

論文

高強度コンクリートの強度推定式提案及び適用性評価

金武漢\*1・金容魯\*2・金載桓\*2・張鐘ホ\*2

要旨：韓国における高強度コンクリートの強度推定は，日本で提案された普通強度領域の強度推定式がそのまま用いられているので，強度推定の信頼性などに問題点が残っている．本研究では韓国実情に適用可能な高強度コンクリートの強度推定式を提案した後，その式を用いて模擬部材の強度を評価し，提案された強度推定式の現場適用性を試みた．その結果，反発度法による高強度コンクリートの強度推定式の場合でも，実測値と推定値との差が少く現われ，その適用が有効であると考えられる．

キーワード：高強度コンクリート，強度推定式，反発度法，超音波速度法，複合法，模擬部材

1. はじめに

高強度コンクリートは高強度・高耐久性を実現できる材料として注目を集めており、欧米や日本などでは、20 年前から実際に利用されている<sup>1)</sup>。近年韓国においても、超高層コンクリート構造物などに用いられており、その需要はもっと増加すると期待されている<sup>2)</sup>。

一方、韓国の高強度コンクリートに関する研究は、ほとんど調合特性や力学的特性などに集中されているため、高強度コンクリート構造物の品質管理、維持管理及び安全診断をするのに必要な非破壊検査方法については、あまり研究されていない状況である。しかも、韓国で用いられている高強度コンクリートの強度推定式は、日本で提案された普通強度領域の強度推定式であるので、高強度コンクリート構造物の非破壊検査を行う場合、強度推定結果の信頼性などに問題点が提起されている<sup>3), 4), 5)</sup>。

従って、本研究では忠南大学校建設材料・施工学研究室で 1990 年から 2002 年までに作製された高強度コンクリートのデータを対象とし、統計的な評価を加え、韓国実情に適用可能な高強度コンクリートの強度推定式を提案した後、その式を用いて高強度コンクリートの模擬部材の強度を評価し、提案された高強度コンクリートの強度推定式の現

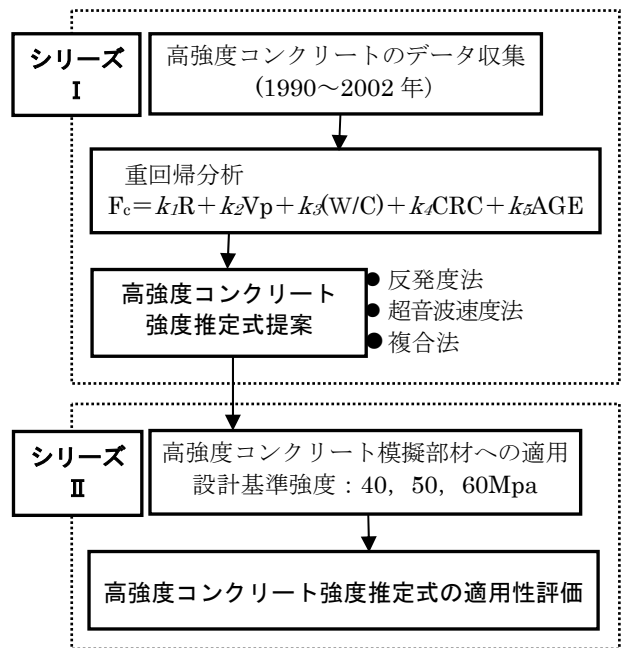


図-1 研究のフロー

場適用時，強度推定精度について検討した。

2. 研究概要

2.1 研究計画

本研究のフローを図-1に示す。シリーズ I では高強度コンクリートのデータを収集した後、重回帰分析を行って反発度法と超音波速度法および複合法による高強度コンクリート強度推定式を提案した。なお、シリーズ II では設計基準強度の 40,

\*1 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科, 教授・工博 (正会員)

