構造体コンクリート品質の早期非破壊検査法の提案

—非破壊試験による構造体コンクリートの品質検査法の総合的検討(その3)—

RECOMMENDED METHOD FOR EARLIER NONDESTRUCTIVE INSPECTION
OF CONCRETE QUALITY IN STRUCTURES

—Quality inspection methods of concrete in structures by nondestructive testing Part 3—

十代田 知三*, ヴォラプッタポーン コンキット**

Tomozo SOSHIRODA and Kongkij VORAPUTHAPORN

The recommended method consists of 24-hour ultrasonic testing and 3-day rebound hammer testing after placing on concrete in structures
The merits of this method are as follows:

- (1) The earlier determination
- (2) Getting information of qualities very early and accurately step by step; combining 24-hour pulse velocity with 3-day rebound number
- (3) The age of 24-hour or 3-day is the optimum age for each nondestructive testing respectively
- (4) The direct inspection of structures
- (5) Getting the alternative quality characteristics of strength and durability.

This paper describes the investigation results that have brought the basis of the above items.

Keywords : Concrete in structures, Earlier inspection, Nondestructive inspection,
Optimum testing age, Strength, Durability

構造体コンクリート、早期検査、非破壊検査、最適試験材齢、強度、耐久性

1. 緒 論

1.1 研究の背景と目的

昨年来、国内ではトンネルや高架橋のコンクリート落下事故が相次いで起こり、トルコや台湾では大地震による鉄筋コンクリート建造物に甚大な被害が生じ、5年前の阪神・淡路大震災が鳴らした警鐘をさらに乱打するかのように我々に迫って来る。これらの報道による映像によっても明らかに手抜きとみられる施工状況は工事検査の重要性を訴えている。

現在、建築工事における構造体コンクリートの品質検査は、一般に、打設と同時に採取したコンクリート供試体の28日圧縮強度に基づいて行われているが、この方法には以前から次のような問題点が指摘されてきた^{1)~4)}。

- (1) 検査対象に対して、供試体による間接試験であること
- (2) 圧縮強度だけでは耐久性を含む品質指標として十分ではないこと
- (3) 結果の判明が28日後では遅すぎる

これらの問題点に対して、それぞれ古くから多くの解決策が研究・開発・提案されてきており、一部は実施されている。例えば、(1)については、ボルト引抜法や小径コア法を含む各種の非破壊試験⁵⁾など、(2)については、JASS 5の“品質基準強度”の考え方⁶⁾(次章参照)など、(3)については、種々の早期判定法⁷⁾がある。しかし、すべてを解決するために複数の方法を採用することは、作業が極めて煩雑となる上にコストも嵩むた

め、実用性に乏しい。

本研究は、これらの問題点のすべてを、一つのシステムにより解決する実用的検査法を追究することを目的としている。

1.2 研究の経緯と本論文の構成

前節の諸問題解決のため、構造体を直接に、かつ早期に測定可能な手段という条件に適合するには、少しでも破壊的な手段を伴う方法は無理と考えられるので、純非破壊試験法が残ることになる。本研究では、これまで使用実績があり、操作が簡便なパンジットによる超音波伝搬速度(以下、音速という)とシュミットハンマーによる反発硬度(以下、反発度という)を採用し、既にその有効性が明らかにされている両者の併用(以下、複合という)を常に検討してきた。

前々報⁸⁾においては、音速と反発度とが構造体コンクリートの耐久性を含めた品質指標として有用であることを明らかにし、前報⁹⁾においては、音速と動弾性係数との強い相関性から、音速による構造体コンクリートの動弾性係数の推定式を提案した。

本論文では、先ずこれらの結果を総合して、非破壊試験によって問題(2)を解決する可能性を、現行の供試体強度による方法(以下、現行法という)と比較して示す[2章]。

次に、問題(3)を解決するための早期非破壊検査法の提案¹⁰⁾を、その後のデータを含めて再解析した結果¹¹⁾等を総括してその概要を示す[3章]。

* 芝浦工業大学工学部電気設備学科 教授・工博

** NTT データソリューション(株)

Prof., Dept. of Electrical Systems for Urban Engineering, Shibaura Institute of Technology, Dr. Eng.
NTT Data Solution Corporation

以上の結果を総合して、総主題に対する結論として、構造体コンクリート品質の早期非破壊検査法を、現行法を補うものとして提案し、その特長と期待される効果について述べる〔4章〕。

