)	350 (95.4)	328 (89.2)
4	219 (100)	215 (98.3)	215 (98.3)	217 (98.9)	217 (99.1)
比平均	(100)	(100)	(93)	(114)	(102)

図—9 コア強度変動と推定強度変動の関係

定数を増すことが比較的容易であり、その変動と構造体強度の変動との関係が得られれば、その意義は大きいと考えられる。

そこで、全シリーズのモデル壁体（合計 18 体）について、コア強度の変動係数（供試体数は合計で 255 個）と非破壊試験による推定強度の変動係数の対比を行い、その関係を検討した。コア強度の変動係数は、各シリーズによってバラツキがあり、5～20 % の範囲で他の特性値に比べて大であった。一方、反発度は 5～15 % でやや小さく、伝播速度では 5～20 %、複合法の場合は伝播速度の場合と近似し、強度の変動とおよそ同程度となった。図—9 は、コア強度と複合法による推定強度の変動係数の相関散布図で、各壁体条件の対応を全シリーズの結果をまとめて記したものである。同図で等変動線を中心として、データがプロットされているのが観察される。そこで、非破壊試験による推定強度とコア強度の変動係数の差についての t 検定を行った結果、その両者には有意差は見られなかった。しかし、バラツキがやや大であると考えられるために、その両者の差を等変動線に対する標準偏差で表し、図中に標準誤差として記したように、3.7 % となった。

以上の分析から、構造体コンクリートの強度の変動を非破壊試験結果の変動から推定することが可能であると言える。その場合推定値の変動の平均は実際の変動の平均と同様であり、またそのバラツキは標準偏差で示すとおよそ 3.7 % である。

4. まとめ

本報告は非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定について実験的検討を行ったもので、以下が明らかとなった。

1) 実大寸法を想定したモデル試験体を用いて行った実験から、非破壊試験による強度推定式を表—8 として提案した。なお、これら各式は建築学会の研究小委員会による共同実験の回帰式と近似し、それらの汎用性が示された。

2) 上記の各推定式中、標準誤差として示した数値は、各推定式を用いた場合の推定誤差を標準偏差で表したものである。反発度法あるいは超音波伝播速度法の単独法に対しその両者を用いた複合法では推定誤差が小さくなる。また、説明変数として水セメント比を追加すると、推定誤差が相当に小さくなる。推定誤差の範囲は複合法では 70 kgf/cm^2 、水セメント比を考慮すると 50 kgf/cm^2 以内程度である。

3) 構造体強度を推定するために行われている、現行の同時採取供試体の強度はコア強度と一致した。また複合法による推定強度も平均値はコア強度に一致した。したがって、いずれの方法でもコア強度の平均値で代表した

構造体強度の推定が可能である。ただし前者の場合施工程度が良好なことが前提となる。一方部位、部材の各所の強度の分布状態や変動状態を把握するためには後者の方法がよい。

4) 構造体の直接測定から求めた超音波伝播速度とその位置から採取したコアの伝播速度は同様の値であり、両者の差はない。

5) 構造体コンクリートの強度の変動係数は、非破壊試験値の変動係数から推定することが可能である。その推定値のバラツキは変動係数でおよそ4%程度である。

以上、本報告では、非破壊試験法による構造体コンクリートの強度の推定式と推定誤差の範囲を明らかにし、また強度の変動について推定可能であることを示した。建築中の工事管理、検査や竣工時の品質把握の手段として有効に利用できよう。

なお、長期材令を経た実施構造物における非破壊試験の適用についても調査を行って、その一部は既に発表したが³⁰⁾、さらに検討中である。

謝 辞

本報告はその実験の主たる部分を芝浦工業大学および武蔵工業大学の多くの学生諸君の尽力によるもので、記して感謝致します。また、実験時に協力頂いた前田建設工業(株)技術研究所、および大成建設(株)技術研究所の多くの方々に深謝致します。なお、実験経費の一部は昭和55年度および昭和56年度の文部省科研費によるものである。

