高強度コンクリートの強度推定に関する研究

— マスコンクリート模擬部材を用いた各種非破壊試験方法に関する実験的検討 —

大池 武 — * 1 日野吉彦 — * 2
池内俊之 — * 3 安富陽子 — * 4

キーワード：
マスコンクリート, 高強度コンクリート, 強度推定, 非破壊試験, 模擬部材, 回帰分析, 寄与率

Keywords:
Mass concrete, High strength concrete, Estimating strength, Non-destructive test, Mock-up specimen, Regression analysis, Contribution ratio

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の健全性に関する社会的な説明責任を果たす為、既設構造物のコンクリート強度を定量的に把握することは非常に重要となっている。現在、構造体コンクリートの圧縮強度の非破壊試験方法としてはリバウンドハンマーによる反発度法¹⁾が一般に採用されている。その適用範囲は強度 60N/mm² 程度が上限とされているが、現実的には超高層建築物などで設計基準強度が 60N/mm² を上回るものもある。一方、60N/mm² を超える高強度域での非破壊試験方法に関する研究例²⁾は豊富であるとは言えない現状もある。

このような状況を踏まえ、本研究は、構造体コンクリート強度 100N/mm² 程度までの高強度コンクリートの非破壊試験による強度推定方法を確立することを最終的な目的としている。

筆者らは、これまでに、管理用供試体強度と各種非破壊試験の関係³⁾、壁模擬部材を用いた非破壊試験への鉄筋の影響⁴⁾、壁模擬部材における各種非破壊試験とコア強度の関係等^{5), 6)}について報告を行ってきており、引続きマスコンクリート壁を模擬した部材(以下、模擬部材)を用いた各種非破壊試験とコア強度の関係について研究を進めている。本報告では、この研究の材齢3年までの試験結果から、非破壊試験結果とコア供試体圧縮強度の関係において明らかにした成果を報告する。

2. 実験概要

実験の要因は、コンクリートの調合(水結合材比(W/B))とし、超高強度域を包含できるように W/B=30% (想定設計基準強度 60N/mm²)、

STUDY ON ESTIMATING STRENGTH OF HIGH STRENGTH CONCRETE

— Experimental studies of several non-destructive test for concrete using mock-up mass concrete specimen —

Takeshi OHIKE — * 1 Yoshihiko HINO — * 2
Toshiyuki IKEUCHI — * 3 Yoko YASUTOMI — * 4

The purpose of this study is to establish strength estimation method for high strength construction concrete whose strength is below 100N/mm² using non-destructive test. Experimental studies of non-destructive test and concrete core strength are carried out and the following conclusions are drawn in this research. It is confirmed that several multi-regression analysis using combinations of several single non-destructive test results are examined in this study. The analysis shows that the combination of rebound-hammer method and elastic-wave propagation method gives more accurate estimation equations in the concrete strength range of over 60N/mm² than single rebound-hammer method.

W/B=40% (同 45N/mm²)、W/B=50% (同 30N/mm²) の3水準としている。

2.1 模擬部材

模擬部材の概要を表1に示す。

実験の要因とした水結合材比毎に模擬部材を製作している。ただし、W/B=40%の模擬部材は2体とし、合計4体を製作し実験を行っている。

模擬部材のコンクリートの打込みは、冬期(2006年1月中旬)に

表1 模擬部材の概要

項目	備考
調合 (W/B)	水結合材比: 30%、40%、50%
模擬部材製作数	W/B=30%: 1体 W/B=40%: 2体 W/B=50%: 1体
模擬部材寸法	幅 2.325m、高さ 2.25m、厚さ 1.3m
配筋	横筋: D38@225 縦筋: 外側D38@310
コンクリート打込み季節	冬期
暴露場所	東京都清瀬市

図1 模擬部材形状・寸法

^{*1} ㈱大林組技術研究所技術開発サポート部 課長
(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

^{*2} ㈱大林組原子力本部技術部 副主査・修士(工学)

^{*3} 関西電力㈱土木建築室 リーダー・博士(工学)

^{*4} 関西電力㈱土木建築室

^{*1} Section Manager, R&D Promotion Dept., Technical Research Institute, Obayashi Corporation

^{*2} Deputy Manager, Engineering Dept., Nuclear Facilities Division, Obayashi Corporation, M. Eng.

