

超音波速度による若材齢コンクリートの弾性係数の評価に関する研究

函館工業高等専門学校 正会員 工修 ○澤村 秀治
 長岡技術科学大学 正会員 Ph. D. 丸山 久一
 アイレック技建(株) 永島 裕二

1. はじめに

膨張コンクリートにおける膨張ひずみの発現性状や温度依存性、超若材齢時を含むコンクリートの自己収縮、マスコンクリートの温度応力解析における若材齢クリープの評価など、若材齢時のコンクリートの体積変化を取り扱う研究テーマでは、打設直後からのコンクリートの力学特性の変化、主として弾性係数の変化を的確に評価しなければならない。中でも、膨張コンクリートの膨張現象のような若材齢コンクリートの体積変化は、コンクリートの強度発現や剛性の変化と密接に関係している。このような膨張コンクリートの膨張ひずみの発現性状における温度依存性を明らかにし、それらをモデル化するためには、超弱材齢の強度発現途上にあるコンクリートの弾性係数の変化を正確に測定するツールが必要である。

この研究は、コンクリート中における超音波伝播速度の測定を供試体にプローブ（発信探触子・受信探触子）を押し付けて行うという従来の方法に対する概念を払拭し、専用の型枠にあらかじめプローブをセットした状態でコンクリートを打設することにより、強度を有しないコンクリートでもプローブで挟み込めるような状態を作り出して直ちに計測を始めるという独創的な発想によるものである。また従来の超音波による測定器は、プローブをセットしたままの状態での連続自動計測には対応していないが、本研究の計測システムではパーソナルコンピュータを組み合わせることでソフトウェアによる自動計測が可能である。さらにこの計測システムでは受信波形データを全て保存することとしているので、コンクリートの強度が低い段階で超音波の減衰が大きく微弱な受信波形しか得られない場合でも、波形データを時系列に並べて比較することによって超音波の到達時刻を特定できるような解析支援システムを導入し、500m/sec未満からの超音波伝播速度の測定を可能とした。

これらによって本研究では、材齢ゼロからの超弱材齢コンクリートの剛性の変化を、①正確に、②非破壊で、③連続自動的に測定することができる計測システムを開発し、それら計測結果の評価方法を確立することを目的としている。

2. 超音波計測システム

2.1 システム開発の概要

開発した計測システムで使用する供試体のセッティングは図-1のようであり、製作したアルミ型枠の中にコンクリートを打設し超音波伝播速度の変化を計測しようとするものである。超音波プローブは厚さ0.1mmのステンレス粘着シートを介してコンクリートに密着し、型枠とコンクリートはエアキャップで絶縁され超音波が型枠を伝播しないような構造となっている。計測システム全体の構成は、図-2のよう

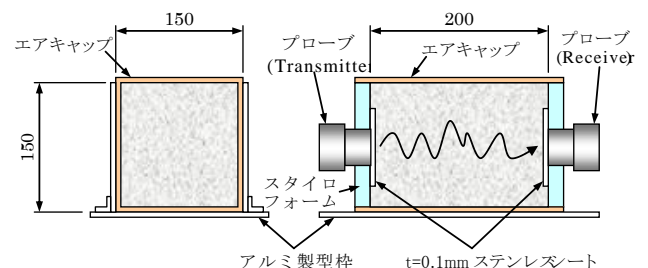


図-1 超音波計測供試体の構造

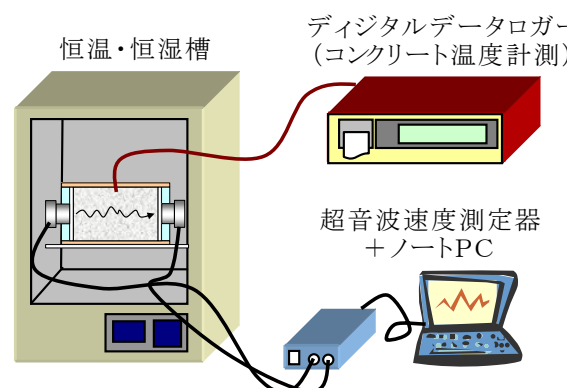


図-2 超音波計測システムの基本構成

になっており、これらは超音波速度測定器と計測制御・データ収録用のパーソナルコンピュータ、コンクリート温度計測用のデジタルデータロガー、プローブを装着したコンクリート供試体に一定の、あるいは変動する温度環境を与える恒温槽から構成される。この計測システムは、超音波計測の制御、データの収録、受信波形データの解析と伝播速度の分析を汎用パーソナルコンピュータ上で動作するソフトウェアで全て行おうとしているところに特徴があり、柔軟なシステム設計が可能である。

