# 論文 超音波法によるコンクリート物性予測手法に関する研究

中川 裕之\*1·横田 優\*2·松田 耕作\*3

**要旨**:アルカリ骨材反応が生じたコンクリート構造物を評価するために,超音波法によりコンクリート物性を予測する手法を検討した。本研究では,供試体による実験データから把握した超音波伝播特性とコンクリート物性との関係をニューラルネットワークで学習し,その学習結果を用いて,圧縮強度および静弾性係数を予測する手法を構築した。実構造物による検証を行った結果,本予測手法の有用性を確認できた。

キーワード:超音波法,透過法,アルカリ骨材反応,圧縮強度,ニューラルネットワーク

#### 1. はじめに

超音波法はコンクリート構造物に対する非破 壊検査としても古くから利用されているが,測 定対象であるコンクリートが複合材料であるこ との影響を大きく受け,測定結果からコンクリ ート物性を定量評価することは難しいのが現状 である<sup>1)</sup>。一方,コンクリート構造物の維持管理 における定期検査のためには,非破壊検査に関 する精度向上がますます求められている。

筆者らはアルカリ骨材反応(以下,「ASR」という)によるコンクリート膨張劣化に関して, 透過法による超音波測定から得られる受振波形 や周波数特性等の超音波伝播特性が透過距離一 定(25cm)の場合には,コンクリート物性を評 価する有効な指標となる可能性が高いことを確 認した<sup>2)</sup>。

そこで本研究では,超音波法によりコンクリ ート物性を評価する手法の開発を目的として, 以下に示すように予測手法の構築およびその有 用性について検討した。

- (1) 超音波透過距離の影響を考慮した供試体実 験による超音波伝播特性の把握
- (2)実験結果を基礎データとして、透過法による超音波測定からコンクリートの圧縮

\*1 (株)四国総合研究所 土木技術部 (正会員)

\*2 (株)四国総合研究所 土木技術部部長 工博 (正会員)

\*3 (株)四国総合研究所 土木技術部主席研究員 (正会員)

強度および静弾性係数を予測する手法の構 築

(3) 実構造物に対する超音波測定による予測手 法の検証

### 2. 実験概要および結果

ASR によるコンクリート膨張劣化に対する超 音波伝播特性, 圧縮強度および静弾性係数を把 握するための実験を行った。実験に際しては, 超音波透過距離が一定とはならない実構造物へ の測定を想定して,透過距離の違いも考慮した 供試体とした。

2.1 供試体

供試体は予め大型コンクリート供試体(縦 60 ×横 90×厚さ 50cm)を製作し,材齢1年4ヶ月 でコア抜き(φ10cm×コア長 30,60,90cm,以下,



写真-1 円柱コア供試体(コア長 60cm)

表-1 コンクリート配合

Gmax	W/C	スランプ	空気量	s/a		単位量	(kg/m <sup>3</sup> )		AE減水剤	AE調整剤
(mm)	(%)	(cm)	(%)	(%)	W	С	S	G	C×(%)	C×(%)
20	50	12±2	4.5±1	44.4	165	330	784	981	0.5	0.0011

「円柱コア供試体」という)した。写真-1 に円柱コア供試体(コア長 60cm)を示す。使 用したコンクリート配合および物性値等を表 -1,表-2に示す。粗骨材には化学法(JIS A 1145<sub>2001</sub>)で「無害でない」と判定された反応 性骨材(安山岩と流紋岩の混合)を使用し, 練混ぜ水に塩化ナトリウムと水酸化カリウム を添加した。円柱コア供試体に評点距離20cm 間隔にリングを取り付け,デンマーク法を参 考に,飽和塩化ナトリウム水溶液の入った容 器に浸漬し,46℃の恒温槽内で促進養生した。

### 2.2 測定項目および測定方法

促進養生中,定期的にコンタクトゲージ法に よる長さ測定(JISA1129-2<sub>2001</sub>)を行い,コア採 取直後からの長さ変化量より膨張率を算出した。 長さ測定と同時に透過法による超音波測定(2.3 に詳述)を行った。また,大型コンクリート供 試体から別途,円柱コア(φ10cm×コア長25cm ×8本)を採取し,順次所定の膨張率において両 端を切断し長さ20cmに整形した後,圧縮強度試 験(JISA1108<sub>1999</sub>)および静弾性係数試験(JISA 1149<sub>2001</sub>)を行った。

#### 2.3 超音波測定方法および伝播特性の指標

超音波測定は、円柱コア供試体の長さ方向に超 音波を伝播させる透過法とした。表-3に測定器 仕様、写真-2に測定状況を示す。なお、印加電 圧は 30,150,350,500Vの4種類で測定し、受振増 幅度は 29~60dB 間の任意で測定したデータを 測定後に全て 60dB 相当に換算した。

超音波伝播特性として評価する指標項目を図 -1,図-2に示す。受振波からは超音波伝播速 度,最大振幅および第一波振幅,また受振波を フーリエ変換した周波数スペクトルからは,ス ペクトル強度の最大値(ピーク強度と称する) およびその周波数(ピーク周波数と称する),ま た0~2500kHz範囲の周波数スペクトル線と横 軸(スペクトル強度0)とで囲まれた部分の面積 (受振波総エネルギーと称する),そして受振波 総エネルギーの50%相当にあたる周波数(平均 周波数と称する)の7項目とした。

