

## 論文 コンクリート表面の炭酸化が非破壊試験結果に及ぼす影響

周藤 将司\*1・森田 匡隆\*2・緒方 英彦\*3・山崎 大輔\*4

**要旨:** 大気中に曝され表面が炭酸化しているコンクリート構造物では、コンクリート表面の炭酸化層を含んだ状態で非破壊試験が行われる。しかし、炭酸化層が非破壊試験結果に与える影響は現在のところ明確にされておらず、炭酸化層の残存、除去などの前処理の影響は試験結果に考慮されていない。そこで本研究では、コンクリート表面の炭酸化が進行した供試体を対象に、炭酸化層を含んだ状態、除去した状態のそれぞれで超音波伝播速度と一次共鳴振動数の測定を行い、炭酸化層が測定結果に及ぼす影響を検討した。また、その結果からコンクリートの非破壊試験における前処理について考察を加えた。

**キーワード:** 炭酸化, 促進中性化試験, 相対動弾性係数, 超音波伝播速度, 一次共鳴振動数

### 1. はじめに

供用中のコンクリート構造物は、凍害・塩害などの特異な環境における劣化だけでなく、大気中に曝されているような一般環境においても表面部では炭酸化が進行している。コンクリートの炭酸化は、曲げ強度、圧縮強度を増加させることが既往の研究から明らかになっている<sup>1)</sup>。しかし、一次共鳴振動数や超音波伝播速度などの非破壊試験結果に与える影響は、現在のところ明らかにされていない。コンクリート構造物の超音波伝播速度は、測定する表面の平坦性が確保されている場合はそのままの状態で行う。しかし、平坦性が確保されていない場合は、測定値の健全性を確保するために研磨を行わなければならない<sup>2)</sup>。著者らの既往の研究では、コンクリートの表面を研磨する場合と研磨しない場合で、得られる超音波伝播速度の値が異なることを確認している<sup>3)</sup>。これは、コンクリート表面の研磨の有無により平坦性が異なっただけでなく、表面の炭酸化層の有無も関係していたのではないかと考えられる。

そこで本研究では、コンクリートの炭酸化が非破壊試験結果に及ぼす影響について検討を行う。検討方法としては、同一のコンクリート供試体において炭酸化層を含んだ状態と炭酸化層を除去した状態で超音波伝播速度、一次共鳴振動数を測定し、相対動弾性係数を求める。本文では、まず促進中性化試験に供した供試体に対して、炭酸化層の有無による相対動弾性係数の値の変化を比較検討する。その後、実構造物を想定して屋外暴露条件下で炭酸化が進行している供試体に対して同様に試験を行い考察を加える。また、コンクリートの非破壊試験における前処理について考察を加える。

### 2. 促進中性化試験に供したコンクリート

#### 2.1 試験概要

促進中性化試験に供する供試体は、表-1の配合と表-2の材料に基づいて作製した non-AE コンクリートである。non-AE コンクリートにした理由は、コンクリートの炭酸化を速やかに進行させるためである。作製したコンクリート供試体は、Φ10×20cmの円柱供試体である。なお打設時のスランプ値は15.5cm、空気量は3.1%であった。脱型は打設翌日に行い、脱型後は水温20℃の恒温水槽内で材齢4週まで水中養生を行った。材齢4週が経過した供試体は、初期値の測定として供試体の直径、長さ、気中質量、一次共鳴振動数、超音波伝播速度の測定を行った。ここで一次共鳴振動数は、JIS A 1127:2001に準拠した縦振動により測定した。また超音波伝播速度は、振動子周波数50kHzの測定機を用いて、供試体の長さ方向を伝播距離とする直接法により測定した。なおこの際に波形の判読は行っていない。

