

# 超音波伝播速度を用いた膨張コンクリートの弾性係数推定法に関する研究

A Study on the Estimate Method of Elasticity Modulus in Expansive Concrete by Application of Ultrasonic Speed

函館工業高等専門学校 環境都市工学科 ○学生員 須藤 卓哉 (SUDO Takuya)  
 函館工業高等専門学校 環境システム工学専攻 学生員 川尻 峻三 (KAWAJIRI Shunzo)  
 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正員 澤村 秀治 (SAWAMURA Shuji)  
 アイレック技建㈱ 永島 裕二 (NAGASHIMA Yuji)

## 1. はじめに

筆者らは、現在遂行している膨張コンクリートの自由膨張ひずみの温度依存性を定量化・モデル化する研究<sup>1,2)</sup>において、若材齢コンクリートの強度発現、弾性係数の変化を正確に追跡することが必要であると認識している<sup>3)</sup>。これについて種々の測定方法を調査・検討した結果、若材齢コンクリートの剛性変化を非破壊で測定できる方法として超音波伝播速度の応用に着目した。昨年度は、普通コンクリートに対しての超音波伝播速度の計測データと、これと対を成す若材齢コンクリートを対象としたコンクリートの圧縮強度・静弾性係数試験データを組み合わせることによって、超音波伝播速度による若材齢コンクリートの弾性係数の評価方法について検討を行っている<sup>4)</sup>。そこで本年度は、膨張コンクリートの自由膨張ひずみの温度依存性を定量化・モデル化する基礎データとして、打設・養生温度が3水準の水和熱抑制型膨張混和材を用いた膨張コンクリートを対象にし、昨年度と同様の実験を行って、温度が超音波伝播速度  $V_p$  と静弾性係数  $E_c$  の関係に及ぼす影響を確認するとともに、若材齢膨張コンクリートの超音波伝播速度  $V_p$  と静弾性係数  $E_c$  の関係を示す計算モデルの提案を試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

表-1に本実験での膨張コンクリートの配合、表-2に使用材料を示す。配合は、水/(セメント+膨張混和材)を55%とし、普通ポルトランドセメントに CSA 系水和熱抑制型膨張混和材をメーカー推奨の標準使用量である 20kg/m<sup>3</sup> 内割置換した一般的な収縮補償用の膨張コンクリートである。

表-1 膨張コンクリートの配合

W/C	s/a	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )							
		W	C	Ex	S	G	AE減水剤	AE助剤	
55.0	41.5	165	285	20	750	1081	4.58	2.14	

表-2 使用材料一覧

名称	仕様等	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15
膨張混和材	CSA系水和熱抑制型	2.83
細骨材	函館市豊原産天然砂	2.64
粗骨材	上磯産産砕石2005	2.70
混和剤	AE減水剤標準型	1.08
助剤	空気調整剤	1.00

## 2.2 供試体および計測方法

膨張コンクリートの超音波伝播速度と静弾性係数の関係を把握するために、打設・養生温度 10, 20, 30℃の膨張コンクリートに対してそれぞれ3本×15材齢=45本の円柱供試体を作製し、圧縮強度・静弾性係数試験を行った。図-1は若材齢膨張コンクリートの超音波伝播速度と静弾性係数を求めるための実験システムの概略図である。膨張コンクリートを打設した円柱供試体は、所定温度に設定した恒温室の中で温度管理を行い、型枠に入れたまま封かん状態で養生した。供試体の取り扱いが可能な強度が得られたらジェットセメントペーストでキャッピングし、ただちに脱型して円柱供試体の超音波伝播速度の測定、圧縮試験機による静弾性係数試験を行った。コンクリートの応力-ひずみ関係の測定にはコンプレッソメーターを使用し、静弾性係数は JIS A 1149-2001「コンクリートの静弾性係数」に従い、応力-ひずみ曲線上のひずみが 50  $\mu\epsilon$  の点と圧縮強度の 1/3 の点を結ぶ割線の勾配として求めた。なお、円柱供試体の受ける温度履歴についてはダム型供試体の温度を計測し、有効材齢で管理した。