\*2 大韓民国 忠南大学校大学院 建築工学科, 博士課程

表-1 使用材料の物理的性質

種類	シリーズ I	シリーズ II
セメント	・種類：普通ポルトランドセメント ・比重：3.14～3.16, ・比表面積：3,310～3,630cm <sup>2</sup> /g	・種類：普通ポルトランドセメント ・比重：3.15, ・比表面積：3,680cm <sup>2</sup> /g
混和材	・種類：フライアッシュ, ・比重：2.12～2.14 ・種類：高炉スラグ微粉末, ・比重：2.99	・種類：フライアッシュ, ・比重：2.13, ・比表面積：2,976cm <sup>2</sup> /g
細骨材	・種類：川砂, 海砂 ・比重：2.54～2.62 ・粗粒率：2.60～3.04	・種類：海砂 ・比重：2.56 ・粗粒率：3.04
粗骨材	・種類：碎石 ・比重：2.56～2.65 ・最大寸法：20, 25mm	・種類：碎石 ・比重：2.60 ・最大寸法：20mm
混和剤	・種類：ナフタレン系, メラミン系, ポリカルボン酸系 高性能減水剤	・種類：ナフタレン系高性能減水剤

表-2 模擬部材のコンクリート調合

設計基準 強度 (Mpa)	W/B (%)	フライアッシュ 置換率 (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					測定項目
				水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	
60	30	15	43	175	496	88	657	901	・圧縮強度 (Mpa) ・反発度 (R) ・超音波速度 (km/sec) (材齢: 7, 14, 28, 56, 91 日)
50	35			175	425	75	688	944	
40	40			175	372	66	711	976	

50, 60Mpa 水準の高強度コンクリート模擬部材にシリーズ I で提案した高強度コンクリート強度推定式の現場適用時、強度推定精度について検討した。

## 2.2 使用材料及び調合

本研究で使用した使用材料を表-1 に示す。なお、本研究で提案した強度推定式の適用性を検討するための模擬部材のコンクリート調合を表-2 に示す。

## 2.3 模擬部材の作製

高強度コンクリート強度推定式の適用性を検討するための模擬部材の作製は、図-2 に示すように 60×60×60cm の型枠を用いて、練り混ぜ直後にコンクリートを打込み後材齢 3 日に型枠を脱型し、写真-1 に示すように圧縮強度および超音波速度を測定するために各材齢別に φ10×20cm のコア供試体を模擬部材から採取した。

## 2.4 模擬部材の試験方法

模擬部材の反発度測定には N 型シュミットハンマーが用いられた。シュミットハンマーの打撃は水平方向に打撃した。なお、模擬部材からコア供試体を採取して超音波速度を測定した後 JIS A 1108 の規定に準じて圧縮強度を測定した。

表-3 調査データの概要(シリーズ I)

項目	調査データの範囲および数
水結合材比 (%)	20 (6 個), 25 (297 個), 30 (215 個) 35 (293 個), 40 (398 個), 45 (32 個)
養生方法	水中養生 (970 個) 気中養生 (271 個)
材齢 (日)	1 (31 個), 3 (141 個), 7 (328 個) 28 (362 個), 56 (269 個), 91 (110 個)

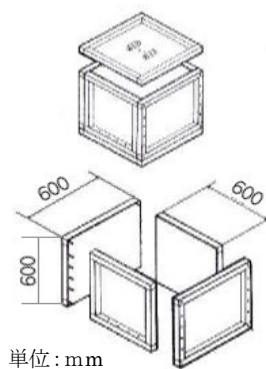


図-2 模擬部材の型枠



写真-1 コア採取

## 3. 調査データの概要及び水準

調査データの総個数は 1214 個に忠南大学建設材料・施工学研究室で 1990 年から 2002 年まで作製された高強度コンクリートを対象とした。表-3 に調査データの概要を示す。

