

# 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

A Study on the Temperature Dependency of Free Expansive Strain of the Expansive Concrete

函館工業高等専門学校 環境システム工学専攻 ○学生員 相馬 直樹(Naoki Soma)  
 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 吉田 安寿(Yasukazu Yoshida)  
 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正員 澤村 秀治(Shuji Sawamura)

## 1. はじめに

コンクリート構造物の設計体系は、仕様規定型の従来の設計方法から、性能照査型の設計法に移行しつつあり、構造物に要求される耐荷性能、耐久性、使用性を確実に保障するために、施工時におけるひび割れの制御もますます重要な位置を占めるようになった。特に、マスコンクリート構造物の施工では、設計段階および施工計画の段階において温度ひび割れの制御に対する検討を行い、必要な対策を講じることが最重要課題であることは改めて論ずるまでもないが、実際にはそれらが十分になされないままに施工された結果、有害なひび割れを発生させてしまうケースがまだまだ多い。

マスコンクリートの温度ひび割れ制御対策として、膨張混和材を用いる方法があり、容易な対策であることから適用事例も多い。膨張コンクリートの膨張ひずみは、時間の経過とともに増加していく現象であるが、その挙動は膨張混和材の反応性に支配され、温度の影響を強く受ける。マスコンクリート構造物の内部は、高温になるとともに温度の変化が激しく、また部位によって受ける温度履歴が大きく異なるため、膨張材の挙動はますます複雑になる。現状では、このような条件下における膨張ひずみの発現性状を、定量的に把握するまでに至っていない。

本研究では、膨張ひずみ発現の温度依存性を考慮することができるマスコンクリート温度応力解析システムを構築するための基礎資料を得ることを目的とし、コンクリート温度を要因とした自由膨張試験結果から、アーレニウスの反応速度則による自由膨張ひずみの計算モデルについて検討を行った。また、同様に強い温度依存性を有する現象であるコンクリートの強度発現との相互作用についても、コンクリートの強度定数の変化を超音波伝播速度により測定し考察を試みることにした。

## 2. 実験の概要

本研究では、コンクリート温度を要因とした自由膨張試験と、膨張ひずみの発現速度と強度発現速度の関係を把握することを目的として超音波伝播速度の測定を行った。

膨張コンクリートの自由膨張試験は 6 水準の打設温度に対して行った。打設温度の水準と実験項目を表-1に示す。これらの打設温度は、目標の打設温度を得るために骨材を冷却あるいは加熱して練り混ぜた結果として得られた温度である。

膨張コンクリートの使用材料を表-2に、配合を表-3に示す。実験で使用した膨張混和材は、主としてマスコンクリートの温度ひび割れ制御を目的として用いられる CSA 系水和熱抑制型のものである。添加量は標準的な使用量であるセメントの内割で 30kg/m<sup>3</sup>とし、全てのケースで統一した。

図-1 に自由膨張測定用の供試体、超音波伝播速度測定用の供試体を示す。型枠は 150×150mm の曲げ供試体用の型枠を使用し、型枠とコンクリートの間はエアキャップで絶縁し、上面についてもエアキャップで封かんした。供試体端部の型枠は、厚さ 3mm のアルミ板と厚さ 20mm の発泡ポリスチレンパネルを貼り合せたもので作成し、供試体の軸方向の変形を拘束しないようにした。アルミ板の中央にはφ4mm×30mm のステンレス製のボルトを取り付けてコンクリート内に埋め込み、その頭部の変位を両側より高感度変位計で測定した。コンクリート内部の温度は熱電対で測定した。発生した膨張ひずみの値は、2 台の変位計の測定値の合計を供試体の長さで除して求めたが、供試体には水和熱によって最大 5℃程度の温度変化を生じたため、これについてはコンクリートの線膨張係数を  $\alpha = 10 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$  として補正することとした。一部の供試体ではひずみの測定に低弾性タイプの埋込みひずみケージも併用し、変位計によるひずみ測定値との整合性を確認した。

超音波伝播速度測定用の供試体は、膨張ひずみ測定用の供試体と同様な条件としたが、超音波伝播速度の測定値をできるだけ早期の材齢で得るために、供試体の長さは 200mm とした。供試体端部の型枠は発泡ポリスチレンパネルと厚さ 1mm のステンレス板を貼り合せて作成し、一方に超音波発振探触子、他方に受信探触子をセットし、コンクリート打設直後から伝播速度を測定した。