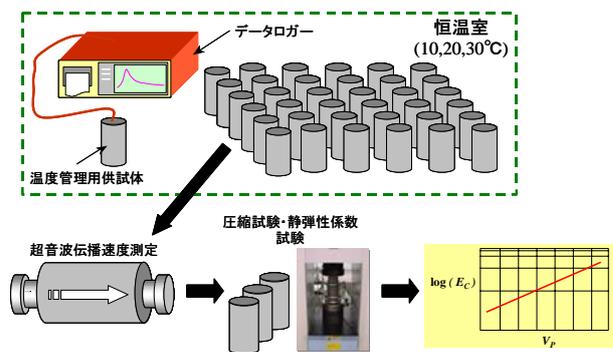


図-1 実験システム概略

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 超音波伝播速度の測定結果

図-2は、打設・養生温度 10, 20, 30℃の円柱供試体における超音波伝播速度  $V_p$  および温度管理用供試体用のコンクリート温度と経過時間の関係を示している。

この図から、コンクリート温度の上昇に着目すると 20℃, 30℃のケースでは、温度上昇に伴って超音波伝播速度も上昇している。10℃のケースでは他のケースと比べ、温

度上昇が見られず超音波伝播速度の上昇も遅れている。次にコンクリート温度のピークに着目すると、30℃のケースは20℃のケースよりも打設温度が高いにも関わらず、コンクリート温度のピークは20℃よりも遅延している。

また、それぞれのケースで滑らかな超音波伝播速度の上昇が計測されており、20℃、30℃、10℃の順で強度発現がみられ、20℃と30℃が逆転していることが明瞭に読み取ることができる。これより、超音波伝播速度を用いることによって、若材齢時からの膨張コンクリートの剛性変化を評価できる。

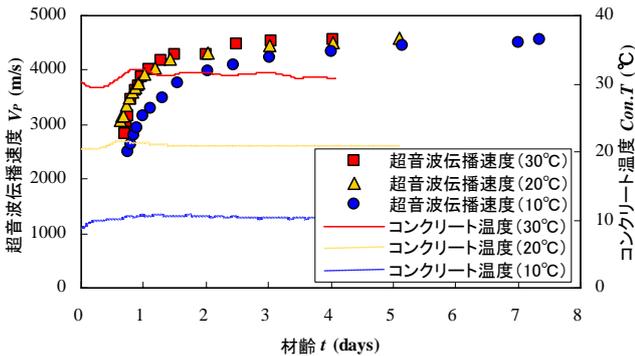


図-2 超音波伝播速度およびコンクリート温度の経時変化

### 3.2 有効材齢による温度依存性の評価

圧縮強度、静弾性係数、超音波伝播速度の温度依存性を評価するために式1に示す有効材齢を用いた<sup>5)</sup>。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T/T_0} \right] \quad \text{式1}$$

$t_e$  : 有効材齢(日)

$\Delta t$  : 温度が  $T$  である時間(日)

$T$  : コンクリートの温度(°C)

$T_0$  : 1°C

図-3 に有効材齢と圧縮強度の関係を示す。コンクリートの圧縮強度は、一般に温度が高いほど早期に発現するが、有効材齢を用いて整理すると30℃のケースで、最も打設・養生温度が高いにも関わらず、初期強度の発現が遅れる結果となった。図-4 に有効材齢と静弾性係数の関係を示す。10℃、20℃のケースは静弾性係数の測定値がほぼ同一曲線上に位置するのに対して、30℃のケースはこれらから大きく離れ、静弾性係数の発現が圧縮強度と同様に著しく遅延している。図-5 に有効材齢と超音波伝播速度の関係を示す。超音波伝播速度も圧縮強度と静弾性係数と同様に30℃のケースでは、材齢初期の超音波伝播速度の発現に遅延が確認できる。これは、静弾性係数でも確認できた強度発現遅延の傾向を超音波伝播速度によって明瞭に捉えた結果といえる。本実験での水和熱抑制型膨張混和材を用いた膨張コンクリートは、打設温度が高い場合には強度発現が遅延する傾向が