促進中性化試験に供する供試体は、2ケースである。Case 1は、初期値測定後に促進中性化試験を開始した場合である。Case 2は、初期値測定後に耐圧試験機にて降伏点まで載荷(平均降伏点強度31.3N/mm<sup>2</sup>)を行い供試体に微細ひび割れを導入した場合である。これは、コンクリート構造物の劣化により生じる微細ひび割れを供試体レベルにて再現するためである。微細ひび割れ導入後は、初期値と同様に直径、長さ、気中質量、一次共鳴振動数、超音波伝播速度の測定を再び行い促進中性化試験を開始した。ここで、2ケースの配合、養生条件は同一であり、初期値測定の段階までに両者に差異は無い。

促進中性化試験はJIS A 1153:2003の促進中性化試験方法に準拠して行い、試験機は温度30℃、相対湿度60%、

\*1 鳥取大学大学院 連合農学研究科生物環境科学専攻 (正会員)

\*2 ジーアイシー(株) 技術部測量課技師 (正会員)

\*3 鳥取大学 農学部生物資源環境学科准教授 博士(農学) (正会員)

\*4 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所研究員 (正会員)

表-1 コンクリートの示方配合

目標 スランブ (cm)	水セメント比 (%)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>
10	65	4.0	42.6	216	332	745	999

表-2 材料の物性値

材料	密度(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率(%)	F.M.
セメント (普通ポルトランドセメント)	3.15	—	—
細骨材 (鳥取県産陸砂)	2.59	1.59	1.83
粗骨材 (鳥取県産碎石)	2.59	1.62	6.68

表-3 中性化深さ (単位: mm)

	Case 1	Case 2
1 週後	0	0
3 週後	5.5	6.1
5 週後	7.7	7.4

二酸化炭素濃度 5%に設定した。促進中性化試験に際しては、中性化を供試体の両端面のみから進行させるために予め供試体の側面をエポキシ樹脂によりシールした。促進中性化試験の期間は、1, 3, 5 週の 3 水準とし、各試験期間経過後の供試体は次の手順により測定を行った。まず、炭酸化層を含んだ状態の測定を行うために、供試体の直径、長さ、気中質量、一次共鳴振動数、超音波伝播速度の測定を行った。次に、炭酸化層を除去した状態の測定を行うために供試体の両端約 2cm を湿式コンクリートカッターを用いて切断し、両端を切断した後の供試体における長さ、気中質量、一次共鳴振動数、超音波伝播速度の測定を行った。測定に用いた供試体は、各ケース各水準とも 3 本である。

一次共鳴振動数と超音波伝播速度の測定値からは、以下の式により相対動弾性係数を求めた。

$$P_n = \frac{V_n^2}{V_0^2} \times 100 \quad (1)$$

$$P_n = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (2)$$

$$E_d = 4.00 \times 10^{-3} \frac{L}{A} m f^2 \quad (3)$$

$P_n$ : 各測定時の相対動弾性係数 (%),  $V_n$ : 各測定時のコンクリートの超音波伝播速度 (km/s),  $V_0$ : 初期値測定時のコンクリートの超音波伝播速度 (km/s),  $E_{dn}$ : 各測定時のコンクリートの動弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>),  $E_{d0}$ : 初期値測定時のコンクリートの動弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>),  $E_d$ : コンクリートの動弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>),  $L$ : 供試体の長さ (mm),  $A$ : 供試体の断面積 (mm<sup>2</sup>),  $m$ : 供試体の質量 (kg),  $f$ : 縦振動の一次共鳴振動数 (Hz)

なお本文中では、式 (1) により求められる相対動弾性係数を超音波伝播速度による相対動弾性係数、式 (2) により求められる相対動弾性係数を一次共鳴振動数によ

る相対動弾性係数と区別する。

中性化深さの測定は、JIS A 1152:2002 に準拠し、切断した両端のコンクリート片を用いてフェノールフタレイン法により行った。本試験で用いたフェノールフタレイン溶液は、95%エタノール 90ml にフェノールフタレインの粉末の 1g を溶かし、水を加えて 100ml としたものである。