2. 音速と反発度に対する品質指標としての評価—供試体強度との比較—

2.1 概要

構造体コンクリートの品質検査とは、それが所要の品質を満足するかどうかを確認することであり、所要の品質とは、一般に強度と耐久性である。強度は圧縮強度として定量化し易いが、耐久性については定量化が難しい。そこで、圧縮強度を品質の代表特性として検査の対象として来たが、「供試体の圧縮強度さえ出れば」という安易な考えに流されないとも限らず、問題(2)のような指摘があることにもつながる。これに対して、JASS 5は1997年の改定により、構造耐力上必要な圧縮強度と、所要の寿命を支配する中性化速度が依存する水セメント比を算出し、これに見合う圧縮強度と、どちらか大きい方の圧縮強度を“品質基準強度”と定め、これをコンクリート品質の代表特性として一元化を図り、構造体コンクリートの検査の対象とする考え方を提示した⁶⁾。この考え方により、“品質基準強度”を、強度と耐久性とを包括した品質代表特性とする根拠が明確となった。

従って、“非破壊試験による構造体コンクリートの圧縮強度推定”を、“構造体コンクリートが所要の品質を有すること”を確認する手段とするためには、その非破壊試験値が構造体コンクリートの耐久性とどのような関係にあるかを明らかにする必要がある。前述のように耐久性の定量化は困難であることから、本研究では、耐久性に密接な関係があり、かつ定量化できる諸特性のうち圧縮強度、引張強度、動弾性係数、密度、容積吸水率を取上げ、それらの諸特性値と非破壊試験値との関係を検討した。既報⁹⁾では、実験室実験、実大構造物モデル実験および既存建物調査というフェーズの異なる3つのシリーズの結果を通して考察した。その結果、認められた可能性から、構造体コンクリートの品質検査法としての実用化を進めるため、ここでは実大構造物モデル実験の結果に絞って総合的に検討する。すなわち、構造体コンクリートの品質指標として、現行法の供試体強度(sFc)と音速(Vp)、反発度(R)およびその複合とを比較して評価する。

なお、非破壊試験値と中性化深さとの関係を示す資料は乏しいと思われるので、一棟のみであるが、既存建物の解体調査結果¹²⁾を、参考までにAppendixに示す。

2.2 方法

写真1にみられるような実大構造物モデル(30 cm 厚×240 cm 高×190~240 cm 巾のRC壁体)18体を4年間に亘り作成した⁸⁾¹³⁾。コンクリートは全て普通ポルトランドセメント・普通骨材を使用しているが、調査は広範囲に亘り各壁体すべて異なる。この壁体1体を1建物(1ロット)と想定し、打設と同時に採取した供試体(φ15 cm×30 cm)3個の圧縮強度の平均値をsFcとして現行法のモデルとする。各壁体15箇所を定め、音速および反発度を測定して平均値をVpおよびRとする。測定は本学会マニュアル¹⁴⁾に準じて行った。その後、各壁体30本のコア(φ15 cm×30 cm)を採取して、その半数について密度、動弾性係数および容積吸水率を測定して平均値をD、EdおよびAbとする。最後に、半数ずつ圧縮および引張試験を行って平均強度をFcおよびFtとする。この結果については、既報⁸⁾で検討したが、ここで改めて表1に解析結果を示す。評価尺度としては、回帰分析による相関係数(r)と誤差の変動係数(CV)を用いた。他に標準誤差(SE)、平均誤差率(ε)があるが、傾向が前2者とほぼ等しいので、表のみにとど

写真1 実大構造物モデルとコア採取状況

表1 解析結果

性質	指標	回帰係数			定数 C	r	SE*	ε (%)	CV (%)
		K ₁	K ₂	K ₃					
Fc	sFc	—	—	0.908	2.416	0.946	2.205	6.895	8.097
	Vp	12.497	—	—	-24.666	0.549	5.710	13.150	20.969
	R	—	1.440	—	-17.201	0.915	2.755	8.393	10.117
	Vp+R	1.611	1.379	—	-22.016	0.917	2.725	8.236	10.007
Ft	sFc	—	—	0.057	1.113	0.912	0.184	5.351	6.858
	Vp	0.961	—	—	-1.308	0.642	0.344	8.353	12.821
	R	—	0.090	—	-0.083	0.867	0.223	6.355	8.312
	Vp+R	0.361	0.076	—	-1.162	0.891	0.204	6.258	7.603
Ed	sFc	—	—	1.002	5.394	0.833	3.080	7.217	10.102
	Vp	16.978	—	—	-40.81	0.985	0.957	2.393	3.139
	R	—	1.289	—	-7.984	0.853	2.907	7.567	9.535
	Vp+R	17.853	-0.087	—	-41.88	0.986	0.945	2.436	3.099
D	sFc	—	—	0.003	2.230	0.326	0.054	1.897	2.347
	Vp	0.157	—	—	1.651	0.828	0.032	1.011	1.391
	R	—	0.005	—	2.145	0.387	0.052	1.844	2.226
	Vp+R	0.166	-0.001	—	1.649	0.832	0.032	1.011	1.391
Ab	sFc	—	—	-0.052	17.583	0.137	2.705	14.130	16.748
	Vp	-7.543	—	—	47.475	0.829	2.651	6.460	9.467
	R	—	-0.207	—	22.551	0.330	1.529	13.598	15.962
	Vp+R	-8.408	0.110	—	47.685	0.841	2.578	5.947	9.139

$$Y = (K_1 \cdot Vp) + (K_2 \cdot R) + (K_3 \cdot sFc) + C$$

ここに、Y=性質

* 標準誤差の単位：Fc(MPa)、Ft(MPa)、Ed(GPa)、D(g/cm³)、Ab(%Vol.)