あり、温度条件のみを取り扱う有効材齢では、強度発現特性を十分に評価できない。

次に、図-3の有効材齢と圧縮強度の関係と図-5の有効材齢と超音波伝播速度の関係を比較すると、これらの関係においては明確な相互関係を確認できない。一方、図-4の有効材齢と静弾性係数の関係と図-5の有効材齢と超音波伝播速度の関係では、静弾性係数の計測結果と超音波伝播速度の計測結果が類似しており、何らかの相互関係が確認できる。これらの結果と図-2の超音波伝播速度におけるコンクリート温度の経時変化の結果も鑑みて、超音波伝播速度によって静弾性係数に寄与する水和反応の反応過程挙動、すなわち剛性変化を評価できるといえる。

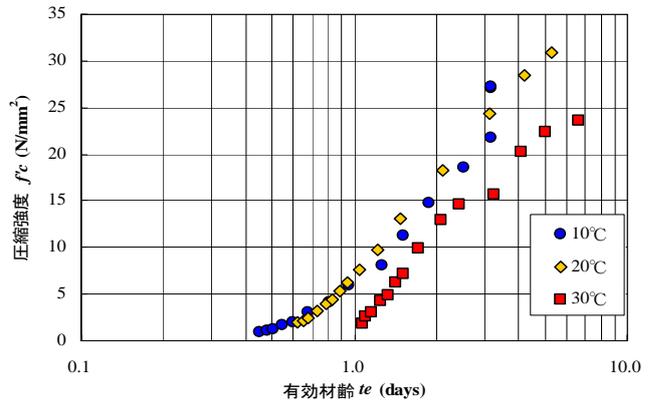


図-3 有効材齢と圧縮強度

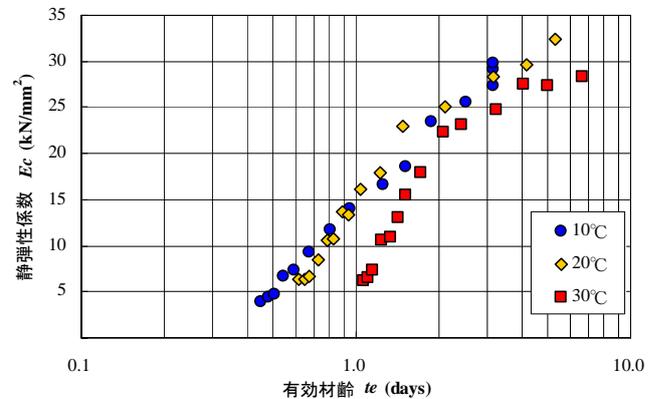


図-4 有効材齢と静弾性係数

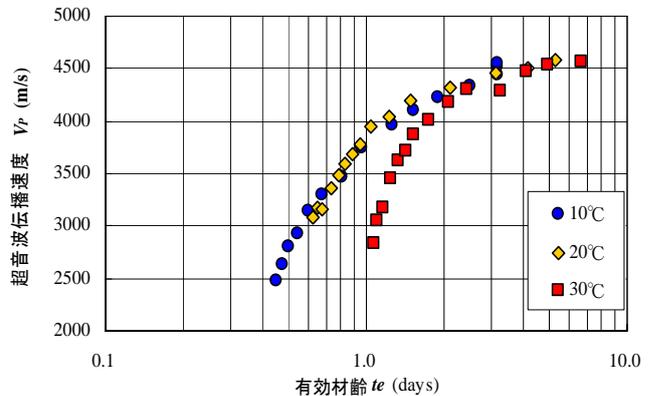


図-5 有効材齢と超音波伝播速度

### 3.3 圧縮強度と静弾性係数との関係

圧縮強度・静弾性係数試験より得られた圧縮強度と静弾性係数の関係を打設温度別に図-6～8 に示す。また、これらの結果を回帰した回帰式と相関係数を表-3 に示す。図より、どの打設・養生温度のケースにおいても圧縮強度と静弾性係数の関係は、高い相関性を示している。また、表-3 より回帰式の相関係数も極めて高い値を得ている。

