



### 3.2 有効材齢による温度依存性の評価

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<sup>4)</sup>を用いた。

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

$t_e$  : 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-4 に、有効材齢で整理した配合 N の計測結果を示す。グラフは横軸を有効材齢の対数で表示し、1 日未満の若材齢域を拡大して表示した。超音波伝播速度が 500m/s に達する有効材齢は一致しており、その後の上昇傾向は全ての温度水準でほぼ同一のラインをたどることがわかる。これより、普通ポルトランドセメントを用いた配合では、超音波伝播速度で計測した剛性変化の温度依存性を、有効材齢によって適切に表現できることがわかった。

図-5 は、配合 R の計測結果を有効材齢で示したものである。有効材齢で表示することによって、10°C、20°C のケースでは、温度が高いほうに遅延傾向があるものの、超音波伝播速度の上昇傾向はほぼ同一のラインをたどり、超音波伝播速度で計測した剛性変化の温度依存性を有効材齢で表現できることがわかる。しかし、30°C のケースでは最も温度が高いにもかかわらず、超音波伝播速度で計測した初期強度発現が、遅延する結果となった。活性化エネルギーが温度に対して一定の値としている有効材齢では、配合 R の持つ特殊な温度依存性を十分に評価できない。

### 3.3 アーレニウスプロットによる温度依存性の評価

水和反応などの化学反応は、反応温度を変えると反応速度が著しく変化する。このような反応温度と反応速度との定量的な関係は、アーレニウスプロットによって表現できる。そこで本研究では、圧縮強度や弾性係数に寄与する水和反応の反応過程挙動を、剛性の変化を表わすパラメータの 1 つのみならず、超音波伝播速度によって間接的に評価できると考え、反応速度を超音波速度変化率  $\ln(dV_p/dt)$  に置き換え、アーレニウスプロットによってその温度依存性について評価・検討を行うこととした。

図-6 に配合 N の超音波伝播速度  $V_p = 600, 1500, 3000$  m/s におけるアーレニウスプロットを、図-7 に配合 R の  $V_p = 600, 1000, 2000, 2500, 3000$  m/s におけるアーレニウスプロットを示す。図-6 より、配合 N では  $V_p = 600, 1500, 3000$  m/s のすべてのケースにおいて良好な直線性を示している。すなわち、絶対温度の逆数と超音波伝播速度変化率の関係においては、温度に対して活性化エネルギーが一定である。また、グラフの傾きである活性化エネルギーは  $V_p = 600, 1500, 3000$  m/s ごとにそれぞれに個別の傾き(値)であることがわかる。これより、活性化エネルギーは温度に対して一定で、超音波伝播速度の増加に依存する値であるといえる。有効材齢は、活性化エネルギーが超音波伝播速度にも温度にも依存しない一定値としている。図-6 のアーレニウスプロットは活性化エネルギーを一定として水和反応の温度依存性を

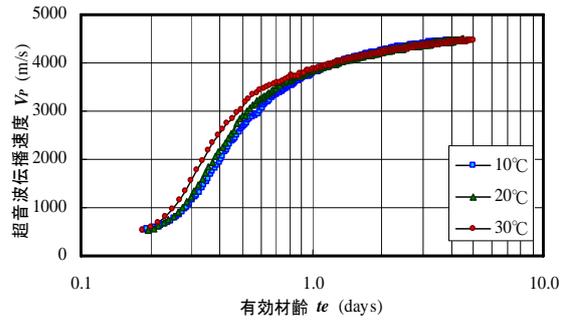


図-4 有効材齢と超音波伝播速度(配合 N)

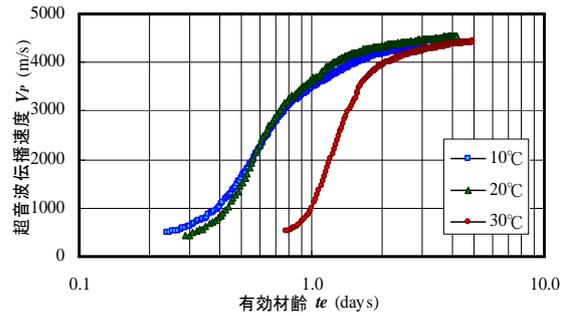


図-5 有効材齢と超音波伝播速度(配合 R)