める。複合はVp、Rと各品質特性との重回帰分析による(回帰式については表1に示す)。

これらに基づき、図1および図2を作成し、4種の品質指標と5種の品質特性との関係を比較検討した。

2.3 結果および考察

図1に、現行法のsFcと比較して、R、Vpおよび複合と4種の品質指標を並べて、5種の品質特性との相関係数を示した。

sFcは、力学的性質、特に強度との相関性が良いが、物理的性質との相関性はあまりない。

非破壊試験では、RがほぼsFcと似た傾向を示しているが、Vpは動弾性係数と非常に良い相関性を示し⁹⁾、物理的性質との相関性がこれに次ぎ、強度との相関性は良くない。Rは組織感受性の特性を良く捉え、Vpが組織感受性の特性を良く捉えるという特徴的傾向がみられ⁸⁾、それぞれコンクリートの内部構造の異なる一面を表していると考えられる¹⁵⁾。この結果には表われていないが、Rは耐久性に密接に関わる表層部の緻密さを直接示すものである。

複合は全ての品質特性と良い相関性を示し、強度と耐久性を含めた総合的な品質指標としての適性が認められる。単独の場合の良い方と比べてさほど改善される訳ではないが、何れかの単独法による大きな誤差の発生を防ぐことができる点で重要な役割を果たすといえよう。

図1 各方法における品質指標と品質特性との相関性の比較

図2 各方法による誤差の変動係数の比較

図2は、誤差の変動係数を、品質指標別に比較したものであるが、上述の評価を裏付けるものである。

以上の結果から、音速と反発度の複合法は、構造体コンクリートの品質検査法として、現行法の不足する面を補う方法として大いに有効であるといえよう。

3. 音速および反発度の最適測定材齢の推奨値と早期検査への応用

3.1 概要

既報¹⁰⁾における結果は、以下のようである。

音速、反発度などコンクリートの非破壊試験値の材齢に伴う発現が、圧縮強度の発現に比べてかなり早いことに着目して、非破壊試験の適正材齢を、コンクリートの品質差に対する敏感性および28日圧縮強度との相関性から検討した結果、非破壊試験はコンクリートの材齢が早期であるほど有効であることを明らかにした。従って、最適材齢で行う非破壊試験からは材齢28日における構造体コンクリートの潜在強度を早期に推定できることを示した。これらの結果に基づき、構造体コンクリート品質の早期検査手法として、材齢24時間の音速と材齢3日の反発度との複合法を提示した。

ここでは、その後の強度範囲を拡大した実験データ¹¹⁾を含めて再解析した結果等を総括する。

また、前章において、非破壊試験値が耐久性を含む品質の指標として適性であることを明らかにしたことから、ここでは早期試験値に対しても、28日圧縮強度との相関性のみでなく、耐久性に関係の深い動弾性係数および密度との相関性による評価を行う。

3.2 方法

コンクリート実験^{10),11)}は'94～'98年に亘って行い、主として①材齢に伴う発現傾向について非破壊試験値と強度との比較、②W/Cの違いによる品質差に対する各試験値の敏感性の比較、③早期材齢における非破壊試験値と28日標準養生強度、動弾性係数および密度との相関性、について検討した。

敏感性の指標は、'98年を例にとると、W/C 56%の調査を基準とし、W/C 71%の各試験値との差を低下率で表した。強度の例を下式に示す。

$$\text{強度の敏感性(\%)}: Sf = \frac{f_{56} - f_{71}}{f_{56}} \times 100$$

ここに、 $f_{56(71)}$: W/C56(71)%の調査の強度

図3 材齢に伴う各特性の発現率の比較(W/C 60%)

相関性の指標は、各材齢における各非破壊試験値と28日強度との関係から回帰式および重回帰式を求め、それぞれの相関係数(r)、標準誤差(SE)、平均誤差率(ϵ)、変動係数(CV)で表した。

3.3 結果および考察

3.3.1 材齢に伴う各特性の発現傾向

各調査とも同様の傾向がみられるので、図3に一例を示す。各特性とも28日の値を基準とし各材齢における百分率を発現率として比較する。音速は強度に比べてごく早期に発現してしまう。動弾性係数がこれに続き、反発度は強度より早いが動弾性係数より遅い。これらの傾向は非破壊試験の早期実施の可能性を示している。

3.3.2 品質変化に対する各特性の敏感性

W/Cの増大による品質の低下をどの程度把握できるか、材齢別に各特性を比較した。一例を図4に示す。材齢に関わらず敏感性は **強度 > 反発度 > 動弾性係数 > 音速** の順に高い。また、どの特性も材齢が経つにつれて鈍感になるが、強度に比べて音速、動弾性係数はその鈍化が著しい。