^{*3} Assistant Manager, Office of Civil Engineering and Architecture, The Kansai Electric Power Co., Inc., Ph. D.

^{*4} Office of Civil Engineering and Architecture, The Kansai Electric Power Co., Inc.

行っている。なお、模擬部材は、構造体からその一部を切り出した状況を再現するため、コンクリート打込みから2週間、測定面および裏面を除く4面（上面、底面、両側面）を厚さ20cmの断熱材で覆い、養生している。また、模擬部材の暴露場所は、東京都清瀬市である。

図1に、模擬部材の形状・寸法、配筋を示す。また、図中には直径100φコア（以後、標準コア）と直径50φコア、直径26φコア（以後、小径コア）の採取位置も併せて示している。なお、配筋は非破壊試験を実施する面にも配置しており、かぶり厚さは96mmである。

2.2 使用材料とコンクリートの調合

使用材料を表2に示す。想定設計基準強度が最大60N/mm²のマスコンクリートであることを考慮して、セメントは中庸熱ポルトランドセメントとし、結合材としてフライアッシュを20%内割置換している。

実験に用いたコンクリートの調合を表3に示す。表3にはフレッシュコンクリートの試験結果も併せて示している。

コンクリートの目標性能は、W/B=40%と50%はスランプ15±2.5cm、空気量4.5±1.5%、W/B=30%はスランプフロー55±10cm、空気量4.5±1.5%である。

2.3 試験項目および試験方法

試験項目と試験材齢を表4に示す。非破壊試験は、超音波伝播速度、弾性波伝播速度、反発度としている。微破壊試験として小径コアの圧縮強度も実施している。なお、非破壊試験は、図1に示すコア採取位置近傍で実施しており、標準コアと小径コアの供試体採取位置は、図2を標準としている。

標準コアの試験材齢は、材齢4週、13週、26週、1年、2年、3年の6材齢としている。また、模擬部材と同時に作製した円柱供試体（直径100φ、標準養生、以後、管理用供試体）は、上記に加え材齢3日、5日、1週についても試験を実施している。

使用機器と試験方法を表3に示す。非破壊試験は、既往の研究^{7), 8), 9)}などを参考に、複数の手法・機器を採用している。具体的には、超音波伝播速度2機種、弾性波伝播速度4方法、反発度法2機種である。各機器の試験方法は、JIS規格があるものはJIS規格に準じることとし、JIS規格がないものはメーカーの推奨測定方法あるいは開発提案による測定方法を採用している。

超音波、弾性波伝播速度は、同一面2点間の伝播速度（以後、表面伝播速度）、表裏壁面間の伝播速度（以後、透過伝播速度）を測定している。なお、筆者ら⁴⁾が壁模擬部材で対象としていた反射波伝播速度は、模擬部材の壁厚が1.3mと厚いため測定できなかったため本報告では対象外としている。

弾性波伝播速度には、「地盤の弾性波速度検層方法」^{10), 11)}を応用し、構造体コンクリートの原位置における動弾性係数を求めるD法も含めている。このD法の測定では、図3に示すようにセンサー設置間隔が50cmであることから、1模擬部材、1材齢における標準コア抜き位置（水平方向3箇所）について1データを取得できるのみである。一方、超音波、弾性波ならびに反発度法は、1本の標準コア採取位置で1個のデータが取得できる。従って、D法でのデータ取得は、超音波伝播速度などの3分の1になっている。このため、後述の回帰分析におけるD法を含めた検討では、標準コア強度、超音波伝播速度等のデータは、水平方向3箇所のデータの平均値を求

表 2 使用材料

材料	備考
セメント	中庸熱ポルトランドセメント（密度：3.21g/cm ³ ）
水	地下水
細骨材①	砕砂（栃木県栃木市鍋山町産） 密度：2.66g/cm ³ 粗粒率：3.20
細骨材②	山砂（千葉県香取郡大栄町産） 密度：2.59g/cm ³ 粗粒率：1.80
粗骨材	硬質砂岩砕石（埼玉県両神産） 密度：2.70g/cm ³ 実積率：58.8%
フライアッシュ	JIS II 種品（密度：2.23g/cm ³ 、比表面積：3890cm ² /g）
混和剤	高性能AE減水剤（標準型）（ポリカルボン酸系）