#### 表-2 アルカリ含有量とコンクリート物性

等価Na <sub>2</sub> O量	圧縮強度(材齢28日)	静弹性係数(材齢28日)
(kg/m <sup>3</sup> )	$(N/mm^2)$	$(\times 10^4 \text{ N/mm}^2)$
5.7	30.4	2.72

表-3	測定器仕様				
発・受振用 センサ	セラミック : φ76mm 共振周波数 : 0.5MHz				
印加電圧	30, 150, 350, 500V				
受振増幅度	29~60dB				
発振繰返周波数	200Hz				
サンプリング間隔	0.2µsec				
サンプリング数	4096 points				
受振波形データ	3000回平均				







#### 2.4 測定結果例および伝播特性の考察

円柱コア供試体(コア長 30cm)における膨張 率と各超音波伝播特性との関係を図-3に示す。 なお,最大振幅,第一波振幅,ピーク強度およ び受振波総エネルギーは,各々において,膨張 率が 0.0%時の値との比として整理した。

いずれの指標も膨張率の増加に伴い減少して いるが、特に超音波伝播速度以外の各指標は膨 張率の初期変化を敏感に捉えている。これらの 傾向はコア長 60,90cm 供試体においても同様で あった。仮に実構造物の測定においては、コン クリート品質が健全な状 態から膨張初期段階まで の適切な評価が構造物早 期診断として特に重要で あると考えられるため, これら各超音波伝播特性 による評価は有益と思わ れる。

次に透過距離の影響を 図-4に最大振幅比,図-5 に平均周波数に関して 比較検討した。図-4(b), 図-5(b)は各々図-4(a), 図 - 5(a) から膨張率 0.0%と 0.1%程度のとき を表示したものである。 なお,最大振幅はコア長 30cm, 膨張率 0.0%での値 との比として整理し、コ ア長 60,90cm 供試体の膨 張率は, 各リング間の内 で最大値とした。コア長 (透過距離) が長くなる に従い, 図-4(b) に示し た最大振幅比の減衰から 超音波の伝播エネルギー 量が大きく減少し,図-5(b) に示した平均周波数 から, 伝播する高周波成 分も減少していることが わかる。他の伝播特性も 同傾向であり,透過距離 は伝播特性に大きな影響 を与えている。

# 2.5 コンクリート強度特 性と膨張率

図-6 に円柱コア供試体(コア長 25cm)の圧縮 強度および静弾性係数と 膨張率を比較した。膨張



に伴い圧縮強度および静弾性係数が低下 している。圧縮強度および静弾性係数と膨 張率を本実験結果のみから関係づけるこ とは尚早ではあるが、本実験結果からは、 各超音波伝播特性と膨張率の関係、さらに 膨張率と圧縮強度および静弾性係数との 関係から、超音波測定により圧縮強度およ び静弾性係数を直接予測できる可能性が 高いことがわかった。

 3. コンクリート物性予測手 法の構築

超音波法により圧縮強度お よび静弾性係数等のコンクリ ート物性を予測するためには 測定条件や各超音波伝播特性 を総合的に判断する必要があ る。相互に関連する複数の測 定条件や各伝播特性を同時に

考慮したコンクリート物性を予測する手法の構築にあたっては,非線形回帰手法であるニューラルネットワークを用いることとした。

圧縮強度(N/mm<sup>1</sup>

本研究では、円柱コア供試体による実験結果 から蓄積した諸データを基礎データとし、測定 条件や各伝播特性と圧縮強度および静弾性係数 との関係をニューラルネットワークにより学習 し、その学習結果を用いて、圧縮強度および静 弾性係数を予測する手法を構築した。

# 3.1 学習条件

ニューラルネットワークは図-7 に示す階層 型ネットワークとし、学習方法はバックプロパ ゲーション法にて行った。入力項目は図-7に示 す9因子とした。

学習する出力項目は圧縮強度および静弾性係 数とした。しかし、円柱コア供試体(コア長 30,60,90cm)の実験データ中には、超音波測定毎 の圧縮強度および静弾性係数データはない。そ こで、円柱コア供試体(コア長25cm)における 圧縮強度および静弾性係数と膨張率との関係 (図-6)から図-8に示す回帰式を求め、超音



波測定毎の膨張率から換算した圧縮強度および 静弾性係数を出力項目の教師値とした。

- その他主な条件を以下に示す。
- 入力データ数:314 データ
- ・出力関数:シグモイド関数
  - (勾配条件となる係数:1.0)
- ・学習率:0.05
- ・学習回数:2000回

また,出力ユニットは1ユニットとし,圧縮強 度および静弾性係数を分けて学習させた。

### 3.2 学習結果

ニューラルネットワークによる学習結果状況 を図-9,図-10に示す。

図-9(a), 図-10(a)は教師値とした圧縮強度 および静弾性係数(実験データにおける膨張率 からの換算値)と学習によって入力データ(9因 子)から算出した値とを比較したものである。 図-9(b), 図-10(b)は教師値と学習結果値から 式(1)に示した学習誤差を求め,その学習誤差分 布状況を示したものである。

$$(Pc-Pe)/Pe \times 100$$
(1)