これらの供試体は恒温室内に設置し、気温を打込み温度に合わせ±1℃の精度で制御した。温度、ひずみ、変位計のデータは、データロガーにより 10 分間隔で自動計測を行った。

表-1 実験の温度水準と

打設温度	自由膨張	超音波
15℃	○	○
21℃	○	○
24℃	○	○
26℃	○	○
32℃	○	○
37℃	○	○

表-2 使用材料

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	2.70
細骨材	函館市豊原産天然砂	2.63
粗骨材	上磯町義朗産砕石2005	2.70
混和剤	AE減水剤標準型	1.08

表-3 コンクリートの示方配合

slump (cm)	W/C (%)	air (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				W	C	Ex	S	G	ad
8.0	55.0	5.0	48.0	160	261	30	879	966	2.61

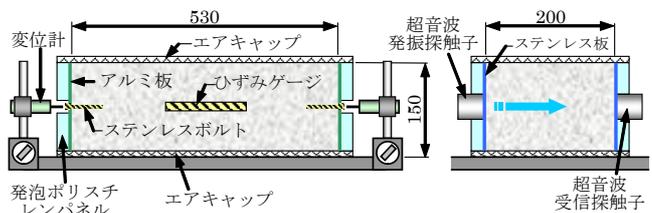


図-1 自由膨張測定供試体・超音波伝播速度測定供試体

3. 実験結果

3.1 自由膨張ひずみの測定結果

図-2 に各打設温度の水準における自由膨張ひずみの測定結果の比較を示す。膨張ひずみ曲線の勾配、すなわち膨張ひずみ速度は、コンクリートの打設温度が高くなるにしたがって、大きくなり、膨張速度には明瞭な温度依存性がある。膨張が終息するひずみの値、終局膨張ひずみも打設温度が高いほど大きくなる傾向となったが、最も打設温度の高い37°Cのケースでは、32°Cのケースの終局膨張ひずみを下回った。また、明瞭な膨張が始まる時刻をみると、32°C、37°Cのケースでは他のケースに比べて遅れる傾向があり、特に37°Cのケースではその傾向が著しい。

温度が高くなることによって終局膨張ひずみが大きくなる現象には、膨張ひずみの発現に寄与する膨張材の水和反応の活性化と、強度発現に寄与するセメントの水和反応の活性化の相互作用が深く関与していると考えられる。今回の実験で用いた膨張コンクリートの配合では、温度上昇による膨張材の活性化の程度が、強度発現の活性化を上回っているとみなすことができる。

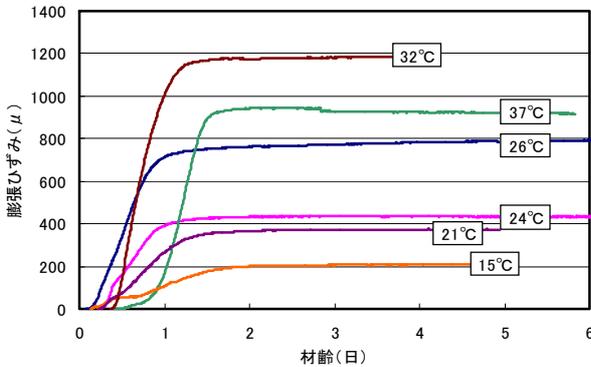


図-2 打設温度別の膨張ひずみ曲線

図-3 にコンクリートの打設温度と終局膨張ひずみの関係、図-4 に打設温度と最大膨張ひずみ速度の関係を示す。終局膨張ひずみ、最大膨張ひずみ速度は、ともに打設温度 32°C の付近までは増加傾向を示すが、打設温度が 35°C を超えるものは明らかなこの傾向の外にある。本実験で用いた水和熱抑制型の膨張材は、水和速度の発現が一般の膨張材に比べて遅延するように調整されたものであるが、打設温度が 30°C を超える領域では、膨張の開始そのものが遅延することが確認された。図-3、図-4 には、打設温度が 35°C を超えるものを除いたデータを指数関数で回帰した結果を併せて示した。

膨張コンクリートの自由膨張ひずみの発現性状を定量的に評価するためには、膨張ひずみ速度と終局膨張ひずみの双方の温度依存性を、何らかの方法でモデル化する必要がある。図-3、図-4 のように、終局膨張ひずみと膨張ひずみ速度を打設温度の関数と考えるのもモデル化の一つの方法であるが、温度変化が激しいマスコンクリート構造物の温度応力解析等に適用するためには、打設後の温度履歴を正しく考慮できるものでなければならない。

