

論文 超音波伝播速度による水和熱抑制型膨張コンクリートの強度発現特性の評価

澤村 秀治^{*1}・須藤 卓哉^{*2}・丸山 久一^{*3}・永島 裕二^{*4}

要旨：膨張コンクリートの若材齢時の自由膨張性状には、膨張混和材の反応とコンクリートの強度発現・剛性変化特性が密接に関係している。本研究では、このうち材齢の進行にともなうコンクリートの剛性変化の部分に着目し、水和熱抑制型膨張混和材を用いた膨張コンクリートの強度発現・剛性変化を、超音波伝播速度の変化を連続・自動的に計測することにより評価することを試みた。この結果、特殊な温度依存性を有する水和熱抑制型膨張コンクリートの強度発現特性は、非線形のアーレニウスプロットによりモデル化でき、これによりコンクリートの温度履歴を考慮した剛性変化推定モデルを構築できることを明らかにした。

キーワード：膨張コンクリート、超音波伝播速度、温度依存性、アーレニウスプロット

1. はじめに

マスコンクリート構造物の温度ひび割れ制御対策の一つとして、水和熱抑制型膨張混和材の使用が挙げられる。水和熱抑制型膨張コンクリートの膨張ひずみ発現性状は、その温度依存性が十分に定量化されていないので、マスコンクリートのような著しい温度変化を受ける条件下では、膨張混和材の効果を精度良く予測することは困難なのが現状である。膨張コンクリートの若材齢時の自由膨張性状には、膨張混和材の反応とコンクリートの強度発現・剛性変化特性が密接に関係している。筆者らは、このうちコンクリートの剛性変化の部分に対して、超音波伝播速度による評価を試みており、超音波伝播速度の連続自動計測によって、コンクリートの剛性変化を測定する手法を確立した¹⁾。本研究では、若材齢時からの超音波伝播速度の変化を、さまざまな温度水準で計測し、これらの結果を基に水和熱抑制型膨張コンクリートが持つ特殊な温度依存性を、アーレニウスの反応速度則の応用により定量化する方法について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に本実験でのコンクリートの配合、表-2 に使用材料を示す。配合 R は、水結合材比を 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/m³ を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。配合 N は、比較のために普通ポルトランドセメントのみを使用した普通コンクリートである。

表-1 コンクリートの配合

Name	W/C	s/a	単位質量(kg/m ³)						
	%	%	W	C	Ex	S	G	AE減水剤	AE助剤
N	55.0	41.5	168	306	0	750	1081	4.58	1.53
R	55.0	41.5	168	286	20	750	1081	4.58	2.14

表-3 実験温度水準

表-2 使用材料一覧			打設・養生温度	
名称	仕様等	密度 (g/cm ³)	配合N	配合R
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15	10℃	11℃
膨張混和材	CSA系水和熱抑制型	2.83	18℃	14℃
細骨材	函館市豊原産天然砂	2.64	25℃	20℃
粗骨材	上磯産産砕石2005	2.70	30℃	25℃
混和剤	AE減水剤標準型	1.08		27℃
助剤	空気量調整剤	1.00		28℃
				31℃
				33℃
				35℃
				36℃

*1 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 教授・工修 (正会員)

*2 函館工業高等専門学校 専攻科 環境システム工学専攻

*3 長岡技術科学大学 環境・建設系 教授・Ph.D. (正会員)

*4 アイレック技建 営業開発本部

超音波伝播速度は配合条件の影響を強く受けると考えられるが、定量化検討の最初のステップとして、本研究では表-1 に示す単一の配合に対して実験・検討を行うこととした。

2.2 供試体および計測方法

超音波伝播速度の測定は、温度依存性を評価するために表-3 に示す水準の打設・養生温度で実験を行った。超音波伝播速度計測供試体を図-1 に示す。コンクリートを打設した供試体は、所定の温度に設定した恒温槽の中で養生し、超音波伝播速度の測定には本研究で開発した自動計測システム¹⁾を使用した。この計測システムは、計測装置本体とコンピュータで構成されており、指定したインターバルで記録された超音波受信波形より、伝播速度の変化を求めている。