## 2.2 試験結果と考察

### (1) 中性化深さ

促進中性化試験後の中性化深さの測定結果を表-3 に示す。表中の値は、切断した各片の 10 点で測定を行い得られた値をケース毎に平均したものである。中性化深さは、試験開始 1 週後では Case 1 と Case 2 の両者とも赤紫色の呈色は確認されなかったが、3 週後、5 週後と試験期間が延びるに連れて中性化深さも増進する傾向が確認された。ここで、载荷により微細ひび割れを導入した Case 2 と導入していない Case 1 の中性化深さには、明確な違いが見られなかった。この理由は、载荷による微細ひび割れがエポキシ樹脂でシールした供試体の側面に卓越して発生し、露出面である端面において微細ひび割れの発生が顕著でなかったためと考えられる。

### (2) ひび割れを導入しないコンクリート

Case 1 の超音波伝播速度による相対動弾性係数の結果を図-1 に、一次共鳴振動数による相対動弾性係数の結果を図-2 にそれぞれ示す。両者ともに切断前後の測定値には、有意差が確認されなかった。これより、微細なひび割れが発生していないコンクリートの場合は、表面の炭酸化層は測定値に影響を与えず、超音波伝播速度と

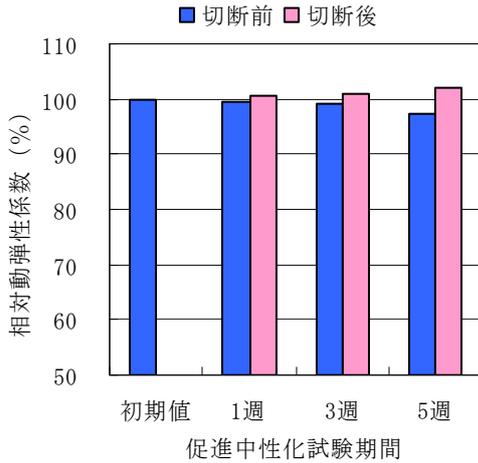


図-1 Case 1の超音波伝播速度による  
相対動弾性係数

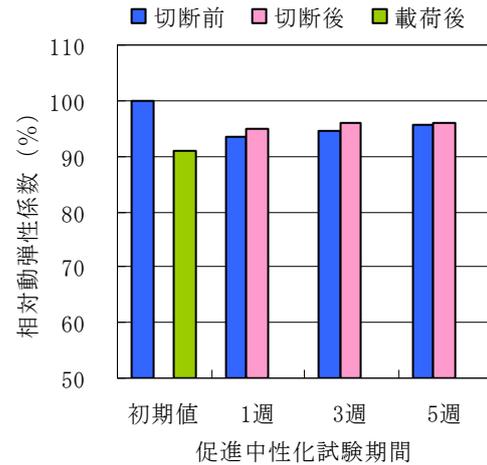


図-3 Case 2の超音波伝播速度による  
相対動弾性係数

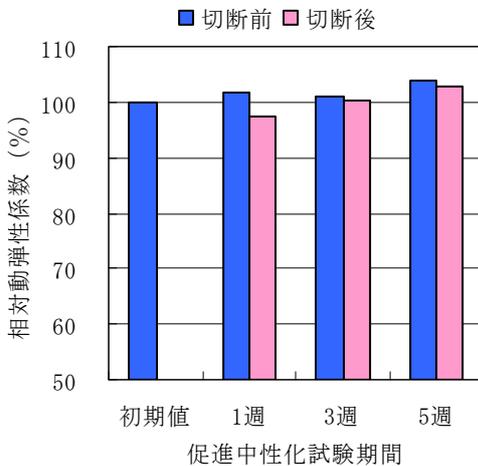


図-2 Case 1の一次共鳴振動数による  
相対動弾性係数

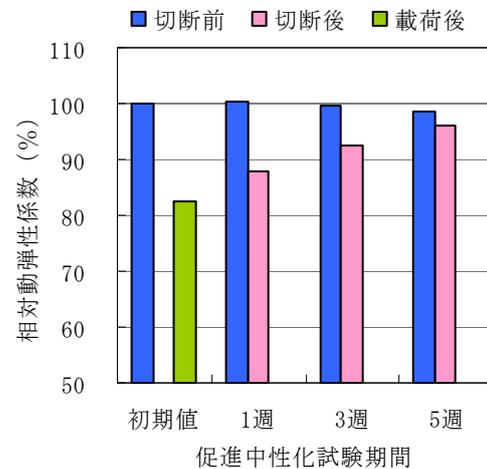


図-4 Case 2の一次共鳴振動数による  
相対動弾性係数

一次共鳴振動数は炭酸化が進行していない内部のコンクリートの品質に支配されていることがわかる。つまり、超音波伝播速度および一次共鳴振動数による相対動弾性係数でコンクリート構造物の炭酸化の影響を評価する場合は、対象となるコンクリートに発生しているひび割れの程度により結果が異なることが示唆される。

ここで、本試験は、材齢4週から促進中性化試験を開始している。そのため促進期間中にも水和反応によるコンクリートの硬化が進行していたと考えられ、長期材齢の場合とは得られる結果が異なることが考えられる。水和反応による硬化は表面部から内部へ向かって進行すると言われており<sup>4)</sup>、また本試験で用いた供試体の炭酸化は側面をシールしているために端面からのみ進行している。したがって、端面付近において水和反応により生成された水酸化カルシウムは、その後炭酸化反応により炭酸カルシウムに変化するという一連の流れが継続的に発生していたと考えられる。そのため、炭酸化反応による