終局膨張ひずみの異なるデータを用いて、膨張の発現と膨張ひずみ速度の関係を整理するために、(1)式に示す膨張ひずみレベルを定義し用いることとした。今回の実験では、膨張材の添加量を 30kg/m<sup>3</sup> と一定にしているので、膨張ひずみレ

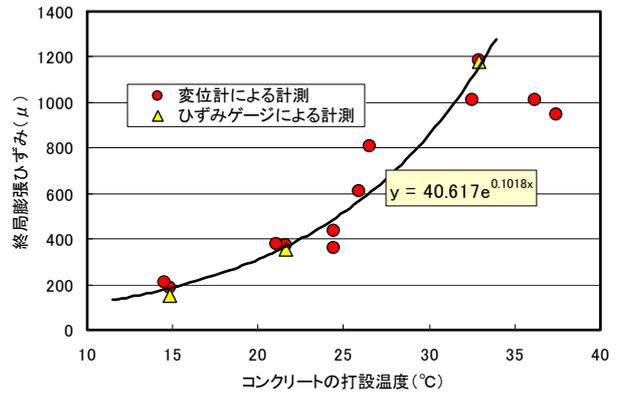


図-3 打設温度と終局膨張ひずみの関係

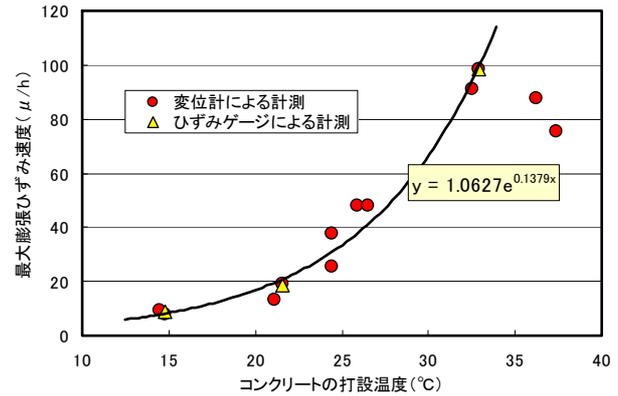


図-4 打設温度と最大膨張ひずみ速度の関係

ベルは膨張材の積算膨張エネルギーと等価とみなすこともできる。

$$s_L = \frac{\varepsilon_{ex}(t)}{\varepsilon_{ex,u}} \times 100 \quad (1)$$

$s_L$ : 膨張ひずみレベル (%)

$\varepsilon_{ex}(t)$ : 時刻  $t$  における膨張ひずみ

$\varepsilon_{ex,u}$ : 終局膨張ひずみ

図-5 に各打設温度の水準における膨張ひずみレベルと膨張ひずみ速度の関係を示す。図-5 から、打込み温度が高くなるにしたがって膨張ひずみ速度が大きくなるのがわかる。膨張ひずみ速度のピークは、温度が高いほど低い膨張ひずみレベルで現れる傾向があるが、37°Cの結果だけは特異な傾向を示し、膨張ひずみ速度のピークは膨張ひずみレベル 60% 付近になった。高温の場合には、初期の膨張の立ち上がりが鈍く、後半に一気に加速する様子が表れている。

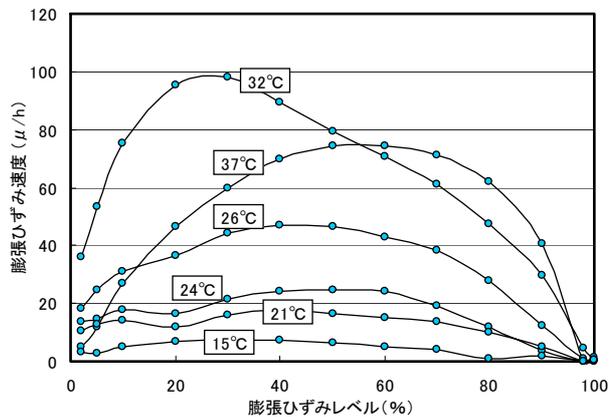


図-5 膨張ひずみレベルと膨張ひずみ速度の関係

3.2 膨張ひずみ速度の定量化<sup>1),4)</sup>

アーレニウスの反応速度則を適用すると、膨張ひずみレベルに対するひずみ速度を(2)式のように表すことができる。

$$S = S_{\infty}(s_L) \cdot \exp\left(-\frac{E(s_L)}{RT}\right) \quad (2)$$

- $S$  : 膨張ひずみ速度 ( $\mu/h$ )
- $s_L$  : 膨張ひずみレベル (%)
- $S_{\infty}(s_L)$  : 限界膨張速度 ( $\mu/h$ )
- $-E(s_L)/R$  : 活性化エネルギー ( $\mu^{\circ}K/h$ )
- $T$  : コンクリート温度 ( $^{\circ}K$ )