表 3 コンクリートの調合

調合 (W/B)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)						フレッシュコンクリートの性質			
		水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	混和剤	スランプ・スランプフロー (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	コンクリート温度 (℃)
50%	49.7	165	264	66	889	921	2.145	15.5	4.0	2,296	10.3
40%	46.6	165	330	83	800	937	2.478	17.5	4.3	2,301	10.9
30%	44.5	170	454	113	698	888	7.371	48.0×47.5	4.8	2,324	13.7

表 4 試験項目と試験材齢

項目	内 容
試験項目	非破壊試験 超音波伝播速度（表面伝播速度、透過伝播速度） 弾性波伝播速度（表面伝播速度、透過伝播速度） 反発度
	標準コア 直径100φコア：圧縮強度、動弾性係数、静弾性係数
	小径コア 直径50φ、26φコア：圧縮強度
	管理用供試体 圧縮強度、動弾性係数、静弾性係数
試験材齢	管理用供試体 3日、5日、1週、4週、13週、26週、1年、2年、3年
	コア供試体 4週、13週、26週、1年、2年、3年

図 2 コア供試体採取位置

表 5 使用機器と試験方法

試験項目	略称	機器仕様等	試験方法
超音波伝播速度	T社品	探触子：ひび割れ・音速センサ 振動数：28Hz（パルス型電圧）	メーカー推奨測定方法
	H社品	探触子：ステップ関数型探触子 振動数：広帯域周波数（ステップ型電圧）	メーカー推奨測定方法
弾性波伝播速度	T法	探触子：厚さセンサ 振動数：2～8Hzの擬似広帯域波	メーカー推奨測定方法
	H法	打撃具：φ10mm鋼球 振動数：10kHz程度 受信センサ：広帯域AEセンサ	開発提案測定方法
	I法	打撃具：φ9.5mm鋼球 振動数：最大30kHz程度 受信センサ：圧電センサ	ASTM C1383-04
	D法	打撃具：ハンマー 周波数：1～2kHz程度 受信センサ：圧電型加速度センサ	開発提案測定方法（P波速度（側線方向打撃）、S波速度（側線と直行方向打撃）から動弾性係数を推定）
反発度	SH法	シュミットハンマー	JIS A 1155
	SRH法	シュミットロックハンマー	JIS A 1155に準じる
圧縮強度	—	3000kN万能試験機（標準コア） 200kN試験機（小径コア）	JIS A 1107 小径コアはソトアソグ協会法
動弾性係数	—	共鳴振動法非破壊試験機	JIS A 1127
静弾性係数	—	コンプレッソメーター	JIS A 1149

図 3 D法測定方法

めて検討している。

また、反発度法は、一般的なりバウンドハンマー（SH法）に加え、岩盤の圧縮強度、静弾性係数の非破壊試験に用いられるなりバウンドハ

ンマー（SRH 法）も加えている。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度発現性状

管理用供試体の圧縮強度発現性状を図4に、標準コアのそれを図5にそれぞれ示す。なお、図5では、標準コアの強度は水平方向3箇所の平均値をプロットしている。なおかつ、W/B=40%模擬部材のプロットは、2模擬部材の平均値としている。

管理用供試体の強度発現は、全調合とも材齢の経過に伴い順調な強度発現を示しているが、材齢1年以降の強度増進は小さく、材齢2年以降は横ばい状態にある。標準コアの強度発現は、ほぼ管理用供試体と同様なことが言える。ただし、強度レベルは管理用供試体に比べやや小さい。また、標準コア強度のバラツキは、管理用供試体のそれに比べ大きくなる傾向が見られている。