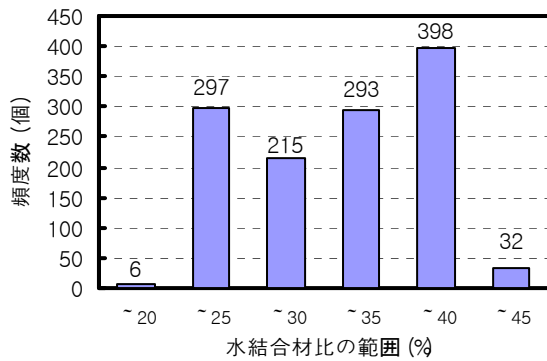


図-3 水結合材比の分布

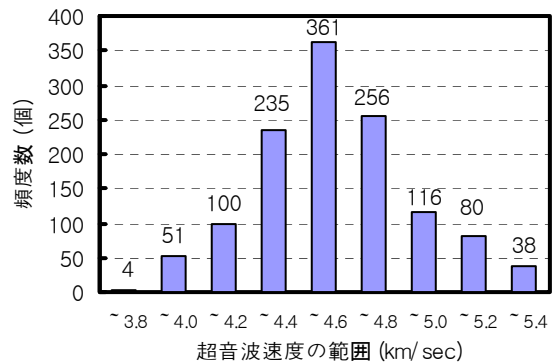


図-5 超音波速度の分布

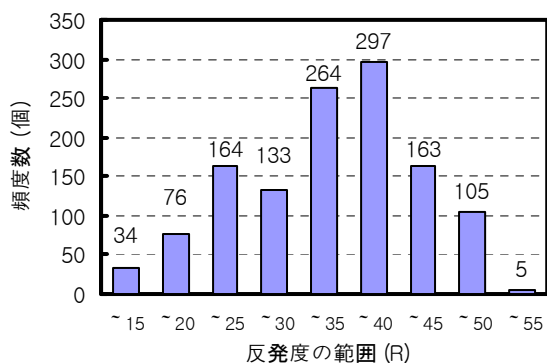


図-4 反発度の分布

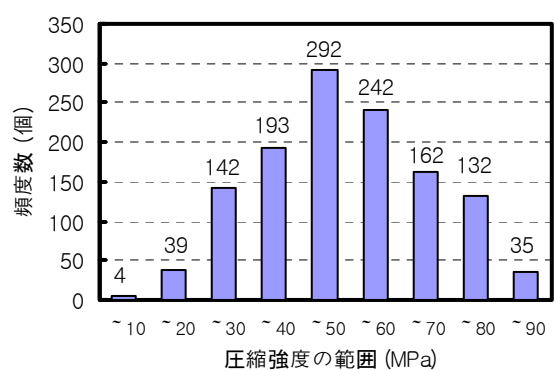


図-6 圧縮強度の分布

### 3.1 水結合材比の分布

図-3 に水結合材比の分布を示すように調査データは水結合材比 20~45%水準の高強度コンクリートを対象とした。

### 3.2 反発度、超音波速度及び圧縮強度の分布

図-4 および図-5 には反発度および超音波速度の分布を示す。反発度は最低 10 から最高 51 まで分布しており、主に 30~45 の範囲に分布している。なお、超音波速度は最低 3.70 から最高 5.43 まで分布しており、主に 4.20~4.80 の範囲に分布している。

図-6 に圧縮強度の分布を示すように圧縮強度の場合、727 個のデータが 40~60Mpa の範囲にあり、全体の約 60%を占めている。

## 4. 研究結果及び考察

### 4.1 高強度コンクリートの強度推定式提案(シリーズ I)

本研究では、既往の研究結果を参考にして、式(1)を用いて調査データの重回帰分析を行った。なお、高強度コンクリートの材齢による影響を検討するため、圧縮強度 40Mpa 以下のデータも包含して重回帰分析を行った。

重回帰分析は、まず圧縮強度と反発度および超音波速度との相関係数を求め、式(1)示す順序で変数を順次追加した場合の重相関係数を求める方法によって行った。表-4 に重回帰分析の結果を示す。

表-4 重回帰分析の結果

実験定数						重相関係数 (CR)	標準誤差	決定係数 (CR <sup>2</sup> )
$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$C$			
1.43	—	—	—	—	0.81	0.7671	10.821	0.5882
—	33.53	—	—	—	-103.38	0.6269	13.144	0.3925
1.16	19.34	—	—	—	-77.86	0.8322	9.361	0.6925
0.78	18.69	-1.02	—	—	-28.00	0.8864	7.819	0.7856
0.92	17.27	-0.97	4.83	—	-33.64	0.8923	7.627	0.7961
0.49	8.00	-1.14	0.94	0.29	23.92	0.9632	4.544	0.9277