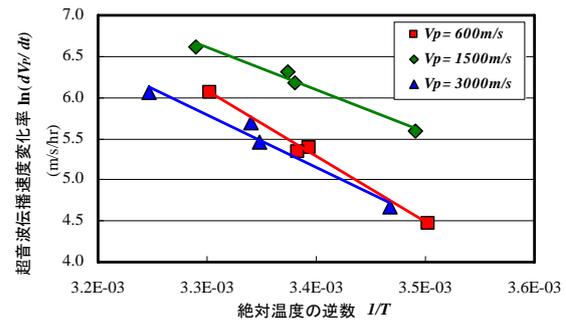


図-6 アーレニウスプロット(配合 N)

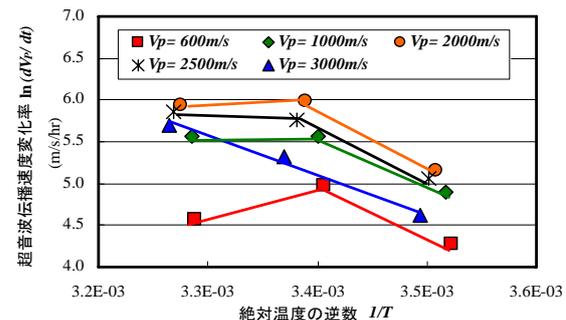


図-7 アーレニウスプロット(配合 R)

考慮する点では、式-1 に示した有効材齢の式の性質と同様の考え方である。このことから、アーレニウスプロットが直線近似できる場合は、図-4 のように有効材齢を用いて反応の温度依存性を整理できる要因の一つだといえる。

図-7 に示す配合 R の結果は、配合 N の結果と大きく異なった。打設温度が 10、20°C の低温域は活性化エネルギーである回帰直線の傾きが図-6 の配合 N と同程度である。しかし、打設温度が 30°C 付近の高温域では、縦軸の超音波伝播速度変化率が著しく低下している。また、アーレニウスプロット

は直線近似することができず、温度に対して活性化エネルギーが一定の値をとらない。このことから、「温度に対して一定の活性化エネルギー」と定義される有効材齢の式では図-5のように剛性変化の温度依存性を整理することができない。しかし、図-7で高温域かつ  $V_p = 700$  m/s の若材齢時において超音波伝播速度変化率が著しく低下していることは、図-5で確認できる打設温度が高温のケースにおいて、超音波伝播速度によって計測された初期強度発現の遅延傾向を表現している。そして、配合 N では活性化エネルギーは温度に対して一定で、超音波伝播速度の増加のみによって変化した。配合 R の活性化エネルギーは超音波伝播速度の増加に加えて温度にも依存する。

4. 剛性変化推定モデルの検討

図-8に、超音波伝播速度を剛性変化のパラメータとした膨張コンクリートの温度依存性を考慮した剛性変化推定モデルの概要を示す。

図-8の図(a)にあたる図-9は、打設・養生温度を変えた実験データを加えたときの  $V_p = 700, 1000, 2000, 2500, 3000$  m/s におけるアーレニウスプロットである。図-7のようなアーレニウスプロットが直線にならず、特異な形状を示す場合は、異なった温度水準のデータを多く加えることによってアーレニウスプロットの形状がより明確になると考えた。そこで温度水準を図-7の3水準から11, 14, 21, 27, 28, 31, 35, 36℃の8水準を増やし、アーレニウスプロットを試みた。図-9は、図-7と同様に、超音波伝播速度が小さい  $V_p = 700, 1000$  m/s などのアーレニウスプロットでは、高温域において超音波伝播速度変化率の低下が著しいことがわかる。しかし、 $V_p$

=2000, 2500, 3000 m/s など超音波伝播速度が大きくなるに従って、高温域の超音波伝播速度変化率が上昇し、直線的になる。これらの挙動は、多項式で近似できると考え、今回は式-2に示す3次式を用いて近似した。

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \tag{式-2}$$

$$y = \ln(dV_p/dt), \quad x = 1/T$$

これは、活性化エネルギーが、温度に対して一定値ではなく、超音波伝播速度の値に加え、温度にも依存するとして、新たに定義したことになる。

また、図-9は  $V_p = 700, 1000, 2000, 2500, 3000$  m/s におけるアーレニウスプロットの例であるが、全体として  $V_p = 700, 800, 900, 1000, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4100, 4200, 4300, 4400$  m/s におけるアーレニウスプロットを試みた。

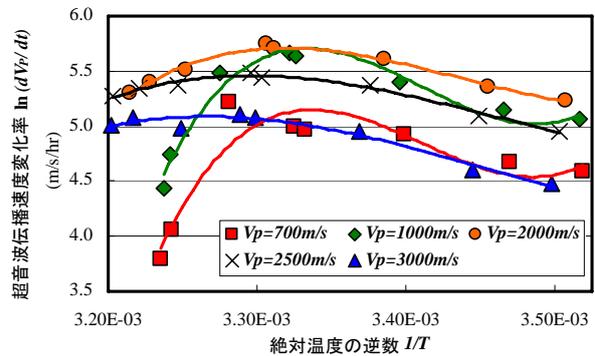


図-9 温度水準を加えたアーレニウスプロット(配合 R)

