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＞

A Study on the Calculation Model for Free Expansive Strain of Expansive Concrete in consideration of Temperature Dependency
＜Comparison of the Character of Two type Expansive admixture＞

函館工業高等専門学校 環境都市工学科　○学生員　**小川　育恵**(Ikue Ogawa)
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**(Shunzo Kawajiri)
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

マスコンクリートの温度ひび割れ制御対策として，比較的容易な対策である膨張材を用いる事例が多い．現在，市販され今後流通するであろう膨張材は構造物の用途によって乾燥収縮低減型と温度ひび割れ低減型の2種類のタイプがある．しかし，これらの膨張材は用途は明確ではあるが，マスコンクリートのように温度変化の激しい状態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．

筆者らはこれまで，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てきた．

本研究では，今後使用頻度が高まるであろう2 種類の低添加型膨張材に対して，膨張性状の違いを明確化するためのデータ収集を行った．そしてこれまでのモデル化の手法によって，2種類の膨張材の自由膨張ひずみの温度依存性における違いを考察した．

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を乾燥収縮低減型膨張材（以下，TYPE S）と温度ひび割れ低減型膨張材（以下，TYPE R）の2種類の膨張材に対し測定を行った．

TYPE S, TYPE R のそれぞれについて，自由膨張試験を5水準の打設温度に対して行った．打設温度の水準を表－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，練り混ぜた結果として得られた温度である．

それぞれ TYPE S, TYPE R 膨張材を用いた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材は，TYPE R 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 系のものである．本研究で使用したどちらの膨張材も乾燥収縮の低減，自己収縮の低減，水密性の向上などは共通の特性であるが，温度ひび割れ低減型膨張材の TYPE R にはこれらの他に，水和熱を抑制し温度ひび割れを抑制する効果が付与されている．膨張材の添加量は，メーカー推奨の標準使用量であるセメント内割で 20kg/m^3 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を示す．型枠は 150×150×530mm 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．すべての供試体でひずみの測定に低弾性タイプの埋込み型ひずみケージを用いた．ひずみ計測には，高感度変位計を併用し，ひずみゲージによる測定値との整合性を確認した．その結果，ひずみゲージと変位計の測定結果の整合性は良好であったため，測定結果はひずみゲージを中心に解析を行った．コンクリート内部の温度は熱電対で測定した．

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，ひずみゲージ，変位計のデータは，ディジタル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

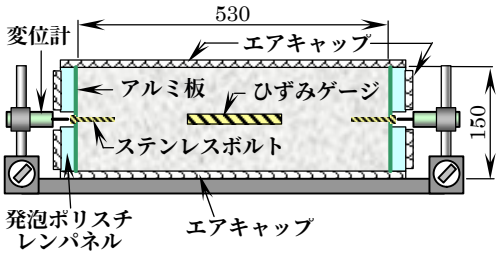
打設温度	
TYPE S	TYPE R
15℃	16℃
19℃	20℃
23℃	24℃
27℃	28℃
30℃	32℃

表－2 使用材料

名称	仕様等	密度 (g/cm3)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15
膨張混和材 R	CSA系温度ひび割れ低減型	2.83
膨張混和材 S	CSA系乾燥収縮低減型	3.08
細骨材	函館市豊原産天然砂	2.59
粗骨材	上磯町茂辺地産砕石2005	2.70
混和剤	AE減水剤標準型	1.06

表-3 コンクリートの示方配合

slump	W/C	air	s/a	単位質量（kg/m^3）						
(cm)	(%)	(%)	(%)	W	C	Ex(R)	Ex(S)	S	G	ad
8.0	55.0	5.0	48.0	165	280	20	0	857	967	4.50
8.0	55.0	5.0	48.0	165	280	0	20	857	968	4.50