影響は水和反応によって軽減し、切断前後の値の変化が僅かになったと考えられる。一方、長期材齢の経過したコンクリートの場合には、表面部、内部ともに水和反応により内在する水酸化カルシウムが増加し、新たに生成される水酸化カルシウムは減少する。したがって、この状態から本試験と同様の方法で促進中性化試験を行った場合は、炭酸化反応による影響を軽減する材料が減少するため切断前後（表面部と内部）では異なる傾向を示すと思われる。

### (3) 載荷によりひび割れを導入したコンクリート

Case 2の超音波伝播速度による相対動弾性係数の結果を図-3に、一次共鳴振動数による相対動弾性係数の結果を図-4にそれぞれ示す。ここで図中の初期値の測定では、載荷前後の測定のみを行っているため、切断後の値が存在しない。超音波伝播速度による相対動弾性係数は、載荷後に相対動弾性係数が91%まで低下した。促進中性化試験後は、切断前後ともに載荷前の値である100%

表-4 暴露試験のコンクリートの示方配合

目標 スランプ (cm)	水セメント比 (%)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>
8	60	2.0	41.6	191	318	746	1033

までは回復しないものの、載荷後の値である 91%をやや上回り概ね 95%程度の値を保持する結果となった。一次共鳴振動数による相対動弾性係数は、載荷後に 82%まで低下した。促進中性化試験後は、炭酸化層を含んだ状態である切断前の値は概ね 100%程度まで回復した。しかし、両端を切断し炭酸化層を除去した状態での測定では、炭酸化の進行とともに徐々に回復する傾向を示し 5 週後に切断前の値とほぼ同程度となった。相対動弾性係数が載荷後に減少した理由は、微細ひび割れの導入により供試体内部に空隙が生じたためである。この微細ひび割れの空隙が水和生成物により閉塞したことが、一次共鳴振動数による相対動弾性係数の回復に大きく関わっていると考えられる。通常の場合セメントは炭酸化により数 10%の体積収縮が生じるとの報告がある<sup>5)</sup>が、本試験の場合は炭酸化反応による影響が水和反応による影響と比較して微小であったために値が回復したと考えられる。

Case 1, 2 の両者の結果からは、超音波伝播速度による相対動弾性係数は切断前後で同程度の値を示し、一次共鳴振動数による相対動弾性係数は切断前の方が大きな値を示す傾向が確認された。超音波伝播速度による相対動弾性係数は、一次共鳴振動数による相対動弾性係数と密接な関係を示すことが既往の研究から明らかとなっている<sup>6)</sup>が、本試験では両者の間に相関性は確認されなかった。この原因は、以下の通りであると考えられる。