3.3.3 早期非破壊試験値と28日圧縮強度との相関性

各材齢における非破壊試験の品質検査能力を評価するため、表2により28日標準養生強度との相関性を検討する。

音速と28日強度との関係は、相関係数、誤差ともに早期ほど良い傾向がある。この現象については、以下のように推察される。

図 4 W/C56%を基準とした場合のW/C71%の品質変化に対する諸特性の敏感性

表 2 各材齢における非破壊試験値と28日圧縮強度との関係

試験法	n	回帰式	r	SE (MPa)	ε (%)	CV (%)
音速法	1日	$F_{28} = 1.941 \exp(0.815 V_{p1})$	0.938	5.702	11.817	16.614
	3日	$F_{28} = 0.356 \exp(1.110 V_{p3})$	0.908	7.406	14.521	21.579
	7日	$F_{28} = 0.131 \exp(1.293 V_{p7})$	0.926	6.379	12.971	18.587
	28日	$F_{28} = 0.043 \exp(1.498 V_{p28})$	0.900	6.431	15.089	18.738
反発度法	3日	$F_{28} = 1.846 R_3 - 10.583$	0.962	4.234	12.247	12.337
	7日	$F_{28} = 1.830 R_7 - 11.107$	0.951	4.781	12.374	13.931
	28日	$F_{28} = 1.623 R_{28} - 20.547$	0.965	4.117	9.044	11.996
	1日+3日*	$F_{28} = 10.028 V_{p1} + 1.369 R_3 - 33.261$	0.981	2.927	6.189	8.529
複合法	3日	$F_{28} = 10.222 V_{p3} + 1.498 R_3 - 43.372$	0.972	3.616	7.975	10.536
	7日	$F_{28} = 14.820 V_{p7} + 1.210 R_7 - 62.184$	0.963	4.098	9.119	11.941
	28日	$F_{28} = 8.630 V_{p28} + 1.416 R_{28} - 51.581$	0.967	3.898	8.342	11.358
	1日+3日*					

* 1日音速+3日反発度

音速への影響因子とその影響度は、材齢に伴って変化する。すなわち、ごく早期の音速は、骨材の音速およびセメントペーストの音速に依存し、まだ発現の遅れている骨材とペーストとの付着性にはあまり影響を受けない。材齢 28 日の音速は、骨材の音速およびペーストの音速に依存するほか、骨材とペーストとの付着性にも影響を受ける。この付着性は、セメントの水和度だけでは決まらず、その他の不確定要因、例えば骨材の表面性状などがあるので、初期に比べると、音速の変動が大きくなる。そのため、28 日強度との相関性が低くなるのであろう。

従って、音速の品質検査能力は材齢が早いほど高いということができ、早期音速から 28 日強度推定の可能性が十分認められる。

反発度と 28 日強度との関係は、どの材齢においても、音速より良い相関性を示し、誤差も小さく安定している。反発度の品質検査能力は材齢に関わらず高いといえる。

反発度の場合、最も早い材齢が 3 日なので、骨材とペーストとの付着性は、水和の進行に伴い既にかなり発生している。従って、反発度は材齢にかかわらず、骨材の硬さ、セメントペーストの硬さおよび骨材とペーストとの付着性の三者に依存する。それ故、材齢によって推定誤差はあまり変わらないのであろう。

従って、当然、早く結果が得られる 3 日が良いということができ、早期反発度から 28 日強度推定の可能性が十分認められる。

3.3.4 早期非破壊試験値と 28 日動弾性係数との相関性

表 3 より、各材齢における音速と 28 日動弾性係数との関係は材齢 1 日が最も相関性が良く、その他の材齢ではほぼ同様である。各材齢における反発度と 28 日動弾性係数との関係は材齢が経つにつれて相関性が若

表 3 各材齢における非破壊試験値と28日動弾性係数との関係

推定法	n	回帰式	r	SE (GPa)	ε (%)	CV (%)
音速法	1日	$Ed_{28} = 9.855 V_{p1} - 1.694$	0.961	1.532	3.872	5.377
	3日	$Ed_{28} = 13.500 V_{p3} - 22.503$	0.931	1.675	4.942	5.881
	7日	$Ed_{28} = 13.162 V_{p7} - 23.935$	0.894	2.063	6.529	7.242
	28日	$Ed_{28} = 20.977 V_{p28} - 60.242$	0.921	1.791	4.915	6.287
反発度法	3日	$Ed_{28} = 0.981 R_3 + 7.339$	0.915	1.860	5.109	6.528
	7日	$Ed_{28} = 0.838 R_7 + 7.865$	0.941	1.562	4.346	5.483
	28日	$Ed_{28} = 0.743 R_{28} + 6.921$	0.941	1.553	4.110	5.453
	1日+3日*	$Ed_{28} = 4.002 V_{p1} + 0.551 R_3 + 4.920$	0.959	1.310	3.836	4.598
複合法	3日	$Ed_{28} = 8.021 V_{p3} + 0.495 R_3 - 12.477$	0.968	1.151	3.239	4.039
	7日	$Ed_{28} = 5.588 V_{p7} + 0.562 R_7 - 7.612$	0.966	1.189	3.409	4.173
	28日	$Ed_{28} = 10.023 V_{p28} + 0.450 R_{28} - 26.960$	0.958	1.111	2.878	3.901
	1日+3日*					