図6と図7には、材齢4週と材齢3年の模擬部材断面内の強度分布を示す。プロットの方法は図5と同様である。

これらの図から、W/B=40%、W/B=30%の場合は、初期材齢ではW/B=50%と同様に断面内の強度差はないが、長期材齢の材齢3年では表面部の標準コア強度が高く、表面に比べて断面内部の強度増進は小さくなる傾向が見られている。一方、W/B=50%の場合は、材齢が異なっても断面内の強度差は見られず、コンクリートの調合、材齢によって断面内の強度分布に相違があることがわかる。この傾向は、文献¹²⁾で指摘される傾向と同じである。このように、コンクリート強度が高強度になるほど構造体コンクリートの断面内には強度分布が生じることがわかる。

3.2 圧縮強度と動弾性係数の関係

管理用供試体圧縮強度と動弾性係数の指数関数による単回帰分析結果を図8に示す。同様に、指数関数による標準コアの断面平均コア強度（1箇所）と動弾性係数の単回帰分析結果を図9に示す。これらの図には95%信頼区間を併せて示している。なお、これ以降の回帰分析は材齢3年までに得られた全てのデータを対象としている。

管理用供試体圧縮強度と動弾性係数の関係は、寄与率（決定係数）で0.975と極めて高い相関関係にあることがわかる。一方、標準コア強度と動弾性係数の関係は、管理用供試体のそれに比べると小さくなるものの、寄与率で0.772と高い相関関係にある。一般にコンクリートの圧縮強度と動弾性係数の間には高い相関関係が認められており¹³⁾、本実験で、圧縮強度が100N/mm²程度の超高強度域においても両者の関係を確認することができたと考える。

動弾性係数は超音波伝播速度および弾性波伝播速度と密接な関係にあることは周知である。また、反発度に関しても圧縮強度と相関関係にある。従って、超音波あるいは弾性波伝播速度や反発度は、動弾性係数と同様に高強度コンクリートの強度推定の有力な手段となりうると考えられる。また、一般的に超音波伝播速度と動弾性係数の関係は二次曲線で表されると指摘¹⁴⁾されており、本研究で対象としている高強度域では、文献¹⁴⁾等のデータからほぼ直線関係にあると判断している。これより、超音波伝播速度などは、動弾性係数とコンクリート強度との関係のように指数関数で近似できると考えられる。また、反発度とコンクリート強度との関係も同様に指数関数で近似することができる。以上から、以降では超音波と弾性波の伝播速度および反発度に関しては、対応するコア強度を自然対数

図4 強度発現性状（管理用供試体）

図5 強度発現性状（標準コア供試体）

図6 断面内強度分布（材齢4週）

図7 断面内強度分布（材齢3年）

図8 圧縮強度と動弾性係数の関係（管理用供試体）

図9 圧縮強度と動弾性係数の関係（標準コア供試体）

表6 単回帰分析結果（寄与率）

非破壊検査手法		標準コア採取1箇所		標準コア採取3箇所平均	
		断面平均コア強度(1箇所)	表面部コア強度	断面平均コア強度(3箇所)	表面部コア強度(3箇所)
超音波伝播速度	T社品表面伝播速度	0.025	0.046	0.030	0.055
	T社品透過伝播速度	0.925	0.876	0.947	0.922
	H社品表面伝播速度	0.008	0.003	0.008	0.002
	H社品透過伝播速度	0.946	0.891	0.967	0.936
弾性波伝播速度	H法表面伝播速度	0.019	0.031	0.028	0.055
	H法透過伝播速度	0.393	0.364	0.433	0.405
	I法表面伝播速度	0.015	0.017	0.056	0.063
	D法P波速度	—	—	0.529	0.583
	D法S波速度	—	—	0.398	0.447
反発度	D法推定動弾性	—	—	0.432	0.484
	SH法	0.734	0.690	0.759	0.716
小径コア強度	SRH法	0.836	0.788	0.862	0.827
	50φコア	0.891	0.884	0.913	0.921
	26φコア	0.658	0.647	0.765	0.786

に変数変換して、直線近似させることとする。

3.3 単回帰分析結果

単回帰分析は、断面平均コア強度（図2に示した同一標準コアから採取したコア供試体5体の平均値）と非破壊試験を実施した表面部コア強度（図2のNo.1コア供試体の強度）を従属変数として実施している。また、標準コア強度は、2.3で示したように標準コア採取位置毎の場合（以後、1箇所）と、水平方向3箇所平均値の場合