限界膨張速度は、温度が無限大のときの仮想的なひずみ速度であり直感的に捉えにくい。そこで、常温域の基準温度に対応する膨張速度を使った反応速度則を用いることとした。基準温度  $T_s$  における基準膨張速度は(3)式となる。

$$S(T_s, s_L) = S_{\infty}(s_L) \cdot \exp\left(-\frac{E(s_L)}{RT_s}\right) \quad (3)$$

これを式(2)に代入すると(4)式が得られ、さらにその対数をとると(5)式を得ることができる。

$$S = S(T_s, s_L) \cdot \exp\left[-\frac{E(s_L)}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right)\right] \quad (4)$$

$$\ln S = \ln S(T_s, s_L) - \frac{E(s_L)}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right) \quad (5)$$

(5)式は膨張ひずみ速度の対数  $\ln S$  と絶対温度の逆数  $1/T$  の関係を表す直線の式、いわゆるアーレニウスプロットである。直線の傾きは  $-E(s_L)/R$  に相当し、 $\ln S(T_s, s_L)$  は  $1/T_s$  における  $\ln S$  である。

図-5 より各膨張ひずみレベルにおける膨張ひずみ速度と、そのときのコンクリート温度を計測データから読み取り、アーレニウスプロットを作成した。図-6 にアーレニウスプロットの例として膨張ひずみレベル 50%における結果を示す。

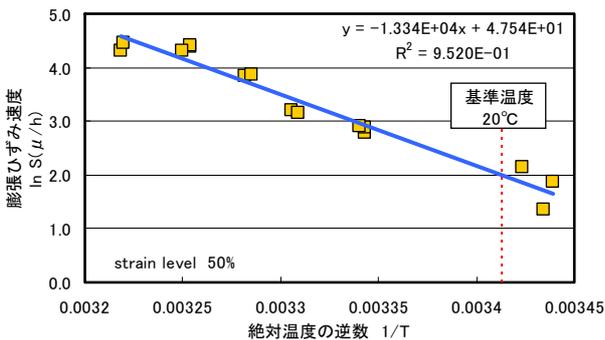


図-6 アーレニウスプロット ( $s_L = 50\%$ )

計測された膨張ひずみ速度には、強度発現速度との相互作用の影響が含まれていると考えられるが、膨張ひずみレベルがごく小さい領域と終局に近い領域を除けば、 $\ln S$  と  $1/T$  の関係は良好な直線性を示した。

アーレニウスプロットの結果より求めた膨張ひずみレベルと活性化エネルギー  $-E(s_L)/R$  の関係、基準温度を  $20^{\circ}C$  としたときの基準膨張速度  $\ln S(T_s, s_L)$  の関係を図-7 に示す。

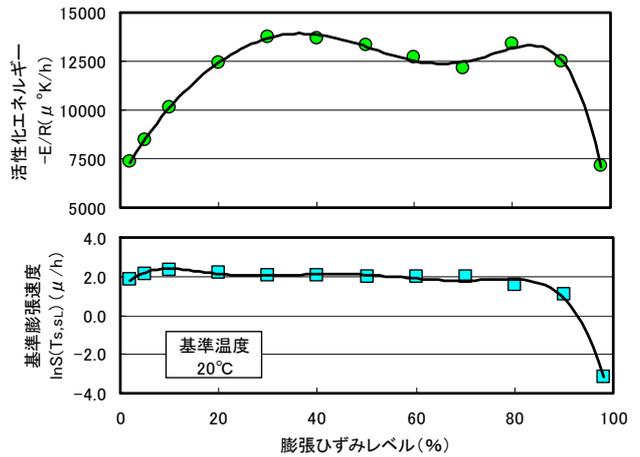


図-7 活性化エネルギーと基準膨張速度

図-7 に対してコンクリート打設後のある時刻の膨張ひずみレベルをインプットすると、そのレベルでの活性化エネルギーと基準膨張速度が得られる。これらの値とそのときのコンクリート温度  $T$  を(5)式に代入すると、その時刻の膨張ひずみ速度  $S$  を得ることができ、さらに  $S$  を時間で積分することにより膨張ひずみ曲線を得ることができる。実際の計算では、 $s_L = 0$  から一定の時間刻み  $\Delta t$  ごとに  $S$  を求め、 $\Delta t \cdot S$  を積算していけばよい。