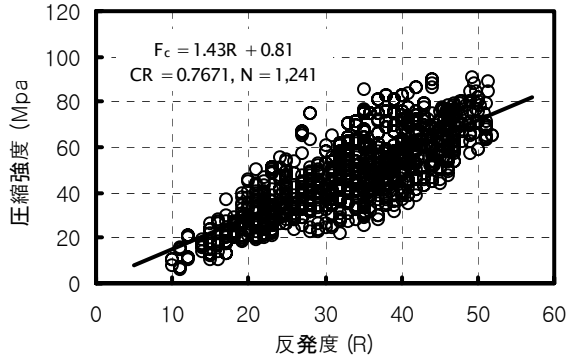
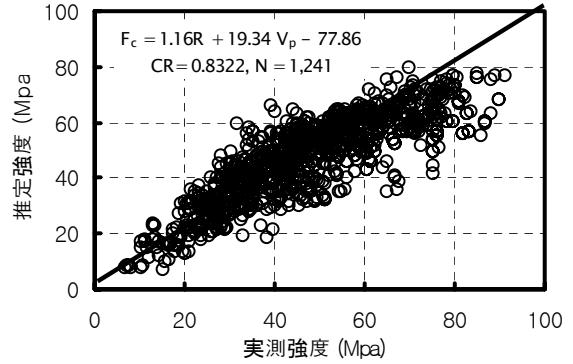


図-7 反発度と圧縮強度の関係



(a) 反発度と超音波速度

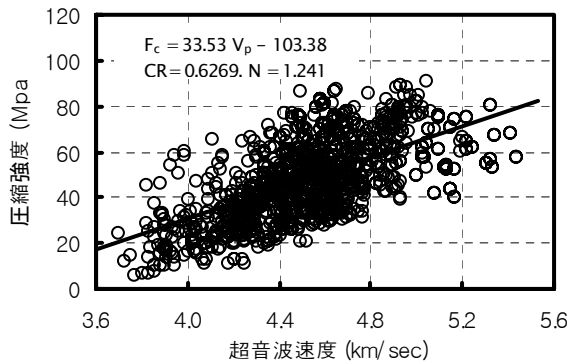
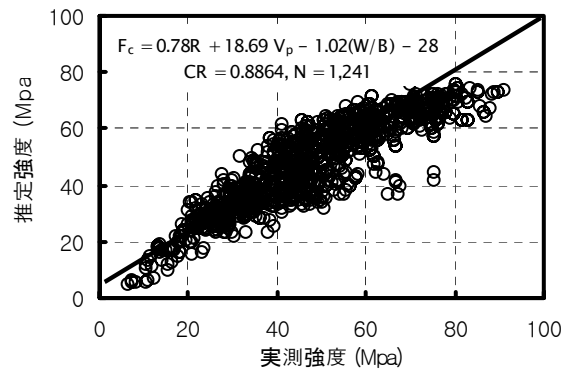


図-8 超音波速度と圧縮強度の関係



(b) 反発度, 超音波速度と水結合材比

$$F_c = k_1 R + k_2 V_p + k_3 (W/B) + k_4 CRC + k_5 AGE + C \quad \dots \text{式(1)}$$

ただし,  $F_c$ : 圧縮強度 (Mpa)

$R$ : 反発度

$V_p$ : 超音波速度 (km/sec)

$W/B$ : 水結合材比 (%)

$CRC$ : 養生条件 (水中養生:1, 気中養生:2)

$AGE$ : 材齢 (日)