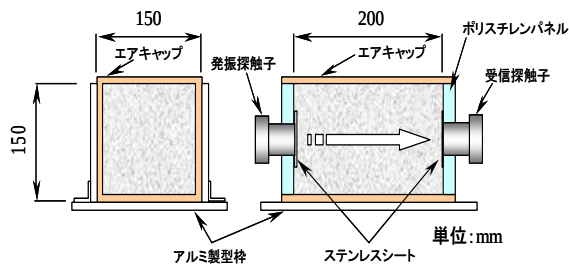


図-1 超音波伝播速度計測供試体

3. 実験結果および考察

3.1 剛性変化モデルの検討

(1) 計測結果の温度依存性の評価

図-2 に普通ポルトランドセメントを用いた配合 N、図-3 に CSA 系水和熱抑制型膨張混和材を使用した膨張コンクリートである配合 R の材齢と超音波伝播速度の関係を示す。

図-2 には、打設・養生温度 10℃、18℃、25℃、30℃のケースの結果をあわせて示しているが、それぞれ滑らかな超音波伝播速度の上昇が計測されており、また温度が低いほど強度発現が遅れる傾向を、超音波伝播速度の計測結果より明瞭に読み取ることができる。図-3 は水和熱抑制型膨張混和材を併用した配合 R の打設・養生温度 11℃、20℃、28℃、35℃のケースである。超音波伝播速度の発現と終局値までの立ち上がり

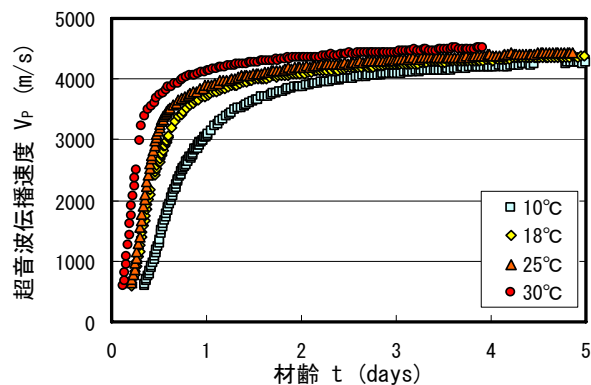


図-2 材齢と超音波伝播速度 (配合 N)

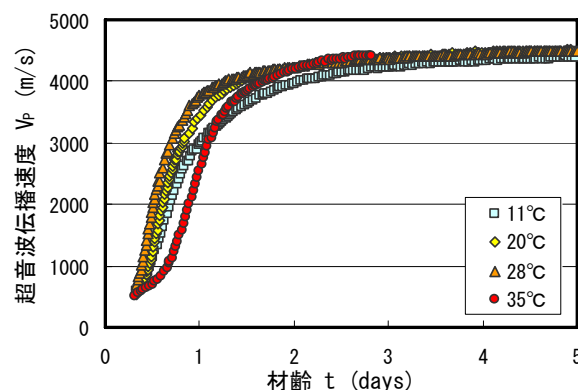


図-3 材齢と超音波伝播速度 (配合 R)

は、図-2 の配合 N に比べて全体として遅れる傾向がある。さらに打設・養生温度が 35℃のケースでは初期の超音波伝播速度の上昇傾向が 11℃の結果と逆転するほど遅れていることがわかる。これは、水和熱抑制型膨張混和材には温度感応型遅延材が含まれているためであり、今回の計測結果はその効果を明瞭に捉えたといえる。

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過程の挙動を、剛性の変化を表わすパラメータの 1 つとみなすことができる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-4 に配合 N の超音波伝播速度 $V_p=700, 1500, 3000$ m/s におけるアーレニウスプロットを、図-5 に配合 R の $V_p=700, 1000, 2000, 2500, 3000$ m/s にお

けるアーレニウスプロットを示す。

図-4 より, 配合 N では $V_p=700, 1500, 3000$ 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り, 直線の勾配である活性化エネルギーは $V_p=700, 1500, 3000$ m/s ごとにそれぞれに個別の値を持つことがわかる。

図-5 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 30°C 付近の高温域では, 超音波伝播速度変化率の低下が認められ, その傾向は超音波伝播速度が小さい段階, すなわち若材齢時に顕著である。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。しかし, 図-5 において高温域かつ $V_p=700$ m/s の若材齢時に超音波伝播速度変化率が著しく低下していることは, 図-3 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と整合している。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。図-5 のように特殊な温度依存性を持つ配合 R のアーレニウスプロットの形状を本研究では, 3 次式によって近似することとした。