(以後、3箇所)の2ケースで扱っている。なお、標準コア強度は前述の通り自然対数に変数変換して回帰分析を行っている。

単回帰分析結果における寄与率を一覧として表6に示す。

単回帰分析における寄与率は、標準コア採取1箇所 비해3箇所平均のほうが大きくなっている。これは、平均値を用いることでばらつきが小さくなっているためと考えられる。

(1) 超音波伝播速度

表6から、超音波の表面伝播速度と標準コア強度(1箇所)との関係は、T社、H社共に、断面平均コア強度(1箇所)、表面部コア強度(1箇所)のいずれとも相関関係は小さい結果となっている。一方、透過伝播速度と断面平均コア強度(1箇所)との相関関係は、T社、H社共に、極めて高い相関関係にあることがわかる。H社透過伝播速度と断面平均コア強度(1箇所)の関係を図10に一例として示す。

(2) 弾性波伝播速度

表6から、弾性波の表面伝播速度と標準コア強度(1箇所)の関係は、H法、I法の表面伝播速度に関しては、超音波法と同様に、断面平均コア強度(1箇所)、表面部コア強度(1箇所)のいずれとも相関関係は小さい結果となっている。H法の透過伝播速度、D法のP波、S波速度、推定動弾性係数は、表面伝播速度に比べれば高い寄与率となっており、相関関係が認められる。D法のP波速度と断面平均コア強度(3箇所)の関係を図11に一例として示す。

(3) 反発度

SH法反発度と断面平均コア強度(1箇所)との関係を図12に示す。表6ならびに図12から、寄与率が0.734と比較的良好な相関関係にあることがわかる。SH法の強度推定はばらつきがあるものの低強度域での構造体コンクリートの強度推定に多用されていることは周知の通りである。一方、文献¹⁵⁾で指摘されるように、反発度の頭打ちは見られるが、標準コア強度を自然対数に変数変換して、直線近似させることで高強度域でも低強度域と同程度の精度で強度推定が可能であると考えられる。

また、SRH法反発度と断面平均コア強度(1箇所)との関係を図13に示す。表6ならびに図13から、SRH法は寄与率が0.836とSH法より高い断面平均コア強度(1箇所)との相関関係を示している。このようにSRH法反発度は、SH法に比べ高強度域でのばらつきが小さい傾向にあり、強度推定の一つの有効な手段となりうる結果を示している。

(4) 小径コア

50φ小径コア強度と断面平均コア強度(1箇所)との関係を図14に示す。断面平均コア強度(1箇所)、表面部コア強度(1箇所)との関係は、表6ならびに図14から、寄与率で0.89程度と極めて高い相関関係にあることがわかる。

これより、50φ小径コア強度による構造体コンクリートの強度推定は、高い推定精度を確保できると言える。また、JIS A 1107では採取するコアの直径は、粗骨材最大寸法の3倍以下としてはならないことが規定されているが、今回の結果は、採取するコアの直径は粗骨材の最大寸法の2倍程度であっても、構造体コンクリートの評価が可能であることを示しているものと考えられる。

26φ小径コア強度と断面平均コア強度(1箇所)との関係を図15に示す。断面平均コア強度(1箇所)、表面部コア強度(1箇所)と

図10 H社透過伝播速度と断面平均コア強度(1箇所)の関係

図11 D法P波速度と断面平均コア強度(3箇所)の関係

図12 SH法反発度と断面平均コア強度(1箇所)の関係

図13 SRH法反発度と断面平均コア強度(1箇所)の関係

図14 50φ小径コア強度と断面平均コア強度(1箇所)の関係

図15 26φ小径コア強度と断面平均コア強度(1箇所)の関係

図16 寄与率の推移 (超音波法)

図17 寄与率の推移 (弾性波法)