2.2 超音波計測データ

図-3に、若材齢コンクリートに対して行った超音波計測の受信波形データの例を示す。それぞれの波形データは、縦軸を時間 (μs) とし、15分間隔で測定した受信波形データが並べて表示されている。これらの図より、コンクリートの硬化が進むに従って、徐々に到達時刻が早まり、受信波も強くなることわかる。

コンクリート打設直後しばらくの間は、コンクリート内部での減衰が大きく受信波がかなり微弱であるために到達時間を特定するための閾値の設定が難しく、ソフトウェアによる超音波到達時間の自動認識はできない。この段階では、時間をさかのぼって超音波受信波形を比較し、人間の目による判断で特徴的なピークを追跡することによって到達時刻を推定し、超音波伝播速度を求めている。

図-4に、受信波形から求めたコンクリートの超音波伝播速度の変化を、時系列データとして整理した例を示す。このように、本計測システムはコンクリートの超音波伝播速度の変化を滑らかに、かつ鮮明な連続データとして捉えることができる。また、この超音波計測は外乱の影響を受けにくいことから、結果のばらつきが無く実験の再現性が極めて高いことに大きな特徴がある。

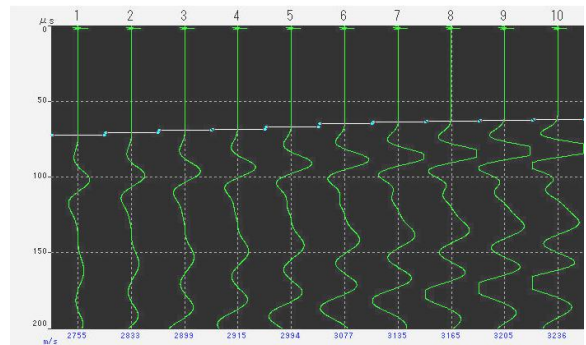


図-3 超音波受信波形データの例

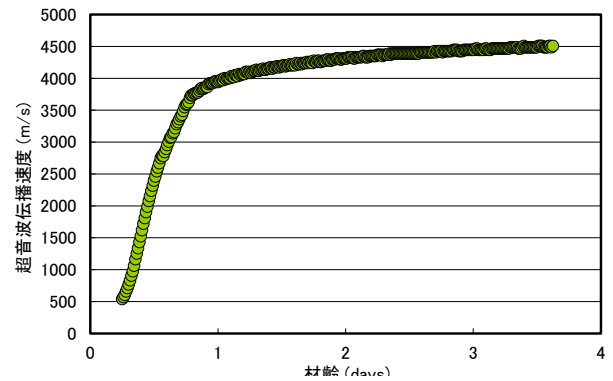


図-4 超音波速度時系列データの例

3. 本研究の応用例

3.1 モルタル超音波速度発現特性の温度依存性¹⁾

若材齢コンクリートの超音波速度には、コンクリートの粗骨材容積率が大きな影響を及ぼし、粗骨材の影響を適切にモデル化するためには、まずモルタル超音波速度発現特性の温度依存性を適切に把握しておく必要がある。ここでは、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比 $W/C=45\%$ 、細骨材容積率 $Sc=40\%$ としたモルタルに対する検討事例を示す。

図-5 にモルタル供試体温度の経時変化を示す。温度履歴には水和熱による温度上昇が含まれており、7水準の打設・養生温度によって、水和発熱の性状が大きく異なるため、その結果、温度履歴に大きな差を生じている。図-6 にモルタル供試体の超音波速度の経時変化を示す。計測結果では、それぞれ滑らかな超音波速度の上昇が記録されており、また温度が高いほど超音波速度の増加、すなわち強度発現が早まる傾向が明らかである。