文 献

- 1) 野崎喜嗣，十代田知三：コンクリートの非破壊試験に関する研究，建築学会関東支部研究報告，1981年
- 2) 十代田知三，野崎喜嗣ほか：流動化コンクリートの均質性，コンクリート工学年次講演論文集，1981年
- 3) 十代田知三，野崎喜嗣ほか：造殻混練コンクリートに関する実大実験，建築学会大会，1982年
- 4) 野崎喜嗣，十代田知三：モデル構造物の非破壊試験，コンクリート工学協会年次講演論文集，1982年
- 5) 野崎喜嗣，十代田知三：構造体コンクリートの品質評価に関する研究，建築学会大会，1983年
- 6) Nozaki, Y., Soshiroda, T.: Evaluation of quality of concrete in structure, CANMET, ACI, 2nd International conference, OTTAWA 1984
- 7) Soshiroda, T., Nozaki, Y.: A Method for evaluation of quality of concrete in structures, Proc. of The 28th Japan congress of materials research, KYOTO, 1985
- 8) 十代田知三，野崎喜嗣：コンクリート構造物の品質評価方法に関する研究，材料研究連合講演会要旨，1985年
- 9) 野崎喜嗣，十代田知三：超音波法による構造体コンクリートの品質評価方法に関する研究，コンクリート工学協会耐久性診断シンポジウム論文集，1985年
- 10) 小林幸一，十代田知三，野崎喜嗣：非破壊試験による構

造体コンクリートの品質評価方法(1)，建築学会大会，1989年

- 11) 野崎喜嗣，小林幸一，十代田知三：同上(2)，建築学会大会，1989年
- 12) 十代田知三：構造物に於ける試験値の変動から見たコンクリート諸物性の構造敏感性，第37期日本材料学会学術講演会要旨，1989年
- 13) 小林幸一：非破壊試験による構造体コンクリートの品質評価方法に関する研究，昭和63年度芝浦工業大学大学院修士論文，1989年3月
- 14) 谷川恭雄，山田和夫：コンクリートの非破壊検査，コンクリート工学，1989年3月
- 15) 例えば，1)等
- 16) Jones, R.: The nondestructive testing of concrete, Magazine of concrete research, Vol.1 No.2, June 1949
- 17) Leslie, R., Cheesman, J.: An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures, ACI Journal Sept' 1949
- 18) Whitehurst, E. A.: Soniscope tests of concrete structures, ACI Journal V.47 No.6 Feb. 1951
- 19) Kesler, E., Higuchi, Y.: Problems in the sonic testing of plain concrete., International symposium RILEM Paris, 1954
- 20) 奥島正一，小阪義夫，ほか：コンクリート強度と音速とに関する実験，日本建築学会研究報告，No.14, 1952
- 21) 近藤泰夫，明石外世樹：超音波法によるコンクリート物性測定に関する実験的研究，セ技年報，No.10, 1956
- 22) 亀田泰弘：音の伝搬速度による現場打ちコンクリート強度の推定，建築学会研究報告，No.13, 1951
- 23) Facaoaru, I. et al.: Concrete strength determination by nondestructive combined methods, RILEM report, Aachen, 1966
- 24) Facaoaru, Ion: Non-destructive testing of concrete in Romania, Proc. Symposium on NDT of concrete and timber, Institution of civil engineers, London 1969
- 25) 谷川恭雄，山田和夫，小阪義夫：コンクリートの複合非破壊試験に関する研究，コンクリート工学年次講演論文集，1989年
- 26) 坂 静夫：表面硬度法による実施コンクリートの強度判定法，セメント技術年報，No.9, 1955年
- 27) 日本建築学会非破壊試験方法研究小委員会：コンクリートの非破壊試験法に関する研究の現状と問題点，日本建築学会，1981年
- 28) 日本建築学会非破壊試験方法研究小委員会：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，日本建築学会，1983年
- 29) ACI Committee: In-Place Methods for Determination of Strngth of Concrete, ACI Materials Journal Sept./Oct. 1988
- 30) 十代田知三，野崎喜嗣，小林幸一，猪野一郎：長期材令を経た実施構造物に於けるコンクリートの非破壊試験，コンクリート工学協会シンポジウム，1991年

(1991年1月10日原稿受理，1991年7月29日採用決定)