* 1日音速+3日反発度

干良くなり、誤差もやや小さくなる程度で、どの材齢も安定している。

複合法で 28 日動弾性係数を推定した場合、どの材齢においても相関係数、推定精度ともに改善される。早期推定と 28 日推定ではほぼ同じ結果が得られたので、早期推定の可能性が認められる。

3.3.5 早期非破壊試験値と 28 日密度との関係

表 4 より、各材齢における音速と 28 日密度との関係は密度の範囲が狭いため、回帰直線と回帰曲線ともに相関係数および推定誤差がほぼ同様である。各材齢における反発度と 28 日密度との関係は材齢が経つにつれて相関性が若干良くなり、誤差もやや小さくなるが、早期推定は可能である。

表 4 各材齢における非破壊試験値と28日密度との関係

推定法	n	回帰式	r	SE (g/cm³)	ε (%)	CV (%)
音速法	1日	$D_{28} = 0.142 V_{p1} + 1.794$	0.907	0.034	1.212	1.506
	3日	$D_{28} = 0.188 V_{p3} + 1.513$	0.897	0.037	1.282	1.639
	7日	$D_{28} = 0.219 V_{p7} + 1.337$	0.936	0.029	1.076	1.284
	28日	$D_{28} = 0.214 V_{p28} + 1.116$	0.903	0.036	1.310	1.594
反発度法	3日	$D_{28} = 0.244 L_n(R_3) + 1.489$	0.879	0.040	1.418	1.771
	7日	$D_{28} = 0.257 L_n(R_7) + 1.414$	0.909	0.035	1.268	1.550
	28日	$D_{28} = 0.281 L_n(R_{28}) + 1.292$	0.917	0.033	1.244	1.461
	1日+3日*	$D_{28} = 0.122 V_{p1} + 0.001 R_3 + 1.825$	0.909	0.035	1.246	1.550
複合法	3日	$D_{28} = 0.139 V_{p3} + 0.003 R_3 + 1.640$	0.908	0.035	1.252	1.550
	7日	$D_{28} = 0.187 V_{p7} + 0.001 R_7 + 1.435$	0.938	0.029	1.057	1.284
	28日	$D_{28} = 0.150 V_{p28} + 0.004 R_{28} + 1.482$	0.924	0.032	1.207	1.417
	1日+3日*					

* 1日音速+3日反発度

3.3.6 最適測定材齢の検討と推奨値の決定

(1) 音速

これまでの結果、すなわちコンクリート品質の差に対する敏感性および 28 日圧縮強度との相関性と誤差による評価、さらに品質管理上の必要性から、音速の測定時期は打設後 24 時間以降、早いほど有効であると考えられる。なお、本研究で 24 時間を最適材齢に選んだ理由は、① Elvery らにより 12 時間後に測定値の変動が急に小さくなり、かつ 24 時間付近で安定することが示された¹⁶⁾、② 角田らにより 12~24 時間に音速の変化が緩やかになることが示された¹⁷⁾、③ 実用上、12 時間では測定作業が勤務時間外になるので、24 時間がやり易いこと、の 3 点である。

(2) 反発度

これまでの結果、すなわちコンクリート品質の差に対する敏感性および 28 日圧縮強度との相関性と誤差による評価、さらに品質管理上の必要性から、反発度の測定時期は 3 日以降、早いほど有効であると考えられる。本研究で 3 日を最適材齢に選んだ理由は、3 日より早くなると、W/C が大きい場合、ハンマーの打撃跡(窪み)が急激に大きくなることが実験結果から明らかにされ、3 日を損傷の限界と考えたことによる¹⁰⁾。コンクリートに及ぼす

早期打撃の影響については、打撃した供試体と打撃なしの供試体を比較して、どの早期材齢(2日あるいは3日)においても圧縮強度、引張強度ともに差が認められなかった¹⁸⁾。