図－1 自由膨張測定供試体

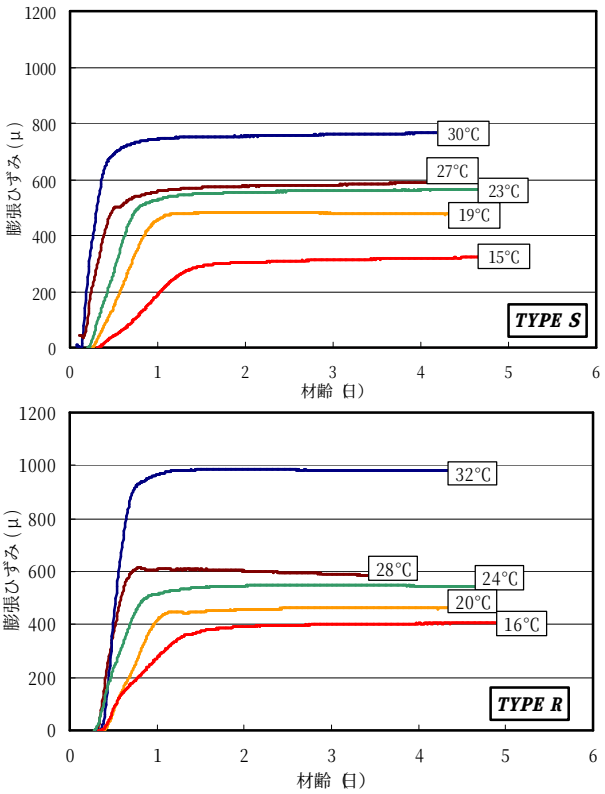
3. 実験結果

3.1 自由膨張ひずみの測定結果

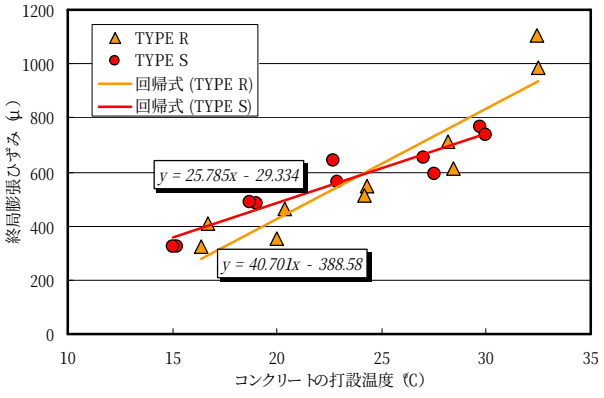
図－2に各打設温度の水準における自由膨張ひずみ測定結果の比較を示す．TYPE S, R ともに，膨張ひずみ曲線の勾配，すなわち膨張ひずみ速度は，コンクリートの打設温度が高くなるにしたがい大きくなるため，膨張速度には明瞭な温度依存性がある．膨張が終息するひずみの値，終局膨張ひずみも打設温度が高いほど大きくなる傾向となった．一方 TYPE R では，TYPE S に比べ全ての打設温度で膨張開始が遅延している．また，TYPE R の32℃の場合の終局膨張ひずみは特に大きくなった．今回の実験データが示すように打設温度が高くなることによって終局膨張ひずみが大きくなる現象には，膨張ひずみの発現に寄与する膨張材の水和反応の活性と，強度発現に寄与するセメントの水和反応の活性との相互作用が深く関与していると考えられる．

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

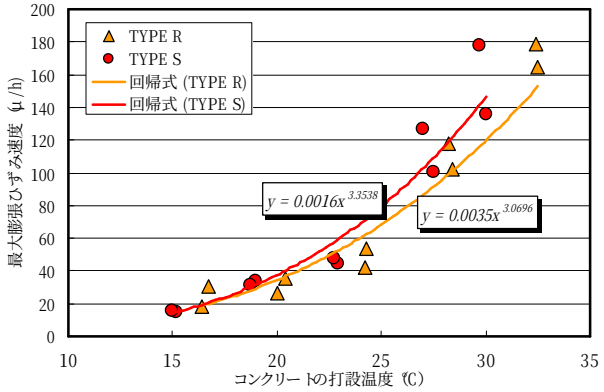
局膨張ひずみと打設温度の関係では，どちらの膨張材も打設温度 27℃付近までは終局膨張ひずみの値は同等だが，打設温度 30℃を越えるとTYPE R の終局膨張ひずみが特に大きくなり，打設温度によって終局膨張ひずみが TYPE S と TYPE R では大きく異なる結果となった．最大膨張ひずみ速