(2) 剛性変化推定モデルの検討

図-6 に, 超音波伝播速度による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-6 (a) はある任意の超音波伝播速度別にアーレニウスプロットを 1 次式または多項式で近似したものである。

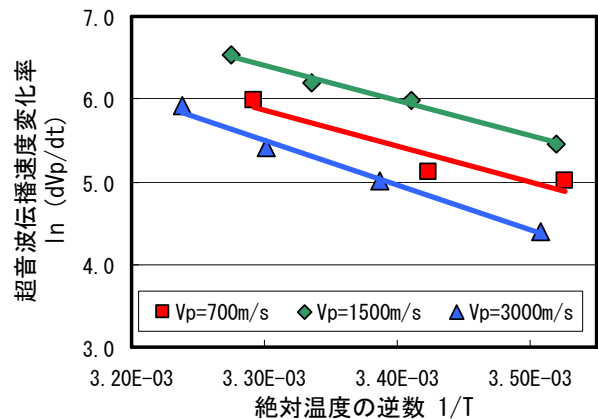


図-4 アーレニウスプロット(配合 N)

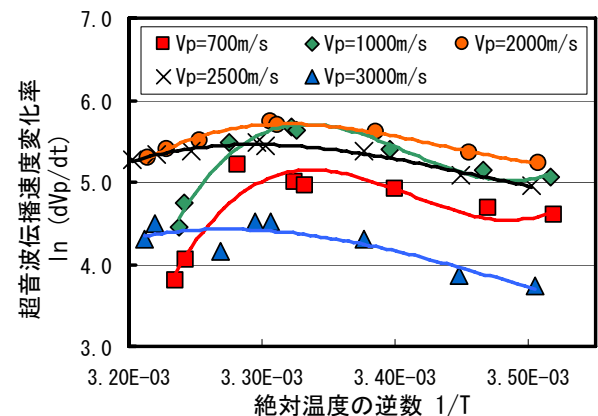


図-5 アーレニウスプロット(配合 R)

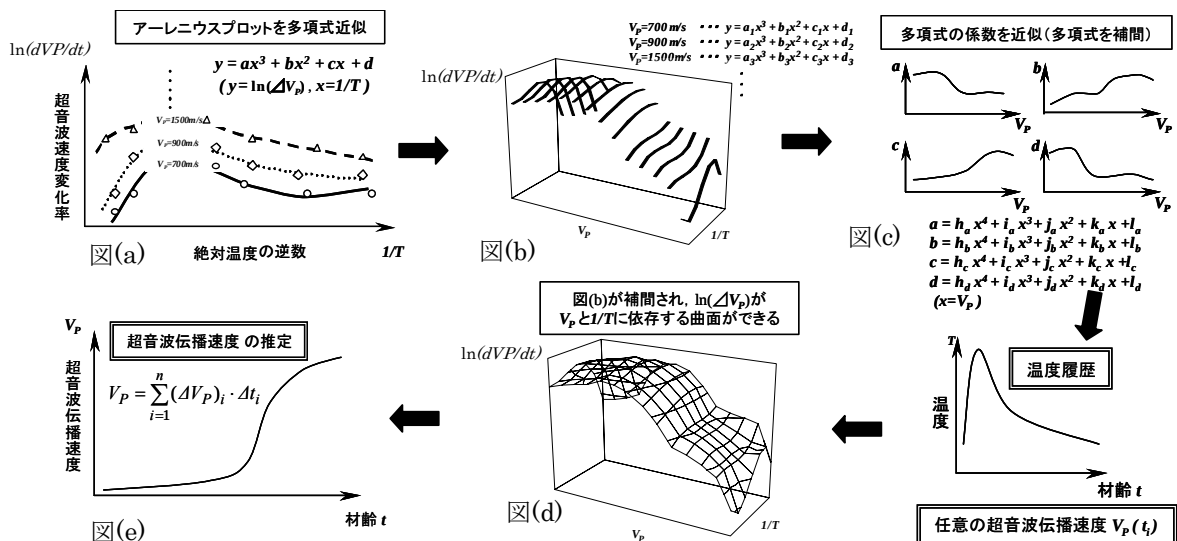


図-6 膨張コンクリートの温度依存性を考慮した超音波伝播速度推定法の概要

図-6 (b) は、図-6 (a) で作成したアーレニウスプロットを 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 $\ln(dV_P / dt)$ の 3 次元空間内に表示したものである。図-7 は配合 N における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り、図-8 は配合 R における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。アーレニウスプロットは 13 水準の超音波伝播速度に対して作成した。