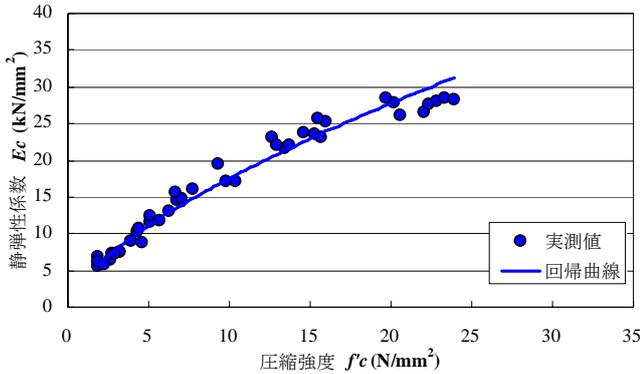


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係(10°C)

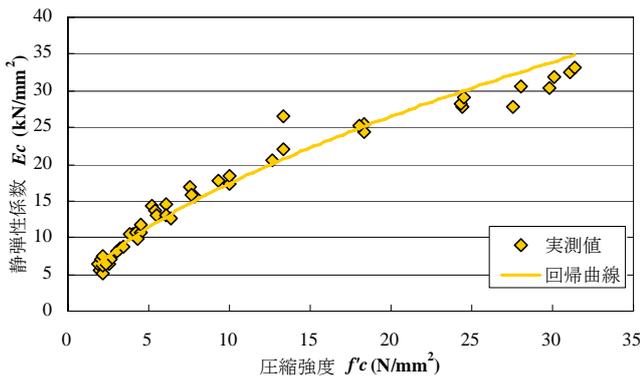


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係(20°C)

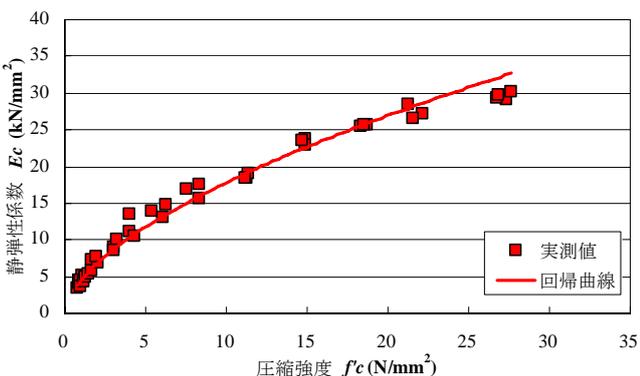


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係(30°C)

表-3 回帰結果

打設・養生温度	回帰式	相関係数 $r^2$
10°C	$E_c = 4.491 f'_c{}^{0.598}$	0.983
20°C	$E_c = 4.275 f'_c{}^{0.609}$	0.970
30°C	$E_c = 3.798 f'_c{}^{0.664}$	0.976

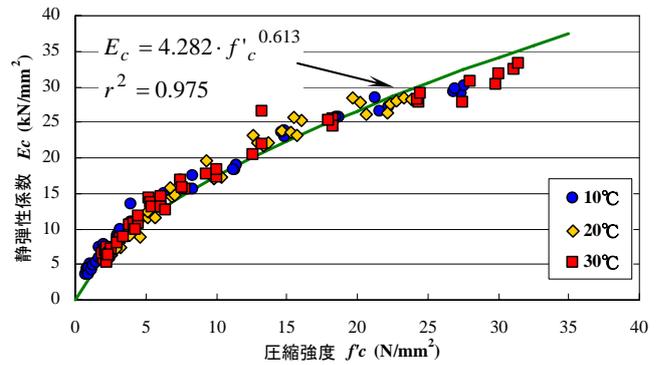


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係 (10°C, 20°C, 30°C)