図－２ 各膨張材における打設温度別の膨張ひずみ



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

度と打設温度の関係では，打設温度が上がるにつれて，TYPE S とTYPE R の最大膨張ひずみ速度の差が大きくなることがわかる．TYPE S は打設温度が上がるにつれて最大膨張ひずみ速度も上昇する．TYPE R は，打設温度が上がると近似曲線の傾きが TYPE S より緩くなり，最大膨張ひずみ速度の上昇は TYPE S より鈍いと言える．

次に，膨張が始まってからひずみが終局に達するまでの経路を評価するために，各時刻の膨張ひずみの測定値を終局膨張ひずみ値で除した (1)式に示す膨張ひずみレベルを定義し用い，以降のデータ整理を行うこととした．

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

s_L ：膨張ひずみレベル（%）
$e_{ex}(t)$ ：時刻 t における膨張ひずみ
$e_{ex,u}$ ：終局膨張ひずみ

膨張ひずみの温度依存性を検討するために，先ず有効材齢を用いて評価した．有効材齢とは，アーレニウスの反応速度則を用い，温度による反応速度の促進・遅延を材齢に考慮したものであり，2002 年制定のコンクリート標準示方書[構造性能照査編]から温度の影響を考慮する際に用いられるようになった．有効材齢はコンクリート20℃のときの反応速度を基準反応速度,活性化エネルギーを 4000 とし，絶対温度を用いることで (2)式のように表せる．

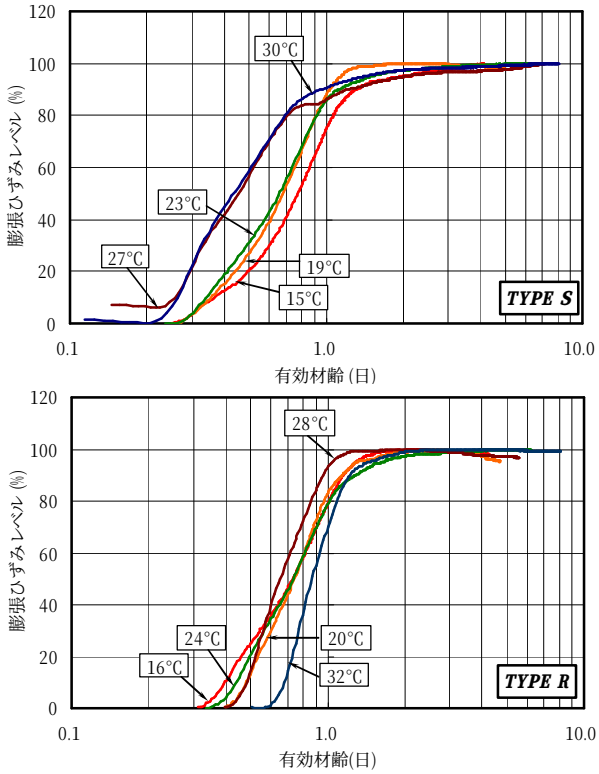
$$t_e = \sum_{i=1}^{n} \Delta t \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T/T_0}\right] \qquad (2)$$