超音波伝播速度は、発振動子と受振動子の間に超音波パルスを透過させることで測定を行っており、測定面で超音波パルスが最も透過し易い箇所の値を測定値として用いている。超音波パルスはコンクリートが密なほど透過速度が上昇するため、測定値はひび割れの影響が最小となる伝播経路を透過した値となる。そのために超音波伝播速度は、切断前後の測定値の差が小さくなったと考えられる。

一次共鳴振動数は、駆動子とピックアップの間を直線で結んで一点で測定を行っている。載荷により導入したひび割れは供試体の中央に向けて複数生じているため、一次共鳴振動数の測定の際には、ひび割れが測定線上を横断するような形態となっている。そのため、一次共鳴振動数の測定では、ひび割れの影響を敏感に捉え、水和生成物により微細ひび割れが閉塞した切断前の方が大きな値を示したと考えられる。

ここで、促進中性化試験の初期における測定では、水

和生成物により供試体端面付近のみで微細ひび割れが閉塞しており、供試体内部では微細ひび割れは閉塞していないと考えられる。しかし、切断前の値は、切断後の値を大きく上回っている。このことから、一次共鳴振動数の測定は、駆動子およびピックアップが接触する供試体端面付近の状態の影響に左右され易いと言える。また、切断後には、表面部におけるセメントスラリーで形成されるスキン層を含むモルタル層が除去されるために測定面に粗骨材が露出する。一次共鳴振動数の測定は骨材による影響にも大きく左右されるため、測定はこの点に留意して行うべきであることを付記しておく。

### 3. 暴露条件下のコンクリート

#### 3.1 試験概要

ここでは、前章までに検討した項目について暴露条件下にある長期材齢のコンクリートを用いて試験を行った結果を示す。測定に用いたコンクリートの示方配合は表-4 に示す通りであり、物性は表-2 と同じである。作製した供試体は、前章と同じく  $\Phi 10 \times 20\text{cm}$  の円柱供試体であり、脱型後は水温 20°C の恒温水槽内で材齢 4 週まで水中養生を行った。その後、降伏点まで載荷を行い微細ひび割れを導入し、暴露試験を開始した。暴露試験は鳥取市内の鳥取大学構内で行い、6 ヶ月経過後に供試体の直径、長さ、気中質量、一次共鳴振動数、超音波伝播速度の測定を行った。次に、供試体の両端約 2cm を湿式コンクリートカッターを用いて切断し、両端を切断した供試体について同様の測定を行った。本試験で用いた供試体は 4 本であり、暴露試験開始前の初期値の測定は行っていない。中性化深さの測定は切断面を用いてフェノールフタレイン法により行った。

#### 3.2 試験結果と考察

暴露条件下の供試体における超音波伝播速度および一次共鳴振動数による相対動弾性係数の結果を図-5 に示す。なお測定時の中性化深さは、概ね 1mm 程度であった。

本試験では、切断前の値を相対動弾性係数 100%として切断後の超音波伝播速度による相対動弾性係数と一次共鳴振動数による相対動弾性係数をそれぞれ求めた。超音波伝播速度による相対動弾性係数は、切断前後で同等の値を示しており前章の促進中性化試験と同様の傾向となった。また、一次共鳴振動数による相対動弾性係数は、