3.3.7 コンクリート 28 日強度の早期推定法への応用

既に 3.3.3 において、適正材齢選定の評価項目の一つとして、各非破壊試験値と 28 日標準養生強度との相関性を検討した。ここではさらに、音速と反発度を併用した複合法で、両者による重回帰式を推定式とした場合について検討する。表 2 中には前項で推奨したそれぞれの最適材齢および比較のため、7 日と 28 日における音速および反発度の測定値による各重回帰式を、各単独法の場合の早期推定式と併示する。これより複合法の場合も、材齢が早期であるほど、相関係数、推定精度ともに優れているといえよう。それぞれの最適材齢を組合せた“1 日音速+3 日反発度”は最も早い複合法となるが、その結果を実測値と比較して図 5 (a) に示す。また早期ではないが、全ての測定が 28 日同一材齢の場合の結果も比較のため、図 5 (b) に示す。この図では両者に大差は認められないので、各複合法による推定精度の分布を図 6 に示す。(a) 1 日音速と 3 日反発度の複合法は (b) 28 日音速と 28 日反発度の複合法より推定精度が良く、誤差 5% 以内に 50%、10% 以内に 80% 以上のデータが含まれている。

非破壊試験による強度推定における複合法の有効性は一般に認められているが、早期推定の場合にはどうか、表 2 から検討してみよう。最も早い推

定方法として音速法を採用した場合、まず 24 時間後に結果が得られるが、その 2 日後に反発度法を追加して得られた結果は、相関係数、推定精度ともに改善されている。精度の良い 3 日反発度法単独と比較しても、相関係数が僅かながら改善され、精度は向上している。また、実施前にどちらが精度が良いのかは不明であるから、併用により確実となると思われる。

実用上、打設翌日から日を追って段階的に、より正確な品質情報が得られる点で、また、確実さを増すために、複合法は有効と思われる。

3.3.8 推定式の汎用性の検討

実用に際して最も重要なのは、推定式の設定である。このための資料として、'94~'95 年の実験結果(n=27)から求めた 1 日音速および 3 日反発度と 28 日圧縮強度との重回帰式を推定式とし、'98 年の実験結果(n=50)を用いて推定精度を検討した。その結果をそれぞれ表 5 および表 6 に示す。

'94~'95 年の実験は強度範囲が 21~64MPa とやや狭いため、直線式で十分であるが、範囲が 13~85MPa と広がった'98 年への適用には無理があり、例えば音速法単独では誤差が大きくなり使えない。ここで推奨した 1 日音速と 3 日反発度の複合法では、およそその値と比較すると、標準誤差が 3.1~3.5 MPa、平均誤差率が 6~10%、誤差の変動係数が 8.5~10.5% といずれからみてもかなり精度が落ちてしまう。本学会マニュアル¹⁴⁾が示しているように、ある程度の精度を得るためには、実際の検査対象となる工事用コンクリートの試験練りによって推定式を設定することが必要であろう。

図 5 推定28日強度と実測28日強度の比較

図 6 28日強度の推定精度の分布

表5 '94～'95年実験結果の解析結果

推定法	n	回帰式	r	SE(MPa)	ε (%)	CV(%)
音速法	1日	$F_{28}=44.521V_{p1}-126.830$	0.912	5.003	12.651	13.707
	3日	$F_{28}=50.329V_{p3}-171.920$	0.764	7.861	17.961	21.537
	7日	$F_{28}=59.396V_{p7}-217.670$	0.826	7.178	15.587	19.666
	28日	$F_{28}=54.177V_{p28}-206.270$	0.725	8.394	18.705	22.996
反発度法	3日	$F_{28}=1.606R_3-1.3736$	0.957	3.524	6.879	9.654
	7日	$F_{28}=1.261R_7+1.697$	0.931	4.453	10.748	12.200
	28日	$F_{28}=1.470R_{28}-16.847$	0.962	3.344	8.015	9.161
複合法	1日+3日	$F_{28}=14.595V_{p1}+1.162R_3-44.455$	0.965	3.087	5.952	8.459
	3日	$F_{28}=1.383V_{p3}+1.577R_3-6.445$	0.957	3.520	6.818	9.645
	7日	$F_{28}=15.529V_{p7}+1.025R_7-58.770$	0.940	4.172	9.913	11.430
	28日	$F_{28}=0.627V_{p28}+1.460R_{28}-19.309$	0.958	3.343	8.016	9.159

* 1日音速+3日反発度

表6 '94～'95年の回帰式(表5)を用いて'98年実験結果(n=50)から推定した結果

推定法		SE(MPa)	ε (%)	CV(%)
音速法	1日	17.733	290.406	53.504
	3日	11.081	71.299	33.432
	7日	9.850	19.922	29.719
	28日	7.747	32.240	23.374
反発度法	3日	6.758	18.141	20.392
	7日	7.267	17.877	21.927
	28日	5.214	10.739	15.731
複合法	1日+3日*	3.485	9.920	10.515
	3日	6.393	17.455	19.288
	7日	4.818	10.925	14.538
	28日	5.119	10.251	15.444

* 1日音速+3日反発度

4. 結論

4.1 提案

本研究の目的は、構造体コンクリートの品質検査法として、現行の方法が持つ3つの問題点を解決する一つの実用的なシステムを見出すことにある。そのため、「構造体コンクリートが所要の品質を有することを、ごく早期に、直接確認できる検査法」を目標として、これまでの結果を総合的に検討した結果、次のような方法を提案して結論としたい。