t_e :有効材齢
Δt :温度が T である温度
T :コンクリートの温度
T_o :1℃

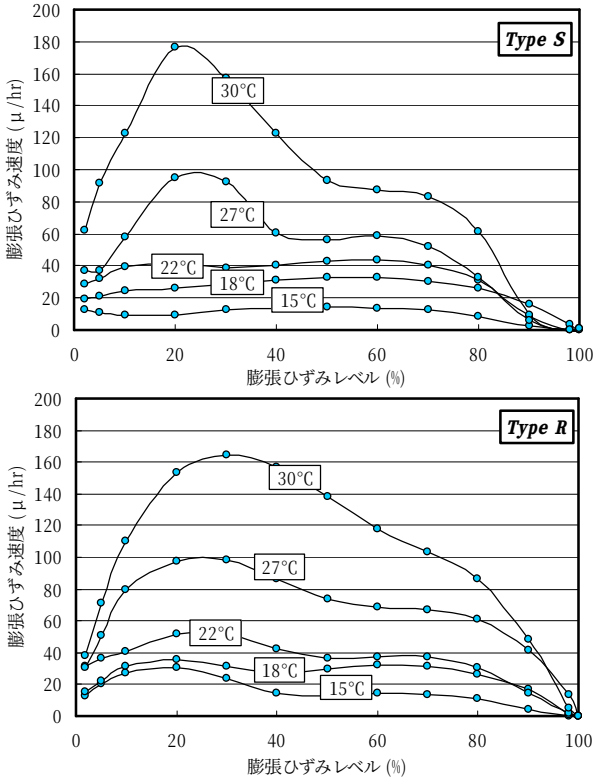
有効材齢と膨張ひずみレベルの関係を図－5 に示す．ここでは，材齢 1日未満の若材齢時の挙動を拡大表示するために，横軸を有効材齢の対数にとった．

TYPE S では，27℃と 30℃のケース以外は膨張開始から膨張の終局である膨張ひずみ 100%まで，ほぼ同じ経路をたどり有効材齢によって整理することができた．しかし，27℃と30℃のケースは早い有効材齢での膨張発現が認められた．先のグループから外れたこの 2つのケースは，高温時に反応速度論で説明できない，何らかの膨張の促進要因がある．

TYPE R では，おおむね打設温度の順に膨張開始が遅れ，傾きは打設温度が上がるにつれて大きくなる傾向があるものの，28℃と32℃以外のケースは，TYPE S と同様に膨張開始から終局までの間ほぼ同じ経路たどることがわかる．28℃のケースは膨張開始の遅延が顕著になるが，膨張開始後の膨張ひずみの増加割合が大きい．32℃のケースでは，膨張開始の遅延傾向がその他のケースよりも著しく現れている．傾きである膨張ひずみレベル 100%に向かう速度もその他のケースより特に大きい．TYPE S, R どちらも打設温度が高くなると有効材齢で整理することができないことがわかる．TYPE R の膨張材には，水和熱を抑制するために温度感応型の遅延材が配合されており，膨張ひずみの計測結果にはその効果が明瞭に現れた．