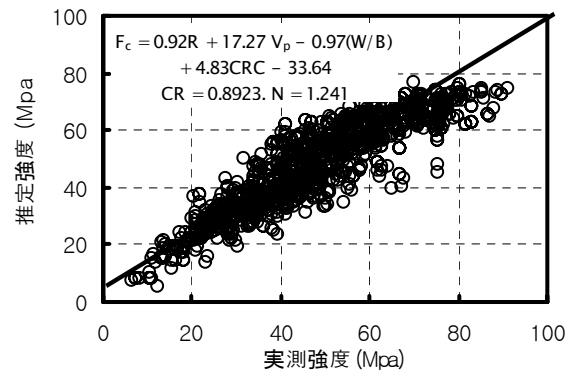
$k_1 \sim k_5, C$ : 実験定数

図-7 は調査データの反発度と圧縮強度の関係を示しており, 相関係数は 0.7671 に現われる. 反発度による強度推定式を式(2)に示す.

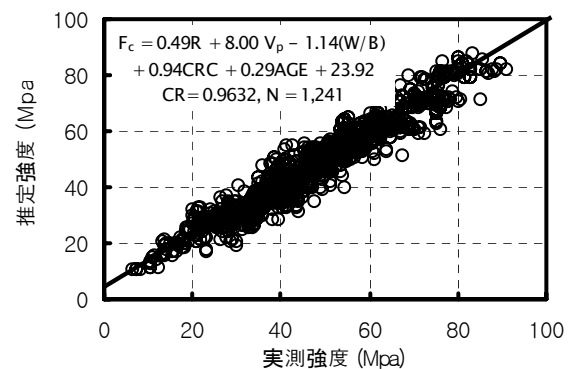
$$F_c = 1.43R + 0.81 \quad (CR = 0.7671) \quad \dots \text{式(2)}$$

図-8 は調査データの超音波速度と圧縮強度の関係を示しており, 相関係数は 0.6269 の低い値が現れる. なお, 本研究では超音波速度による強度推定式と実測強度のばらつきが大きく現われる, 超音波速度のみでコンクリートの圧縮強度を推定することは難しいと判断された. 超音波速度による強度推定式を式(3)に示す.

$$F_c = 33.53V_p - 103.38 \quad (CR = 0.6269) \quad \dots \text{式(3)}$$



(c) 反発度, 超音波速度, 水結合材比と養生条件



(d) 反発度, 超音波速度, 水結合材比, 養生条件と材齢

図-9 実測強度と複合法による推定強度の関係

図-9 は実測強度と複合法による推定強度の関係を示す。反発度および超音波速度の単独より、変数を追加して重回帰分析を行うほど相関係数が高く現われ強度推定精度が向上されると考えられる。

なお、反発度および超音波速度の単独より、複合法のほうが強度推定において精度よく評価されると考えられる。

図-9(a) は実測強度と反発度・超音波速度の複合法による推定強度を示しており、相関係数は0.8332 を現わす。反発度と超音波速度による強度

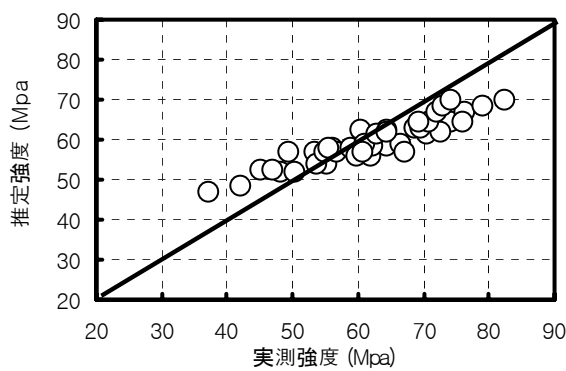
推定式を式(4)に示す。

$$F_c = 1.16R + 19.34V_p - 77.86 \quad (CR=0.8322) \quad \text{式(4)}$$

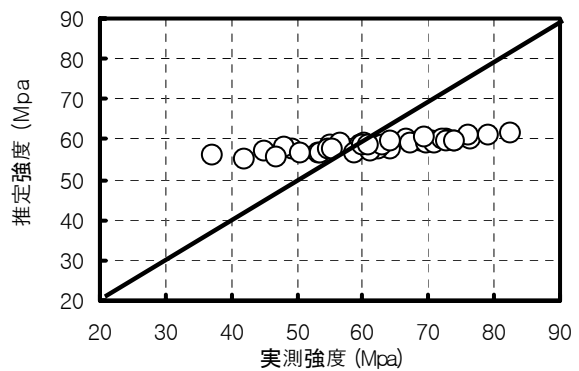
図-9(b) は実測強度と反発度・超音波速度・水結合材比の複合法による推定強度の関係を示しており、相関係数が0.8864に高く現われる。重回帰分析によって得られた強度推定式を式(5)に示す。