図-6 (b) ~ (d) は、一次式または多項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 次元空間においてアーレニウスプロットの分布を曲面として表現したものである。図-9 は、図-7 における配合 N の超音波伝播速度別に直線で近似したアーレニウスプロットを補間したもので、平面を捻ったような形状になる。また、図-10 は、図-8 における配合 R 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たもので、ドーム型の形状をしており、配合 N とは明らかに異なる。図-6 (d) ~ (e) は、図-9、10 のように 3 次元空間においてアーレニウスプロットの分布を表現した曲面に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。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、ある任意の時刻の超音波伝播速度 $V_{P0}(t_0)$ を初期値として一定の時間刻み Δt_i ごとに $\ln(dV_P / dt)_i$ を求め、式(1)のように積算した。

$$V_P = \sum_{i=1}^n (dV_P / dt)_i \cdot \Delta t_i + V_{P0}(t_0) \quad (1)$$

図-11 に、例として配合 R の打設温度 11, 20,

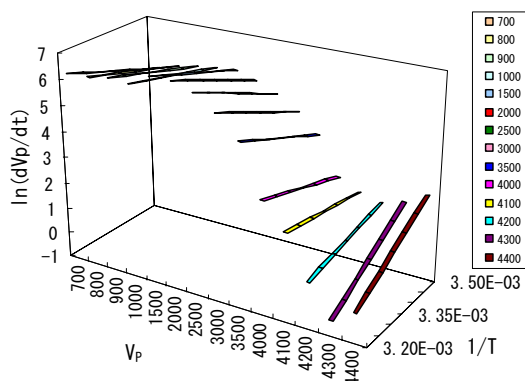


図-7 超音波伝播速度と多項式近似したアーレニウスプロットの関係(N)

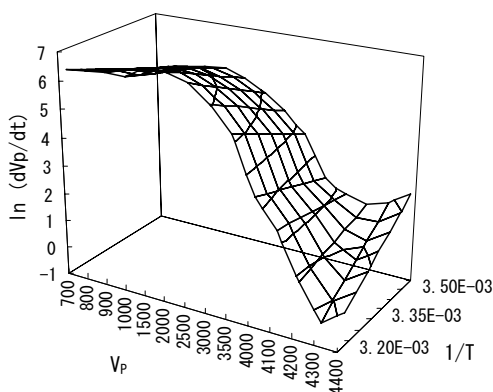


図-9 曲面化した超音波伝播速度と多項式近似したアーレニウスプロットの関係(N)

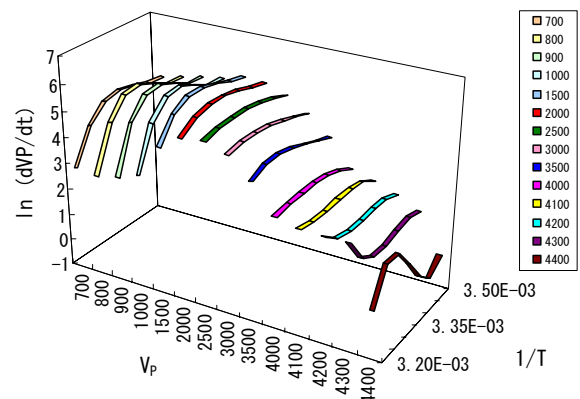


図-8 超音波伝播速度と多項式近似したアーレニウスプロットの関係(R)

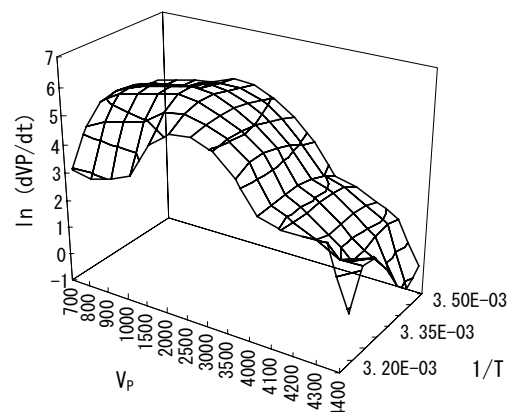


図-10 曲面化した超音波伝播速度と多項式近似したアーレニウスプロットの関係(R)