の関係は、表6ならびに図15から、寄与率で0.65程度と比較的良好な相関関係にあることがわかる。

なお、26φ小径コアの圧縮強度試験は、建築センターの建築物等の保全技術・技術審査証明を取得した「ソフトコアリング」の試験方法に従って強度試験を実施している。標準コア強度との相関関係は、試験結果の値をそのまま用いて検討している。また、本研究では審査証明の適用範囲である60N/mm²を超え約100N/mm²までの超高強度域までその適用を試みている。前述のように、標準コア強度と

は比較的良好な相関関係を示しているものの、技術審査証明を超える範囲での適用はさらに検討する必要があるものとする。

3.4 単回帰分析における寄与率の推移

強度推定に用いる非破壊試験手法は、構造物コンクリートとの相関が高く、かつ材齢が変化してもその相関が変化しないものが望ましいと考えられる。

主な非破壊試験手法の材齢の経過に伴う断面平均コア強度に対する寄与率の推移を図16～図19に示す。ここで、各材齢の寄与率は、材齢4週から当該材齢までの全てのデータを対象とした単回帰分析結果による寄与率である。

これらの図から、全体的に材齢を経ることによって寄与率が下がる傾向にあることがわかる。この原因として、材齢の経過に伴う各種試験結果のばらつきなどにより単回帰分析における寄与率を下げるデータが増加されるためと考えられるが、その傾向は手法毎に異なっている。

本模擬部材実験における寄与率の推移を見ると、超音波表面伝播速度（図16）と断面平均コア強度（1箇所）との相関関係は、材齢の経過に伴い寄与率が極端に低下している。これは、コンクリート表面の乾燥に伴い、超音波の伝播速度が影響を受けたためと考えられる。

弾性波伝播速度（図17）の寄与率の低下は、測定手法により大きく異なっている。H法、I法は、超音波表面伝播速度と同様に、比較的初期材齢から極端に低下している。これに対しD法のP波、S波速度は、材齢の経過に伴い徐々に低下し、低下の度合いも超音波表面伝播速度、H法、I法に比べ小さいことがわかる。これら弾性波伝播速度の寄与率の低下も超音波表面伝播速度と同様な原因が考えられるが、D法の場合は、コンクリート中のより内部を伝播する波の速度を計っていると考えられたため、他の手法に比べ低下の度合いが小さくなっていると考えられる。

反発度法（図18）もコンクリート表面の乾燥の影響を受けるが、寄与率の低下は小さく良好な相関関係を維持している。一方、コンクリート表面の乾燥の影響が少ない超音波透過伝播速度（図16）、50φ小径コア強度（図19）は材齢の経過に伴う寄与率の低下も少なく、極めて高い寄与率を維持している。また、26φ小径コア強度は、材齢1年前後で寄与率が回復するように見えるが、50φコアに比べ寄与率の低下が大きくなっている。これは、26φという小径コアであるがために強度試験実施技術者の熟練度の影響が考えられる。

3.5 複合法による重回帰分析結果

反発度と音速の複合法による強度推定については、これまでにいくつかの研究例^{16), 17)}があり、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法」¹⁸⁾においても非破壊試験方法の一つとして整備されている。ここでは、反発度法に超音波伝播速度、弾性波伝播速度を組み合わせることによる複合法による強度推定の精度の向上に対する効果について検討する。なお、ここで分析に用いたデータは、2.3で述べたように水平方向3箇所の平均値である。

複合法による重回帰分析結果の寄与率の一覧を表7に示す。表中の括弧内はSH法、SRH法のそれぞれの単回帰による寄与率からの増分である。また、一例として推定強度と断面平均コア強度（3箇所）の関係で整理したSH法反発度とH社品表面伝播速度、H社品透過伝

図18 寄与率の推移
(反発度法)

図19 寄与率の推移
(小径コア法)

表7 複合法による重回帰分析結果（寄与率）

X1		単回帰 (再掲)	X2											
			超音波伝播速度				弾性波伝播速度							
			T社品		H社品		H法		I法		D法			
反発度	SH法	0.759	表面伝播速度	透過伝播速度	表面伝播速度	透過伝播速度	表面伝播速度	透過伝播速度	表面伝播速度	推定動弾性係数	P波速度	S波速度		
			(0.093)	(0.195)	(0.038)	(0.212)	(0.065)	(0.000)	(0.033)	(0.159)	(0.180)	(0.144)		
			0.901	0.953	0.874	0.974	0.899	0.875	0.872	0.934	0.944	0.926		
SRH法	0.862	(0.039)	(0.091)	(0.012)	(0.112)	(0.037)	(0.013)	(0.010)	(0.072)	(0.082)	(0.064)			