ここで、Pc は学習結果値、Pe は教師値である。

3.3 予測手法の構築

これまでの検討結果か ら,コンクリート構造物の 圧縮強度および静弾性係 数を予測するために,以下 に示す予測手法を構築し た。

- (1) 構造物に対して透過 法による超音波測定を 行う。
- (2) 受振波形から超音波 伝播速度,受振波の最 大振幅,第一波の振幅 を,また周波数スペク トルからピーク強度, 受振波総エネルギー, ピーク周波数および 平均周波数を求め,以

上7指標を超音波伝播特性とする。

- (3) 測定条件(印加電圧,透過距離),超音波伝 播特性(7指標)を入力条件とする。
- (4) ニューラルネットワークの学習結果より得られた結合荷重(重み係数),しきい値を用いて、図-7と同様の階層構造を通した認識計算を行い、圧縮強度および静弾性係数を予測する。

# 4. 予測手法の検証

#### 4.1 実構造物の測定

構築した予測手法について現段階での妥当性 を確認するために,実構造物の測定を行った。 測定した構造物は以下の3箇所である。

- (1) ASR が生じている機械設備基礎(A構造物と する): 材齢 30 年,鉄筋コンクリート構造, 透過距離は 20~250cm
- (2) ASR は生じていないが供用期間の長い解体 直前の建築物(B構造物とする):材齢 50 年, 鉄筋コンクリート構造,透過距離は25~60cm



(3) ASR による劣化は見られない機械設備基礎 (C構造物とする):材齢35年,鉄筋コンク リート構造,透過距離は17~202cm

超音波測定は,電磁波レーダを使って鉄筋位 置を確認し,無筋部を透過法により行った。ま た,コンクリート構造物表面の塗装や仕上げモ ルタル等は撤去し,超音波センサが直接コンク リートに接するようにした。

測定後,測定箇所からコア採取(φ10cm)を 行い,圧縮強度および静弾性係数等を確認した。

# 4.2 予測結果について

図-11 に超音波測定結果から予測手法により 算出した圧縮強度予測値と採取したコアの圧縮 強度試験値を比較した結果を示す。

ASR が生じている A 構造物の予測結果は,概 ね実測値を捉えている。また,予測結果の誤差 が大きい測定箇所の原因としては,透過距離が 1m以上であり,学習した最大透過距離(コア長 90cm)を超えていること,また C 構造物は ASR が生じていないこと等が考えられる。



**図-12** に静弾性係数について比較した結果を示す。

静弾性係数は予測結果が実測値に対して低め となっている。先の図-6 に示すように, ASR による膨張に従い,静弾性係数は圧縮強度より 大きく低下している。予測手法はこの傾向を学 習しているため, ASR を生じていないコンクリ ート構造物に対しては,実際の静弾性係数より 低めに予測したことが原因と考えられる。

その他予測誤差の原因としては,予測手法構 築のための基礎データとした円柱コア供試体に 対して,実構造物の形状差,コンクリート配合, 含水状態の違い等による伝播特性への影響,さ らには基礎データとした教師値が膨張率を介し ていること等もあることが予想される。

しかしながら圧縮強度,静弾性係数ともに, 供試体実験より蓄積したデータから,まったく 別の実構造物を予測したことからすれば,構築 した予測手法の有用性は高いことが確認できた。

# 5. まとめ

ASR が生じたコンクリート構造物を評価する ために,超音波法によりコンクリート物性を予 測する手法を検討した。本研究で得られた結果 を以下に示す。

(1) 実験結果から,透過法による超音波測定から 得られる各種伝播特性は ASR による膨張を 敏感に捉えており,膨張率と圧縮強度および



静弾性係数との関係から,超音波法により圧 縮強度および静弾性係数を直接評価できる 可能性が高い。

- (2)透過距離は、受振波振幅等で示される超音波の伝播エネルギー量や周波数成分など超音波伝播特性に大きく影響する。
- (3) 円柱コア供試体による実験結果をニューラ ルネットワークにより学習し、各種超音波伝 播特性から圧縮強度および静弾性係数を予 測する手法を構築した。実構造物による検証 結果、静弾性係数は過小評価する傾向にある が、ASR が生じたコンクリート構造物に対し ては、本予測手法の有用性は高い。

今後は予測精度向上を目的として,円柱コア と実構造物における各種伝播特性の違い,学習 する基礎データの拡張,予測手法における入力 データ項目の取捨選択などを検討する予定であ る。

#### 参考文献

- 鎌田敏郎:コンクリートにおける弾性波の伝 播特性について,非破壊試験, Vol.53, No.9, pp.552-557, 2004.9
- 横田優ほか:弾性波法によるコンクリート材 料劣化評価に関する検討,弾性波法によるコ ンクリートの非破壊検査に関する委員会報 告およびシンポジウム論文集,土木学会, pp.281-288,2004.8