図－５ 膨張ひずみレベルと有効材齢の関係



図－６ 膨張ひずみレベルと膨張ひずみ速度の関係

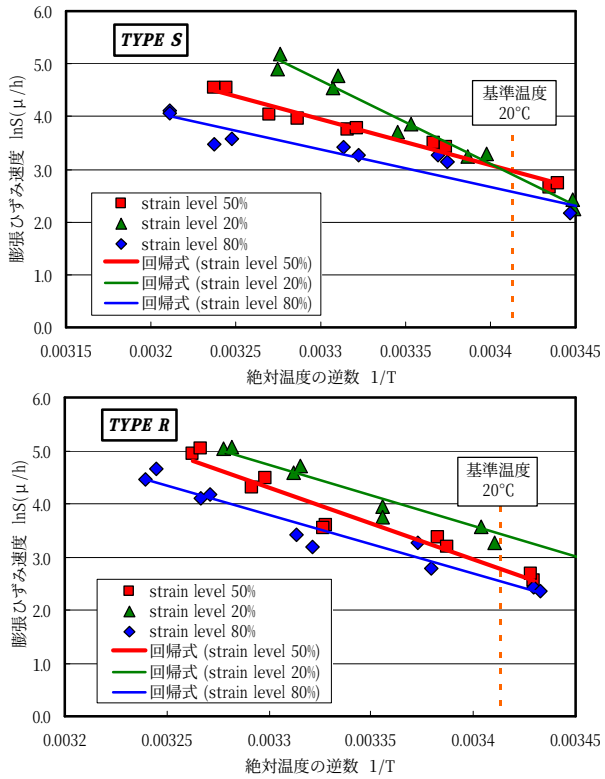
図－６に各打設温度水準における膨張ひずみレベルと膨張ひずみ速度の関係を示す．TYPE　S では 22℃までは膨張ひずみ速度はほぼ一定の速度を示すが，27℃，30℃では膨張ひずみレベル 20%付近に鋭いピークが見られる．TYPE R も同様に 22℃まではほぼ一定の膨張ひずみ速度を示すが 27℃，30℃では TYPE S とは異なり，膨張ひずみレベル 30%付近に膨張ひずみ速度のピークが見られる．TYPE R では温度が高くなるにつれて，膨張ひずみ速度の分布が膨張ひずみレベルの大きいほうにシフトしていく．

3.2 膨張ひずみ速度の定量化

⑶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，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．⑶式を用い，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－７にアーレニウスプロットの例として，TYPE S とTYPE R の膨張ひずみレベル 20，50，80%における結果を示す．得られたデータは良好な直線性を示しており，これらの回帰により $-E(s_L)/R$ と $\ln S(T_s, s_L)$ を求めた．

$$\ln S = \ln S(T_s, s_L) - \frac{E(s_L)}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right) \qquad ⑶$$

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

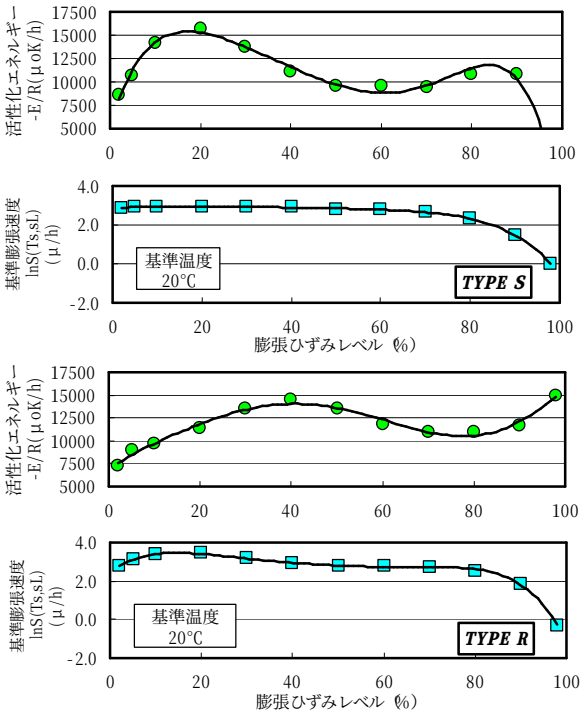


図－７ アーレニウスプロット（$s_L = 20,50,80\%$）

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℃としたときの基準膨張速度 $\ln S(T_s, s_L)$ の関係を図－８に示す．TYPE　S では，活性化エネルギーのピークが，膨張ひずみレベル 20%付近に現れ，TYPE　R ではピークが 40%付近にあった．基準膨張速度と膨張ひずみレベルの関係は，膨張ひずみレベル 10%以降では TYPE　S，TYPE　R ともにほぼ同じ挙動を示した．図－８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(3)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 Δt_i ごとに S_i を求め，(4)式のように積算する．

$$e_{ex,n} = \sum_{i=1}^{n} S_i \cdot \Delta t_i \qquad (4)$$



図－8 各膨張材における活性化エネルギーと基準膨張速度

(4)式を用いて，各膨張材の膨張ひずみの計算値と実測値の比較を図－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．