注) ()内は、SH法、SRH法のそれぞれの単回帰による寄与率からの増分を示す。

図20 SH法反発度+H社品表面伝播速度の組合せによる推定強度と断面平均コア強度（3箇所）の関係

図21 SH法反発度+H社品透過伝播速度の組合せによる推定強度と断面平均コア強度（3箇所）の関係

図22 SH法反発度+D法P波速度の組合せによる推定強度と断面平均コア強度（3箇所）の関係

図23 SH法反発度+D法S波速度の組合せによる推定強度と断面平均コア強度（3箇所）の関係

播速度、D法P波速度、D法S波速度との組み合わせの結果を図20～図23に示す。

表7から、複合法による強度推定の精度の向上に対する効果を寄与率の増分で評価すると、次のような特徴が見られる。

超音波伝播速度の場合、文献^{16), 17)}などのように複合法とすることでコンクリート強度との相関関係を高められると指摘されているが、本実験の範囲においてSH法反発度と表面伝播速度との組み合わせでは、SH法の単回帰寄与率からの増分は0.038～0.093とあまり大きくなく複合法の効果がほとんど期待できないことがわかる。一方、SH法反発度と透過伝播速度との組み合わせでは、SH法も単回帰寄与

率からの増分は 0.195～0.212 と表面伝播速度との組み合わせに比べると大きい、超音波の透過伝播速度は元々、単回帰において寄与率が高く、複合法の効果とは言えない。これらの傾向は、SRH 法反発度の組み合わせにおいても同様である。

弾性波伝播速度の場合、H 法、I 法については、SH 法の単回帰寄与率からの増分は、0～0.065 と超音波の表面伝播速度との組み合わせと同等であり、複合法の効果がほとんど期待できない。一方、SH 法反発度と D 法推定動弾性係数、D 法 P 波速度、D 法 S 波速度における反発度の単回帰寄与率からの増分は 0.144～0.180 と寄与率の増分が比較的大きい。ただし、H 法、I 法に対する傾向は、SRH 法反発度との組み合わせにおいても同様であるが、D 法推定動弾性係数、D 法 P 波速度、D 法 S 波速度における反発度の単回帰寄与率からの増分は 0.064～0.082 と SH 法反発度との組み合わせよりも寄与率の増分が小さい。

表 6 と表 7 を対比すればわかるように、組み合わせる非破壊検査方法の単回帰寄与率の大小関係と複合法の効果の大小関係はほぼ同じ関係にあるが、H 法の透過伝播速度と D 法のように、単回帰寄与率が同程度でも複合法の効果は同程度ではない場合もある。

以上から、単回帰寄与率が高いものの実構造物での実用上の制約条件が多い透過伝播速度を除いた場合、強度レベル 60N/mm² を超える高強度コンクリートの強度推定において反発度法と組合せる非破壊検査方法として単回帰寄与率が 0.40～0.53 程度の D 法を採用することによって、より推定精度が高い強度推定式が構築できる可能性は高いと考える。

4. まとめ

構造物コンクリート強度 100N/mm² 程度までの高強度コンクリートの模擬部材を用いた各種非破壊試験方法と標準コア強度の関係について実験検討を行った。本実験の範囲で明らかになったことを以下に示す。