構造体コンクリート品質の早期非破壊検査法

- (1) コンクリート打設から24時間後に構造体の音速を測定し、さらに3日後に反発度を測定する。
- (2) これらの測定値により、段階的に構造体コンクリートの28日圧縮強度を推定する。すなわち、24時間後は音速法、3日後は複合法となる。
- (3) 推定式は、予め試験練により設定することを原則とする。
- (4) その結果により、段階的に品質判定を行う。判定方法は特記による。
- (5) この方法は現行の検査法を補うものである。
- (6) 推定強度は、標準養生した場合の潜在強度であることに留意する必要がある。
- (7) 測定は、構造耐力上の影響の少ない箇所(例えば、窓下の腰壁など)を部分的に脱型して行う。

4.2 本提案の特長

本提案の特長を以下に挙げる。

- (1) 一連の方法で3つの問題点を解決できること
- (2) 提案の根拠となった実験・調査の対象が広範囲に亘ること
- (3) 音速および反発度の測定は、それぞれの検査能力が最も有効に発揮される材齢に行われること

- (4) 強度および耐久性を包括した品質の代表特性としての圧縮強度を比較的高い精度で推定できること
- (5) 音速および反発度はそれぞれコンクリートの材質のある側面を物理的に表していると思われることから、複合法は圧縮強度とも異なった多面的な品質情報をもたらすこと
- (6) 耐久性の代用特性と考えられる引張強度、動弾性係数、密度および容積吸水率の推定法としても可能性があること
- (7) 構造体に限らず、プレキャスト製品や供試体にも適用できること

4.3 本提案に期待される効果

本提案が実施された場合に期待される効果は次のように考えられる。

- (1) 構造体コンクリートの強度・耐久性に関わる品質情報が、打設の翌日から段階的に得られる。
- (2) 任意の位置および個所数(n)が測定できる。
- (3) ごく早期に結果が判明するから、もし品質基準強度に達していないと予測されたとしても、材料や調合の再チェック、養生期間や型枠存置期間の延長などの処置をとり易い。
- (4) 工事中の非破壊試験値、特に音速の初期データは、完成後の建築物の供用全期間に亘る定期検査のための基準値として、経時変化の測定とそれによる劣化診断に役立つことになる。
- (5) 音速法と反発度法を併用する複合法は、精度の向上だけでなく、単独法のみによる大きな誤差の発生を防ぐことにも役立つ。
- (6) 新しい検査法の導入は現場に緊張感を与え、関係者の品質確保意識の向上をもたらす。
- (7) 試験は簡便であり、人件費を含むコストも比較的低い。

後記

鉄筋コンクリート工事において、これまで、非破壊試験は主としてある推定式を汎用した場合の強度推定精度の低さのため、過少評価され、十分に活用されてこなかったきらいがある。また、影響因子など科学的に明らかにされていない部分も多い。しかし、本研究結果からも明らかにされつつあるように、コンクリートの本質に迫る多面的品質情報として十分に活用されるべきであろう。強度推定の限界は、品質指標としての限界ではないということを認識する必要がある。本研究の結果から導いた提案「構造体コンクリート品質の早期非破壊検査法」を工事発注者・監理者・管理者が、十二分に活用されることを望むものである。

今後も、RC構造物の安全性確保のため、Lars Östlundの次の言葉¹⁹⁾を目標として、提案の展開を図って行きたい。

「重要なのは、大きな失敗をしないための管理であり、そのためには厳重な管理が必要である。しかし、精度を極めて良くするための管理は必要でない。」

なお、既報²⁰⁾で指摘された問題点のうち、コンクリート打継部の検査については、外周壁の型枠除去直後に行う音速法(表面法)が既に提案^{20)~21)}されている。

謝辞

当研究室において実験研究に励まれた代々の卒研究生、院生の諸兄姉に深く感謝申し上げます。また、共同研究して頂いた野崎喜嗣先生をはじめとする武蔵工業大学野崎研究室の皆様、枝広英俊先生をはじめとする本学枝広研究室の皆様ならびにご支援いただいた企業の方々に厚く御礼申し上げます。

図 7 既存建物におけるコンクリートの中性化深さと諸品質特性との関係

Appendix 既存建物における非破壊試験値と中性化深さとの関係

RC 構造物の耐久性にとって、コンクリートの中性化に対する抵抗性は最も一般的な重要性能である。しかし、非破壊試験値と中性化深さとの関係を示す資料は殆どないと思われる。構造体完成時の非破壊試験値と長期経年後の中性化深さとの関係が知りたいところであるが、参考までに既存建物の解体調査結果¹²⁾から、音速、反発度、動弾性係数および圧縮強度と中性化深さとの関係を図 7(a)~(d)に示す。