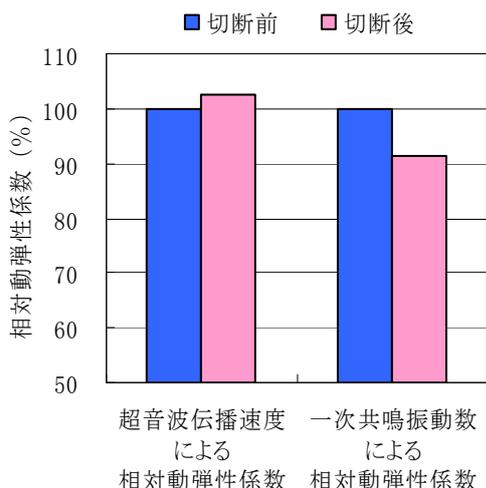


図-5 暴露条件下の供試体の測定結果

切断前の方が大きな値を示しておりこちらも前章と同様の傾向が得られ、有意差が確認された。

暴露条件下で表面が炭酸化している供試体において前章と同様な結果が得られたことから、実構造物において非破壊診断を行なう場合にも、炭酸化層をどのように扱うのが重要となることが示唆される。JIS A 1127:2001 で定められている一次共鳴振動数の測定方法では、供試体の前処理についての規定はなく、現基準においては炭酸化層の影響が考慮されずに測定が行われていることになる。しかし本研究では、炭酸化層の有無により測定結果に差異が生じることが確認された。異なる場所に存在する実構造物から得られたコンクリートの相対動弾性係数を相互比較する際には、構造物により炭酸化の程度が異なるので炭酸化の影響を相殺して考えることはできない。このような場合は、両者の炭酸化層を除去した後に測定を行うことで炭酸化の影響を除去することが可能となり相互比較も可能となる。NDIS 2416-1993 で定められている超音波伝播速度の測定方法では、平坦性の確保の観点から表面の研磨について規定されている<sup>2)</sup>。本研究では超音波伝播速度による相対動弾性係数に切断前後での有意差は確認されなかったが、炭酸化の影響を受けないコンクリートの超音波伝播速度を正確に得るためには、端面を処理した後に測定を行う方が賢明であるといえる。

実構造物における非破壊試験を行う場合、一次共鳴振動数の測定においては、コアを採取して行うこととなるため測定の前処理として炭酸化層を切断し除去してから行うことが望ましいと考えられる。超音波伝播速度の測定においても、採取したコアを用いる場合には切断により、また実構造物で測定を行う場合には研磨により前処理の段階で炭酸化層を除去することが望ましいと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ひび割れを導入しないコンクリートで促進中性化試験を行った場合、炭酸化層の有無による相対動弾性係数の有意差は認められない。これは、測定される値がコンクリート内部の品質に支配されるためである。
- (2) ひび割れを導入したコンクリートで促進中性化試験を行った場合、超音波伝播速度による相対動弾性係数の有意差は炭酸化層の有無で認められない。一方、一次共鳴振動数による相対動弾性係数の結果からは、炭酸化層の有無による有意差が確認され炭酸化層を含む場合の値が大きくなる。これは一次共鳴振動数の測定がひび割れの影響を受けやすいためである。
- (3) 暴露条件下で表面が炭酸化している長期材齢のコンクリートの場合、超音波伝播速度および一次共鳴振動数による相対動弾性係数は、促進中性化試験と同様な傾向を示すことから、実構造物において非破壊診断を行なう場合にも、炭酸化層をどのように扱うのが重要となる。
- (4) 実構造物における相対動弾性係数による評価を行う場合は、炭酸化層が測定に与える影響を除去するため、また、各構造物で炭酸化の進行度合いが異なるため測定の前処理の段階で炭酸化層を除去すべきである。

本研究では、炭酸化層が相対動弾性係数の評価結果に及ぼす影響を検討し、その傾向を確認した。しかし本研究で用いたコンクリートは、弱材齢でありひび割れも人為的に導入したものである。今後は、長期材齢のコンクリートを用いた検討や炭酸化を含む複合劣化の生じているコンクリート構造物による検討を行う必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 渡邊賢三, 横関康祐, 坂井悦郎, 大門正機: 各種混和材を含んだモルタルの炭酸化養生による高耐久化, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.653-658, 2003
- 2) 中野武人: 超音波パルス透過法によるコンクリートの音速測定方法, 社団法人 日本非破壊検査協会, 1993
- 3) 周藤将司, 高田龍一, 緒方英彦, 服部九二雄: 超音波方を用いた研磨法による凍害劣化深さの診断手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.867-872, 2008
- 4) 小林一輔: 最新コンクリート工学第5版, 森北出版, 2002

- 5) 横関康祐, 盛岡実, 伊達重之: 物質遮断性と溶脱抵抗性に優れた超寿命コンクリート 長寿命炭酸化コンクリート EIENN, セメント・コンクリート, No.730, pp.42-46, 2007
- 6) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002