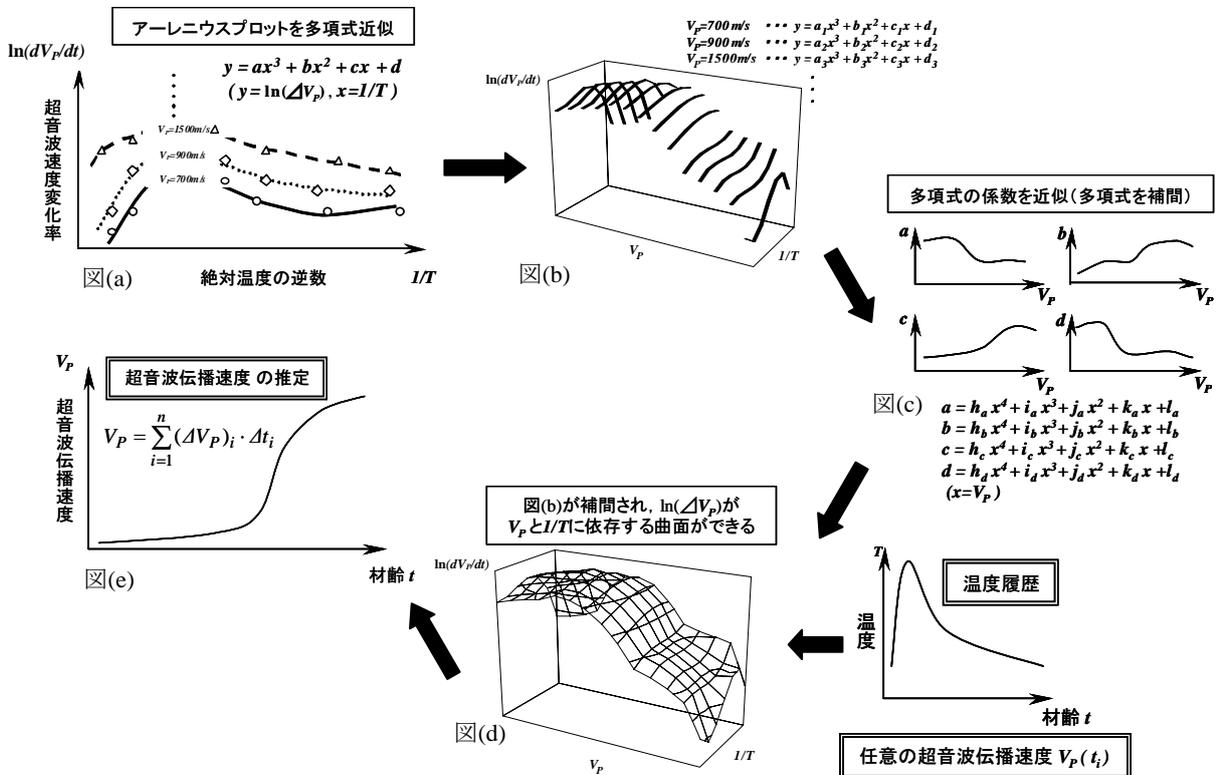


図-8 膨張コンクリートの温度依存性を考慮した超音波伝播速度推定法の概要

図-10 は、3 次式で近似したアーレニウスプロットを超音波伝播速度別に表示したものである。図-9 の図(b)にあたる。x 軸が超音波伝播速度  $V_p$ 、y 軸が絶対温度の逆数  $1/T$ 、z 軸が超音波伝播速度変化率の対数  $\ln(dV_p/dt)$  となっている。図-10 から配合 R の活性化エネルギーが、超音波伝播速度の増加と温度に依存する値であることがわかる。