- 1) 一般にコンクリートの圧縮強度と動弾性係数の間には高い相関関係が認められており、本実験で、圧縮強度が 100N/mm² 程度の超高強度域においても両者の関係を確認することができた。
- 2) 超音波伝播速度において、採用した 2 機種とも、表面伝播速度は標準コア強度との相関関係が見られなかったが、透過伝播速度は標準コア強度との相関関係が極めて高いことがわかった。
- 3) 弾性波伝播速度において、採用した手法のうち D 法は標準コア強度との相関関係が認められた。
- 4) 反発度法の SH 法、SRH 法は、60N/mm² を超える範囲においても標準コア強度と比較的良好な相関関係にあることが確認できた。
- 5) 微破壊試験法の小径コア法において、50φ 小径コア強度が標準コア強度と極めて高い相関関係にあることがわかった。一方、26φ 小径コア強度は、標準コア強度と比較的良好な相関関係を示しているものの、技術審査証明を超える範囲での適用には更なる検討が必要であることがわかった。
- 6) 単回帰分析による寄与率の推移は、非破壊検査手法によって異なり、超音波表面伝播速度などのように、材齢の経過に伴い急激に寄与率が小さくなるもの、逆に、超音波透過伝播速度などのように、材齢が経過しても高い相関関係にあるものがあった。
- 7) 複合法による重回帰分析の結果、反発度法と D 法の組み合わせは、

反発度法単独に比べ、強度レベル 60N/mm² を超える高強度コンクリートの強度推定においてより推定精度が高い強度推定式が構築できる可能性が高いことを示すことができた。

謝辞

本研究を行うにあたり、京都大学名誉教授の渡邊史夫先生に多大なるご指導を賜りました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 例えば、立見、中田、河谷：衝撃弾性波を用いたコンクリートの非破壊圧縮強度推定法に関する研究，シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査への期待，pp. 37-48，2003. 7
- 3) 大池、伏見ほか：高強度コンクリートの強度推定に関する研究（その 1 管理用供試体強度と各種非破壊検査の関係），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）A1，pp. 371-372，2006. 9
- 4) 大池、池内ほか：高強度コンクリートの強度推定に関する研究（その 2 壁模擬部材を用いた非破壊検査の伝播速度に現れる鉄筋の影響），日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）A1，pp. 229-230，2007. 8
- 5) 中山、池内ほか：高強度コンクリートの強度推定に関する研究（その 3 壁模擬部材における各種非破壊検査とコア強度の関係），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）A1，pp. 837-838，2009. 8
- 6) 大池、池内ほか：高強度コンクリートの強度推定に関する研究（その 4 壁模擬部材における反発度と複合法による強度推定），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）A1，pp. 839-840，2009. 8
- 7) 立見ほか：衝撃弾性波を用いたコンクリートの破壊圧縮強度推定法に関する研究，シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査への期待，pp. 37-48，2003. 7
- 8) 尼崎：コンクリートの非破壊検査方法（原理と手法）－コンクリート強度、弾性係数－，コンクリート工学，Vol. 27，No. 3，pp. 31-35，1989.
- 9) 立見ほか：衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定方法に関する基礎的研究－骨材の種類、養生方法および含水率の違いが弾性波速度に及ぼす影響－，日本建築学会構造系論文集 第 598 号，pp. 13-20，2005. 12
- 10) （社）地盤工学会，地盤調査法改訂編集委員会編集：地盤調査の方法と解説，2004.
- 11) 野畑、宮本、板橋ほか：原子炉建屋における動弾性係数の測定方法について（その 1）～（その 3），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）B2，pp. 1099-1104，1996. 9
- 12) 尾崎、大藤ほか：コンクリートの長期物性モニタリング試験，日本建築学会技術報告集 第 13 号，pp. 9-14，2001. 7
- 13) 例えば、高野：コンクリートの動的弾性係数と強度との関係，セメント技術年報 V，pp. 363-371，1951.
- 14) 例えば、十代田ほか：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物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 第 527 号，pp. 15-19，2000. 1
- 15) 菅、岩淵ほか：高強度コンクリートに対応したテストハンマーの開発（その 1），（その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）A1，pp. 643-646，2002. 8
- 16) 十代田、野崎、小林：実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物コンクリートの強度推定法－，日本建築学会構造系論文集 第 428 号，pp. 25～33，1991. 10
- 17) 野崎、十代田、小林：超音波法、反発度法および複合法の既存建物への適用 非破壊試験による構造物コンクリートの強度推定法 その 2，日本建築学会構造系論文集 第 444 号，pp. 1～6，1993. 2
- 18) 鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法，日本建築学会，2007.

[2009 年 10 月 20 日原稿受理 2010 年 1 月 8 日採用決定]