図-9 に、図-6～8 の結果をまとめたすべての打設・養生温度での圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図-3、図-4 で確認されたように、30°Cのケースは有効材齢に対して圧縮強度と静弾性係数の発現が遅延する傾向が認められたが、圧縮強度と静弾性係数の関係は、打設・養生温度条件に関わらず回帰結果より式2でモデル化できることがわかった。また、相関係数も0.950以上となり、圧縮強度と静弾性係数の関係は高い相関性があるといえる。

$$E_c = 4.282 \cdot f'_c{}^{0.613} \quad \text{式2}$$

$E_c$  : 静弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $f'_c$  : 圧縮強度 (m/s)

### 3.4 超音波伝播速度と静弾性係数の関係

超音波伝播速度と静弾性係数の関係を打設・養生温度別に図-10～12 に示す。これらの結果を回帰した回帰式と相関係数を表-4 に示す。図より、すべて打設・養生温度のケースにおいて超音波伝播速度と静弾性係数の関係は、自然対数の2次式で回帰できることがわかる。相関係数もすべてのケースで0.950以上となり、打設・養生温度別の超音波伝播速度と静弾性係数の関係は高い相関性を有している。

図-13 に図-10～12 の結果をまとめたすべての打設・養生温度での超音波伝播速度と静弾性係数の関係を示す。超音波伝播速度と静弾性係数の関係は、打設・養生温度条件の影響をほとんど受けず、高い相関性を示している。今回の実験で対象とした膨張コンクリートは強度発現特性に特殊な温度依存性を有しているが、それらは超音波伝播速度と静弾性係数の関係には影響を及ぼさないことを、実験結果より確認することができた。超音波伝播速度より膨張コンクリートの若材齢時からの静弾性係数を推定するための算モデル式として式3を提案する。

$$E_c(V_p) = e^{(1.132 \times 10^8 V_p^2 + 9.392 \times 10^{-4} V_p + 5.842)} \quad \text{式3}$$

$E_c$  : 静弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $V_p$  : 超音波伝播速度 (m/s)

4. まとめ

本研究では、若材齢時の膨張コンクリートの強度特性を明らかにするために圧縮強度・静弾性係数試験，超音波伝播速度の測定を行い，それらの打設・養生温度の影響について検討した，そして，超音波伝播速度を用いて，若材齢時からの静弾性係数を推定する計算モデルの提案を試み，以下の知見を得た。

- 1) 超音波伝播速度の計測結果より打設・養生温度が低いほど強度発現が遅れる傾向や，水和熱抑制型膨張材を用いた膨張コンクリートの特殊な温度依存性が明瞭に読み取ることができた。
- 2) 有効材齢によって静弾性係数，超音波伝播速度を整理した結果，これらの相互関係を確認できた。このことから，超音波伝播速度を用いてコンクリートの静弾性係数を評価できる。
- 3) 若材齢膨張コンクリートの圧縮強度と静弾性係数との間には，打設・養生温度に関わらず，高い相関性が認められた。
- 4) 若材齢膨張コンクリートの超音波伝播速度と静弾性係数の関係には高い相関性が認められ，かつこれらの関係は打設・養生温度条件の影響をほとんど受けない。
- 5) 若材齢膨張コンクリートの超音波伝播速度の測定値から静弾性係数を推定する計算モデルとして，式3を提案する。

謝辞: 本研究は，平成 18 年度科学研究費補助金 基盤研究(C) 課題番号: 18560456 (代表: 澤村秀治) により遂行したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 相馬直樹・吉田安寿・澤村秀治: 膨張コンクリートの自由膨張ひずみの温度依存性に関する検討，平成16年度土木学会北海道支部論文報告集，V-9，2005.2
- 2) 小川育恵・川尻峻三・澤村秀治: 温度依存性を考慮した膨張コンクリートの自由膨張ひずみ計算モデルの研究<2種類の膨張材を用いた膨張コンクリートの膨張性状の差異について>，平成17年度土木学会北海道支部論文報告集第62号，V-14，2006.2
- 3) 川尻峻三・澤村秀治・橋本紳一郎・永島裕二: 超音波伝播速度による膨張コンクリート強度発現特性の評価，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集，5-495，2006.9
- 4) 白井裕規・澤村秀治: 超音波伝播速度による若材齢コンクリートの強度特性評価に関する研究，平成17年度土木学会北海道支部論文報告集第62号，V-18，2006.2
- 5) コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，土木学会，pp30-37，2002