28, 35℃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。材齢に関しては、土木学会・コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕に示される有効材齢で表現した。この有効材齢では、活性化エネルギーを一定値として温度履歴の影響が考慮される。実測値は、11, 20, 28, 35℃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 35℃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 35℃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。実際の供試体の温度履歴には、打込み温度に加えて水和熱による温度変化が含まれているが、超音波伝播速度の計算過程では、このようなコンクリートの温度履歴を忠実に取り入れている。打設温度 11, 20, 28, 35℃以外の温度水準においても推定モデルによる実測値の再現性は良好であった。

3.2 超若材齢時からの静弾性係数の推定

筆者らは参考文献 2)において超音波伝播速度による若材齢膨張コンクリートの弾性係数の評価法を検討している。図-12 に打設・養生温度が 10, 20, 30℃の場合の超音波伝播速度と静弾性係数の結果を示す。これより、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ことがわかる。これらの結果から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計算式として、表-1 の配合を対象に式(2)を示している。

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

E_c : 静弾性係数 (N/mm²)
 V_p : 超音波伝播速度 (m/s)

式-2 の計算モデルによって、図-11 で推定し

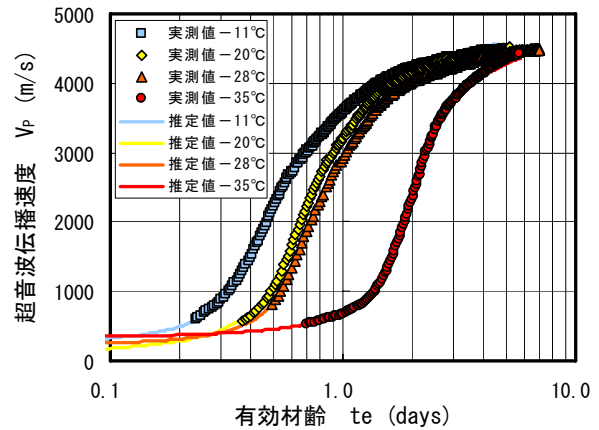


図-11 超音波伝播速度の推定結果

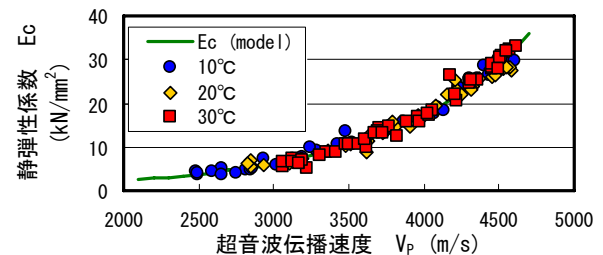


図-12 超音波伝播速度と静弾性係数の関係
(10℃, 20℃, 30℃)