図-11 は、図-10 の超音波伝播速度別に 3 次式で近似したアーレニウスプロットを補間し、 $\ln(dV_p/dt)$ 、 $V_p$ 、 $1/T$  の 3 次元空間において曲面として表現したものである。すなわち、図-11 は、ある任意の時刻の超音波伝播速度  $V_p$  とその時刻のコンクリートの絶対温度の逆数  $1/T$  を代入すると、その時刻での超音波伝播速度変化率  $\ln(dV_p/dt)$  を求めることができる計算モデルである。すなわち、図-9 の図(d)～図(e)のように、図-11 の曲面で表現される計算モデルに温度履歴とある任意の超音波伝播速度を代入することで、その時刻での超音波伝播速度変化率  $\ln(dV_p/dt)$  を得ることができる。さらに得られた  $\ln(dV_p/dt)$  の対数をはずし、時間で積分することにより材齢と超音波伝播速度  $V_p$  の関係が算出できる。実際の計算では、ある任意の超音波伝播速度を初期値として一定の時間刻み  $t_i$  ごとに  $\ln(dV_p/dt)_i$  を求め、式-3 のように積算した。

$$V_p = \sum_{i=1}^n (dV_p/dt)_i \cdot \Delta t_i \quad \text{式-3}$$

図-12 に、例として打設温度 11、21、28、36℃における上記の推定法による推定値と実測値の比較結果を示す。実測値は、11、21、28、36℃の打設温度の順に超音波伝播速度で計測した初期強度の発現が遅延していることが明瞭にわかる。特に打設温度 36℃のケースは、その他のケースと比較して超音波伝播速度で計測した初期強度発現の遅延が著しい。推定値と実測値を比較すると全てのケースにおいて、推定値は実測値を精度良く表現している。打設温度の順に初期強度発現が遅延する傾向も含め、打設温度が 36℃のとき見られる著しい遅延傾向も精度良く再現している。これらの計算過程では、水和熱による供試体の温度履歴が忠実に取り入れられており、コンクリートの温度履歴が完全に考慮されている。打設温度 11、21、28、36℃以外の温度水準においても実測値の再現性は良好であった。

### 5. まとめ

- ① 配合 N では、 $V_p$  の変化の温度依存性はアーレニウスプロットが直線になり、有効材齢を用いて表現できる。
- ② 配合 R のアーレニウスプロットは、直線にならない。これには、膨張混和材に含まれる温度感応型遅延材の効果が見られている。
- ③ コンクリートの温度履歴とある任意の超音波伝播速度を代入すると、その時刻での超音波伝播速度変化率  $\ln(dV_p/dt)$  を得ることができる曲面をモデル化することができた。
- ④ 超音波伝播速度をパラメータとする剛性変化の推定値は、実測値の打設温度順に超音波伝播速度で計測した初期強度発現が遅延する傾向も含め、若材齢時からの剛性変化の推移を精度良く表現できる。

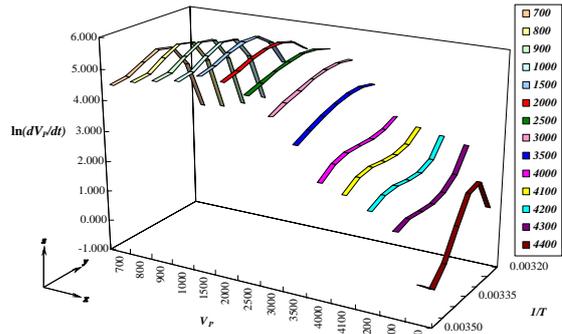


図-10 超音波伝播速度と多項式近似したアーレニウスプロットの関係

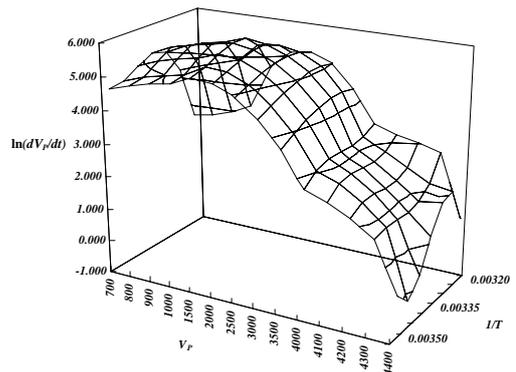


図-11 曲面化した超音波伝播速度と多項式近似したアーレニウスプロットの関係

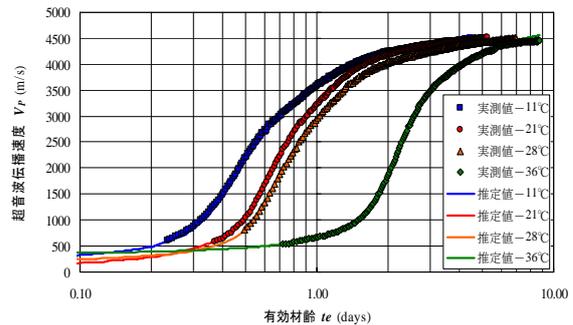


図-12 超音波伝播速度の推定結果

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第61号，V-9，2005.2
- 2) 臼井裕規・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
- 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) 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