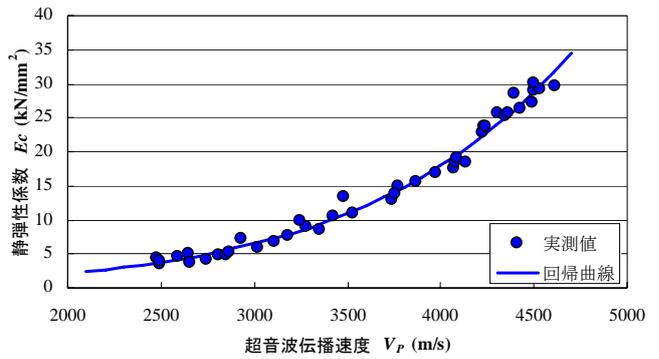


図-10 超音波伝播速度と静弾性係数の関係(10°C)

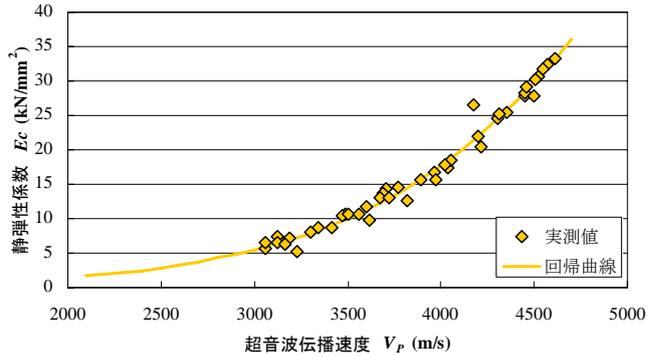


図-11 超音波伝播速度と静弾性係数の関係(20°C)

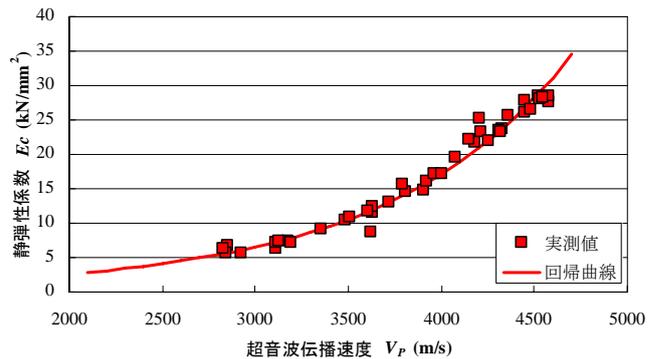


図-12 超音波伝播速度と静弾性係数の関係(30°C)

表-4 回帰結果

打設・養生温度	回帰式	相関係数 $r^2$
10°C	$E_c = e^{(-4.336E-08V_p^2 + 1.318E-03V_p + 5.215)}$	0.983
20°C	$E_c = e^{(-8.852E-08V_p^2 + 1.792E-03V_p + 4.029)}$	0.978
30°C	$E_c = e^{(-2.143E-08V_p^2 + 8.128E-04V_p + 6.155)}$	0.977

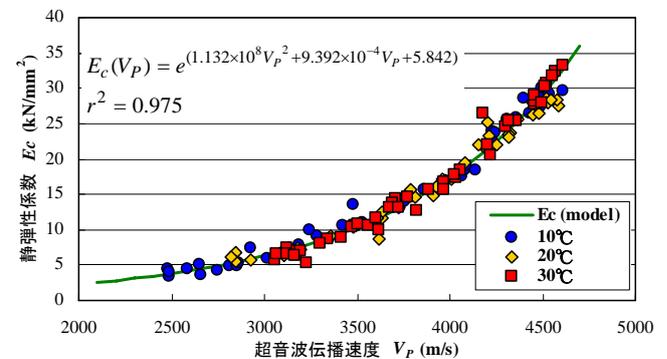


図-13 超音波伝播速度と静弾性係数の関係 (10°C, 20°C, 30°C)