求めた膨張ひずみの計算値と実測値の比較例を図-8、図-9 に示す。本計算モデルでは、膨張ひずみレベルの計算に終局膨張ひずみの値が必要であり、それぞれの温度水準の計算において終局膨張ひずみは実測値を用いている。

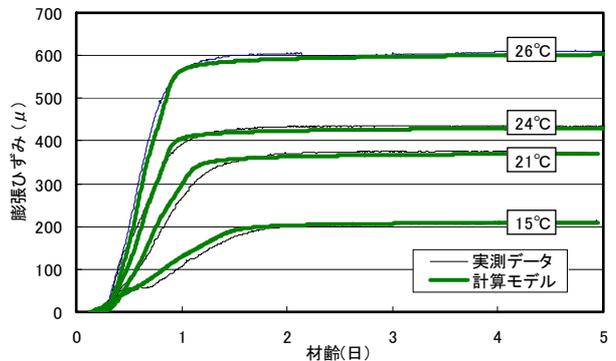


図-8 膨張ひずみの計算値と実測値の比較 (15~26°C)

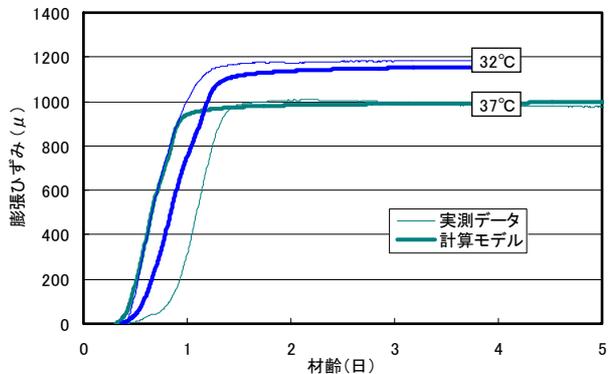


図-9 膨張ひずみの計算値と実測値の比較 (32°C, 37°C)

図-8 は、打込温度が  $15^{\circ}C$  から  $26^{\circ}C$  までの範囲のものである。供試体の温度は水和熱による温度の上昇・降下が含まれているが、これらの温度変化を忠実に取り入れることにより、本計算

モデルは実測値を精度よく表現していることがわかる。一方、図-9 は打込温度が 32℃、37℃のものであるが、このように打込み温度が高い領域では、膨張ひずみの推定精度は良好とはいえない。本実験で用いた膨張混和材は、打込温度が高い場合に膨張ひずみの発現が遅延する傾向があり、この部分がアーレニウスの反応速度則で表現できないことが要因となっている。

### 3.3 超音波伝播速度の測定結果

温度の変化に伴う膨張材の活性化の程度と、強度発現の活性化の程度との関係の評価するために、膨張ひずみを測定した供試体とほぼ同様の条件の下で、打設直後よりコンクリートの超音波伝播速度を連続的に測定した。若材齢時にはコンクリート内部における超音波の減衰が大きいため、超音波伝播速度の測定はパーソナルコンピュータのディスプレイ上に表示される受信波形を確認しながら行った。長さ 200mm の供試体を用いた場合、今回の実験で使用した測定器では、500m/s の付近より超音波伝播速度の測定が可能であった。

図-10 に超音波伝播速度の測定結果を示す。超音波伝播速度は時間の経過とともに増大し、温度が高いほど大きな値を示している。ただし、32℃のケースは、初期の超音波伝播速度が 15℃のケースをも下回っており、測定が可能になる時刻も他のケースより遅れている。本実験で用いた膨張コンクリートは、初期の膨張ひずみの発現と同様に、打設温度が高い場合には強度発現にも遅延傾向があることが認められる。

図-11 に膨張ひずみレベルと超音波伝播速度の関係を示す。通常はコンクリート温度が高いほど強度発現が早く超音波伝播速度も大きくなると考えるのが一般的であるが、これを各膨張ひずみレベルの段階における超音波伝播速度という視点でみると、温度が高いほど超音波伝播速度が小さく、推定される強度や弾性係数が小さいという結果が得られた。これらの結果より、今回の実験で用いた膨張材と膨張コンクリートの配合では、温度上昇による膨張材の活性化の程度が、強度発現に寄与する水和反応の活性化の程度を上回っていると考えられる。したがって、膨張ひずみ発現の過程では、温度が高いほどコンクリートの剛性が小さいことになり、膨張ひずみの自己拘束の影響が弱く、このことより温度が高いほど終局膨張ひずみが大きいことを説明することができる。