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．特に，打設温度が 20℃以下ではその再現精度は良好である．しかし，本計算モデルは膨張の開始から終局までの経路は精度良く再現できるが，モデルの性質から膨張開始のタイムラグや正しい終局値などの再現は困難であり，今後検討するモデルは，これらの要因を考慮できるものでなければならない．今回の実験では，2種類の膨張材で打設温度 20±10℃の膨張開始から終局までの膨張性状は再現できたが，実構造物のマスコンクリートでは内部が高温になるので，より温度の高い領域の検討も必要である．

4. まとめ

本研究では，2種類の膨張材を用いてコンクリート温度を要因とした自由膨張試験を行い，膨張性状の差異を明確にした．さらにその膨張性状を説明する計算モデルについて検討し，以下の知見を得た．

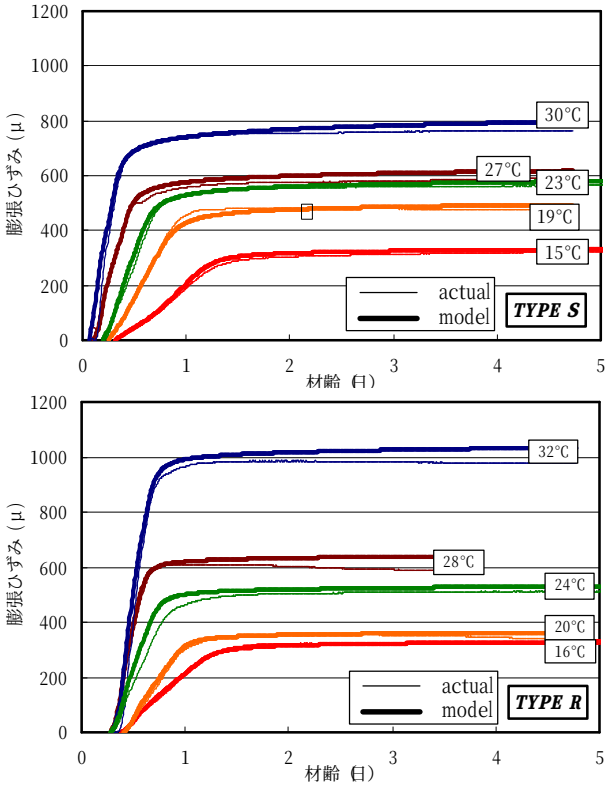


図-9 膨張ひずみの計算値と実測値の比較

① TYPE S とTYPE R の2種類を使用した膨張コンクリートの自由膨張ひずみ発現性状は，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．

② 膨張ひずみレベルと有効材齢の対数によって整理することによって，材齢 1 日未満での 2 種類の膨張コンクリートの膨張性状の差異を明らかにすることができた．

③ 今回の測定結果から，膨張ひずみレベルがごく低い2%から終局に近い 80%まで,直線性が良好なアーレニウスプロットを得ることができた．

④ 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，これにコンクリートの温度変化を与えることにより，膨張ひずみの発現の膨張開始から終局までの経路は良く表現できることがわかった．

今後はさらに計測データを加え，コンクリートの強度発現による自己拘束効果の影響を取り入れるために，膨張コンクリートを膨張ゾーンと非膨張ゾーンとに切り離して力学的にその性質を捉え，超音波伝播速度よる若材齢時のコンクリートの弾性係数の測定結果，拘束条件，クリープの影響を考慮し，膨張ひずみの発現をモデル化しようと考えている．

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) 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，2004，土木学会北海道支部技術報告会
3) Anton K. Schindler, Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials, ACI Material Journal, Vol.101, NO.1, 2004, pp.72～pp.81