$$F_c = 0.78R + 18.69V_p - 1.02(W/B) - 28.00 \quad (CR=0.8322) \quad \text{式(5)}$$

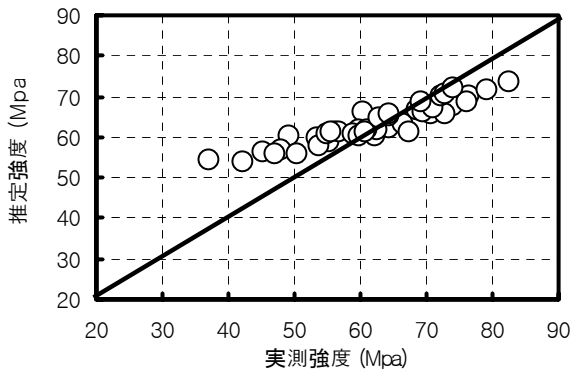
図-9(c) は実測強度と反発度・超音波速度・水結合材比・養生条件の複合法による推定強度の関係



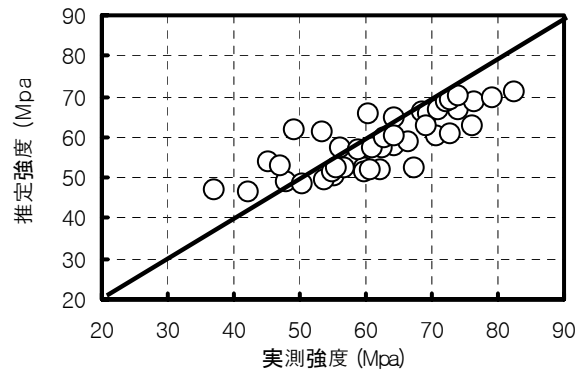
(a) 反発度



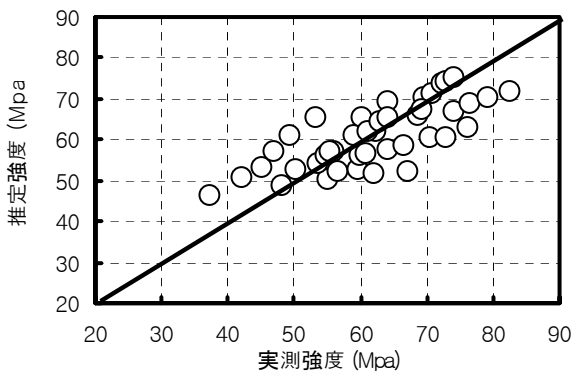
(b) 超音波速度



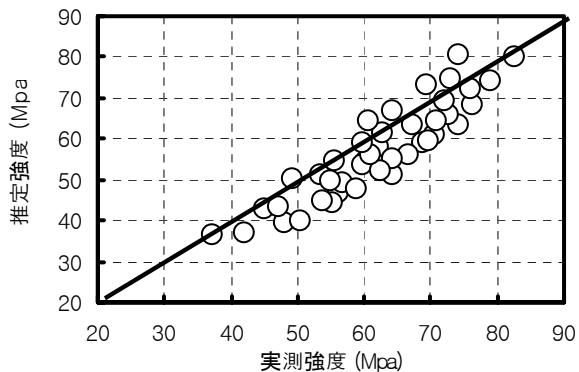
(c) 反発度と超音波速度



(d) 反発度, 超音波速度と水結合材比



(e) 反発度, 超音波速度, 水結合材比と養生条件



(d) 反発度, 超音波速度, 水結合材比, 養生条件と材齢

図-10 模擬部材の実測強度と本研究で提案した強度推定式による推定強度の関係

を示しており、相関係数が 0.8923 の値を現わす。重回帰分析によって得られた強度推定式を式(6)に示す。

$$F_c = 0.92R + 17.27V_p - 0.97(W/B) + 4.83CRC - 33.64 \quad (CR=0.8864) \quad \dots\dots\dots \text{式(6)}$$