### 4. まとめ

本研究において、コンクリート温度を要因とした自由膨張試験を行うとともに、並行して超音波伝播速度から強度発現性状を把握することにより、以下のような知見を得た。

- ① 膨張コンクリートの自由膨張ひずみ発現性状には、膨張速度に加えて終局膨張量にも強い温度依存性がある。膨張材の温度依存性を定量的に評価するためには、これらの双方を適切にモデル化しなければならない。
- ② 膨張ひずみの発現を、終局膨張ひずみに対するパーセンテージで整理した膨張ひずみレベルを用いると、温度と膨張速度の関係をアーレニウスの反応速度則で整理することができる。
- ③ アーレニウスプロットより求めた活性化エネルギーと基準膨張速度をモデル化して用い、これにコンクリートの温度

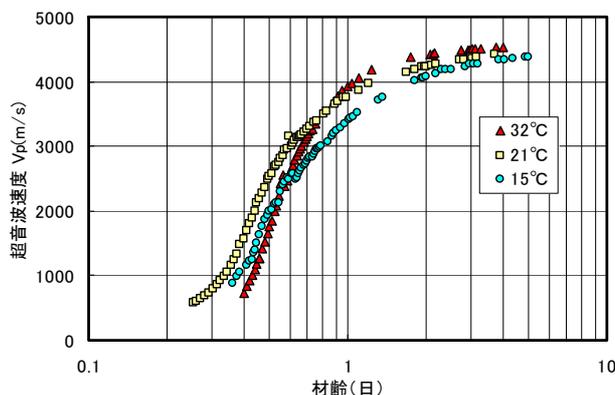


図-10 超音波伝播速度の経時変化

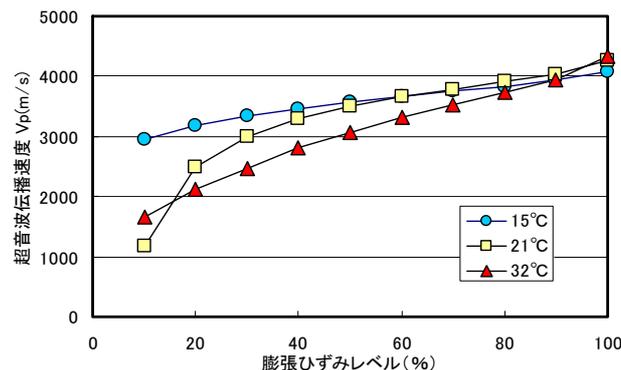


図-11 膨張ひずみレベルと超音波伝播速度

変化を与えることにより、自由膨張ひずみの実測値をよい精度で再現することができる。

- ④ 超音波の伝播速度をコンクリート打設後から連続的に測定し、これらと同じ膨張ひずみレベルで比較すると、温度が高いほど超音波伝播速度が小さくなる。このことより、温度が高いほど終局膨張ひずみが大きいことを説明することができる。

本研究で示した、アーレニウスの反応速度則に基づいた自由膨張ひずみの計算モデルは、温度による膨張材の反応の活性化と強度発現に寄与する水和反応の活性化の双方の影響を分離せずに膨張ひずみ速度を定量化している。したがって、自由膨張ひずみ曲線の計算に終局膨張ひずみ値がインプットデータとして必要であり、温度依存性を考慮した自由膨張ひずみの計算モデルとしては不十分なものである。今後は、さらに実験ケースを加えて、膨張ひずみの発現と強度発現の相互作用について明らかにしなければならない。

なお、本研究で行ったコンクリートの超音波伝播速度の測定には、アイレック技建㈱の協力を得た。

### 参考文献

- 1) 岡村甫・前川宏一・小澤一雅, ハイパフォーマンスコンクリート, 技法道出版, 1997
- 2) 戸川一夫・中本純次・中野錦一, 膨張コンクリートの拘束膨張特性に及ぼす温度の影響, セメント技術年報, No.35, pp.277~281, 1981
- 3) 膨張コンクリートの設計施工指針, 土木学会, 1993
- 4) Anton K. Schindler, Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials, ACI Material Journal, Vol.101, NO.1, 2004, pp.72~pp.81