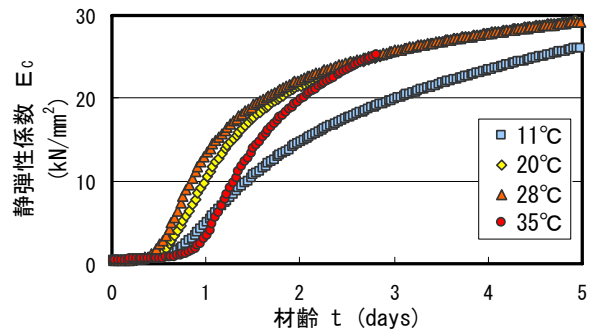


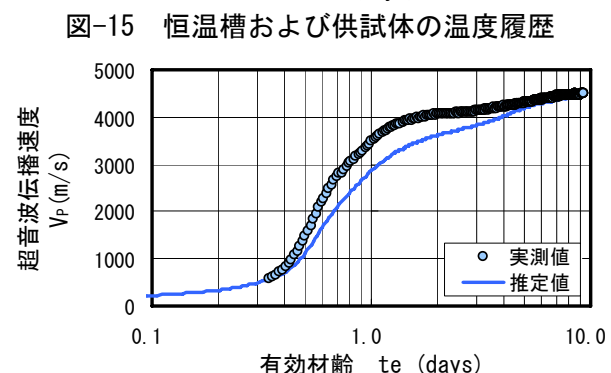
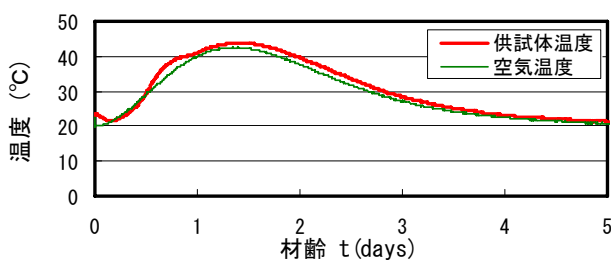
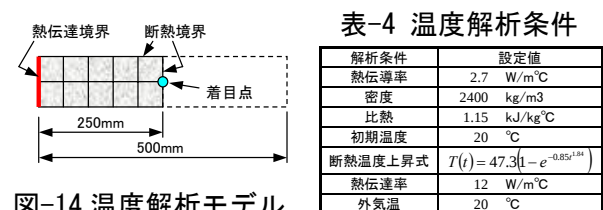
図-13 材齢と推定した静弾性係数の関係(R)

た超音波伝播速度を用い、若材齢膨張コンクリートの静弾性係数の経時変化を推定した。それらの結果を図-13 に示す。これより、材齢と超音波伝播速度の関係と同様に 35℃のケースでは、静弾性係数の発現が著しく遅延していることがわかる。また、その他のケースでは温度が低いほど静弾性係数の発現が遅れる傾向を十分に推定することができている。この方法により、超音波伝播速度の応用で、超若材齢時の膨張コンクリートの静弾性係数の変化を推定できる。

3.2 実構造物の温度条件での推定モデルの検討

実際のマスコンクリート構造物では、コンクリートは水和熱によって大きな温度変化を受け

る。そこで、実構造物の温度変化条件における超音波伝播速度推定モデルの精度を確認することを目的とし、供試体に強制的な温度変化を与えた実験を行った。供試体に与える温度履歴は、厚さ 500mm の壁状構造物を想定し、FEM 温度解析によって求めた壁中心部の温度を用いた。図-14 に FEM 温度解析モデル、表-4 に温度解析条件を示す。断熱温度上昇式については、同じ配合のコンクリートの断熱温度上昇試験結果より求めた。実験では、図-1 の供試体をコンピュータによる温度制御ができる恒温槽に入れ、空気温度の制御により温度履歴を供試体に与えた。恒温槽内の気温および供試体中心部の温度の測定結果を図-15 に示す。空気の温度は、温度解析結果に完全に一致させている。供試体については、供試体コンクリート自身の水和熱の影響やタイムラグが出ているものの、おおむね狙った温度履歴を与えることができた。超音波伝播速度の測定結果と、計算モデルによる推定結果を図-16 に示す。コンクリートが大きな温度変化を受ける場合には、大まかな傾向を捉えることは



できるものの、図-10 のモデルでは十分な精度で超音波伝播速度の増加を推定することができないことがわかった。精度を向上させるためには、さらに温度の範囲を広げた実験データを加え、計算モデルに取り入れることが必要である。

4. まとめ

1. 水和熱抑制型膨張コンクリートの超音波伝播速度のアーレニウスプロットは直線にならず、高温時に超音波伝播速度変化率が低下する特異な形状を示す。
2. 非線形のアーレニウスプロットを超音波速度別に表示し、それらを補間することで得られる曲面により、水和熱抑制型膨張コンクリートの超音波伝播速度、すなわち剛性変化の特殊な温度依存性をモデル化できる。
3. 曲面のアーレニウスプロットによる剛性変化推定モデルは、実験を行った温度水準の範囲に限れば、若材齢時からの超音波伝播速度の増加を精度よく表現できる。
4. 実構造物のように著しい温度変化を受ける場合では、本モデルの精度はまだ十分とは言えず、さらに温度の範囲を広げた実験データを加えることによる改良が必要である。
5. 本研究は、単一の配合に対する実験結果を基に考察したものであり、種々の配合条件に対応できる汎用性の検討が今後の課題である。

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。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 臼井裕規 他：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
- 2) 須藤卓哉 他：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，平成 18 年度土木学会北海道支部論文報告集第 63 号，E-20，2007.2