図-9(d)は実測強度と反発度・超音波速度・水結合材比・養生条件・材齢の複合法による推定強度の関係を示す。相関係数が 0.9632 となり、強度推定精度が非常に向上することが分かる。重回帰分析によって得られた強度推定式を式(7)に示す。

$$F_c = 0.49R + 8.00V_p - 1.14(W/B) + 0.94CRC + 0.29AGE + 23.92 \quad (CR=0.9632) \quad \dots\dots \text{式(7)}$$

#### 4.2 高強度コンクリートの強度推定式の提案適用性(シリーズII)

図-10 は模擬部材の実測強度とシリーズIで提案した強度推定式によって求めた推定強度の関係を示したものである。反発度による強度推定式の場合、図-10(a)で示すように実測値と推定値との差が少く現われ、本研究で提案した強度推定式を用いて高強度コンクリートの圧縮強度を推定することが可能であると考えられる。

超音波速度による強度推定式の場合、図-10(b)で示すように強度推定精度が非常に低く現われる。また、反発度と超音波速度による強度推定式の場合、図-10(c)で示すように圧縮強度 60Mpa 以下の範囲で、推定強度が実測強度より多少高く評価されていることが分かる。

なお、水結合材比、養生条件および材齢の変数を追加した複合法の場合、図-10(d)～(f)で示すように変数を追加するほど強度推定精度が格段に向上することが分かる。

#### 5. まとめ

高強度コンクリートの強度推定式提案及び適用性評価に関する研究の結果、本研究の範囲では次のような結論が得られた。

(1) 高強度コンクリートの強度推定式を下のよう

区分		強度推定式
反発度法		$F_c = 1.43R + 0.81$
超音波速度法		$F_c = 33.53V_p - 103.38$
複合法	①+②	$F_c = 1.16R + 19.34V_p - 77.86$
	①+②+③	$F_c = 0.78R + 18.69V_p - 1.02(W/B) - 28.00$
	①+②+③+④	$F_c = 0.92R + 17.27V_p - 0.97(W/B) + 4.83CRC - 33.64$
	①+②+③+④+⑤	$F_c = 0.49R + 8.00V_p - 1.14(W/B) + 0.94CRC + 0.29AGE + 23.92$

①反発度, ②超音波速度, ③水結合材比, ④養生条件, ⑤材齢

- (2) 重回帰分析による強度推定式の場合、水結合材比、養生条件および材齢の変数を順次に追加するほど強度推定精度が格段に向上することが分かる。
- (3) 高強度コンクリートの強度推定式の適用性評価結果、本研究で提案した反発度法による強度推定式を用いて高強度コンクリートの圧縮強度を推定することが可能であると考えられる。

#### 参考文献

1. 日本コンクリート工学協会, “コンクリートの非破壊試験法—研究委員会報告書”, 1992. 3
2. Moo Han Kim et al, “A Study on the Non-Destructive Testing Method on the Estimation of the Compressive Strength Concrete”, Journal of the KSMI, Vol. 1, No. 1, 1997. 6, pp. 97~105
3. 小版義夫, 谷川恭雄, “コンクリートの非破壊試験方法に関する研究の動向”, コンクリート工学, Vol. 18, No. 1, 1980
4. RILEM CNDT-Committee, “RILEM Tentative Recommendations for In-situ Concrete Strength Determination by Non-Destructive Combined Method (First draft)”, May, 1980
5. 飛板基夫, “高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす各種要因の影響”, セメント・コンクリート, No. 394, 1979. 12, pp. 30~33
6. 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法マニュアル”, 1983