(a) 音速と中性化深さとの関係は、予想されるように、負の相関関係にあり、相関係数は 0.628 と、既存建物調査にあつては比較的良好といえよう⁸⁾。音速と中性化深さとは見かけの関係であるが、図 2 に見られるように、中性化と密接な関係にあると考えられる容積吸水率や密度といった内部構造を表す特性と音速との良い相関性がこの見かけの関係を裏付けていると思われる。これらの傾向は音速が中性化抵抗性の品質指標となり得ることを示唆している。

(b) 反発度と中性化深さとの相関性はあまり良くない。表層部の中性化による反発度の増加と、反発度が示す表層部の緻密さが中性化を遅らせる効果とが交絡して、結果が乱されたものと考えられる。

(c) 動弾性係数と中性化深さとの関係は、相関係数 0.735 と最も良く、動弾性係数がコンクリートの内部構造を表わす指標として、優れていることを裏付けているものと考えられる。このことは、前報⁹⁾あるいは図 2 に見られる音速との密接な関係から、音速の品質指標としての評価を高める一資料であろう。

(d) 圧縮強度と中性化深さとの相関性はあまり良くない。

(e) 音速と反発度との複合による重回帰式からの推定中性化深さと実測値とを比較してみると、標準誤差 5 mm 程度で良く合っている。

以上、一棟の調査結果のみで範囲が狭いが、非破壊試験値と中性化深さとの関係の資料が得られた。

参考文献

- 1) 例えば、十代田知三:コンクリートの品質指標について、セメントコンクリート、pp.2-9, 1974
- 2) 日本建築学会:構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点、pp.8-9, 1987
- 3) 堀孝司:土木構造物の耐久設計、コンクリート工学、Vol.35, No.11, pp.22-25, 1997
- 4) Sarja, A.:Durability Design of Concrete Structures, 日本建築学会/材料施工委員会・特別講演、1998.1.20
- 5) 例えば、品質評価試験方法研究委員会:報告書、日本コンクリート工学協会、1998.12

- 6) 日本建築学会:JASS 5 鉄筋コンクリート工事、pp.156-159, pp.583, 1997
- 7) 例えば、日本コンクリート工学協会:コンクリート品質の早期判定指針、1985
- 8) ヴォラプタポーン コンキッ、十代田知三:コンクリートの非破壊試験値と諸品質特性との関係-非破壊試験による構造体コンクリートの品質検査法の総合的検討(その 1)-、日本建築学会構造系論文集、No.525, pp.21-26, 1999.11
- 9) ヴォラプタポーン コンキッ、十代田知三:条件の異なるコンクリートの音速と動弾性係数との関係-非破壊試験による構造体コンクリートの品質検査法の総合的検討(その 2)-、日本建築学会構造系論文集、No.527, pp.15-19, 2000.1
- 10) 十代田知三、木村綾子:非破壊試験によるコンクリートの早期品質検査手法の提案、コンクリート工学論文集、Vol.9, No.1, pp.11-19, 1998
- 11) コンキッ ヴォラプタポーン、十代田知三、枝広英俊、平山健二:非破壊試験によるコンクリートの早期品質検査方法に関する研究、コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集、pp.85-92, 1998.12
- 12) 横尾和人、十代田知三、小林幸一:鉄筋コンクリート造建物の一調査報告、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.613-614, 1987.10
- 13) 十代田知三、野崎喜嗣、小林幸一: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-、日本建築学会構造系論文集、No.428, pp.25-33, 1991
- 14) 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
- 15) K.Voraputhapom, 十代田知三:コンクリートの複合非破壊試験法の検討-反発度と音速との関係から-、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1119-1120, 1998.9
- 16) Elvery, R.H. and Ibrahim, L.A.M.:Ultrasonic Assessment of Concrete Strength at Early Ages, Magazine of Concrete Research, Vol.28, No.97, pp.181-190, 1976
- 17) Kakuta, S. and Kojima, T.:Evaluation of Very Early Age Concrete Using a Wave Propagation Method, Proceedings 14, RILEM Symposium on Quality Control of Concrete Structures, pp.167, 1991
- 18) Soshiroda, T. and Voraputhapom, K.: Optimum testing age for nondestructive evaluation of concrete quality - Approach to earlier inspection -, Non-destructive Testing and Experimental Stress Analysis of Concrete Structures, Proceedings of the 7th International EXPERTCENTRUM Conference, Košice, Slovakia, pp.42-47, 1998.10
- 19) 友澤史紀、他:RILEM シンポジウム「コンクリートの品質管理」(Stockholm)、1979、コンクリート工学、Vol.17, No.12, pp.41-42, 1979
- 20) 佐藤勝彦、十代田知三:コンクリート構造物における打継部の検査方法(続報)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.229-230, 1993
- 21) 十代田知三:コンクリート構造物打継部の検査方法に関する研究、平成 4 年度科学研究費補助金(一般研究 C)研究成果報告書

(2000年 3 月 10 日原稿受理, 2000年 8 月 10 日採用決定)