セメントの水和反応は化学反応の一種であるため、その反応速度は温度の影響を著しく受ける。このような反応速度と反応温度の定量的な関係はアーレニウスの反応速度則を基にしたアーレニウスプロットにより整理することができる。本検討事例では、モルタルの超音波速度の単位時間あたりの変化、すなわち超音波速度変化率 (dv_m/dt) を反応速度を表すパラメータとみなし、アーレニウスプロットによる温度依存性の評価を行った。超音波速度変化率と温度の関係は、式(1)で表すことができる。

$$\ln\left(\frac{dv_m}{dt}\right) = \ln\left(\frac{dv_m}{dt}(T_s, v_m)\right) - \frac{E(v_m)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right) \quad (1)$$

v_m : モルタルの超音波速度 (m/s)
 T : モルタルの絶対温度 (°K)
 $-E(v_m)/R$: 活性化エネルギー (m/s・°K/day)
 T_s : 基準温度 (293°K=20°C)

式(1)は超音波伝播速度変化率の対数 $\ln(dv_m/dt)$ と絶対温度の逆数 $1/T$ の関係を表す直線の式である。直線の傾きは $-E(v_m)/R$ に相当し、 $dv_m(v_m, T_s)/dt$ はモルタルの超音波速度が v_m になり、かつ温度が 20°C ($T_s=293^\circ\text{K}$) であるときの超音波速度変化率である。

図-7 は式(1)に基づいたアーレニウスプロットを超音波速度別に 3D 表示したものである。x 軸が絶対温度の逆数 $1/T$ 、y 軸が超音波速度 v_m 、z 軸が超音波速度変化率の対数 $\ln(dv_m/dt)$ となっている。計測データより求めたアーレニウスプロットは良好な直線性を示すことから、活性化エネルギーは $1/T$ に対しては一定値としてよい。一方、超音波速度の水準によってアーレニウスプロットの傾きが変化するので、活性化エネルギーは超音波速度の増加に依存する。

一方、セメントの水和反応の温度依存性を表現する方法の一つに有効材齢があり、土木学会・コンクリート標準示方書【設計編】では収縮やクリープの検討で用いられている。有効材齢の概念は、式(1)において活性化エネルギーが一定値、すなわち v_m の関数にならないと仮定した場合に相当する。式(2)にコンクリート標準示方書【設計編】で用いている有効材齢の式を示す。この式では活性化エネルギーを“-4000”としていることになる。これに対して式(3)は、活性化エネルギーを図-7 のアーレニウスプロットの傾きの平均“-4536”を用いた有効材齢である。

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

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left[15.48 - \frac{4536}{273 + T/T_0}\right] \quad (3)$$

Δt_i : 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-8 に、モルタルの超音波速度 v_m と有効材齢 : 式(3)の関係を示す。温度履歴がまったく異なる条件であっても、有効材齢で整理することによって、モル

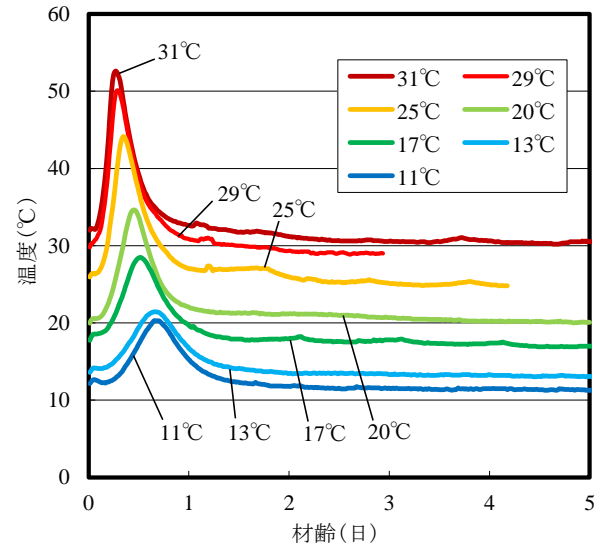


図-5 モルタル供試体温度の経時変化

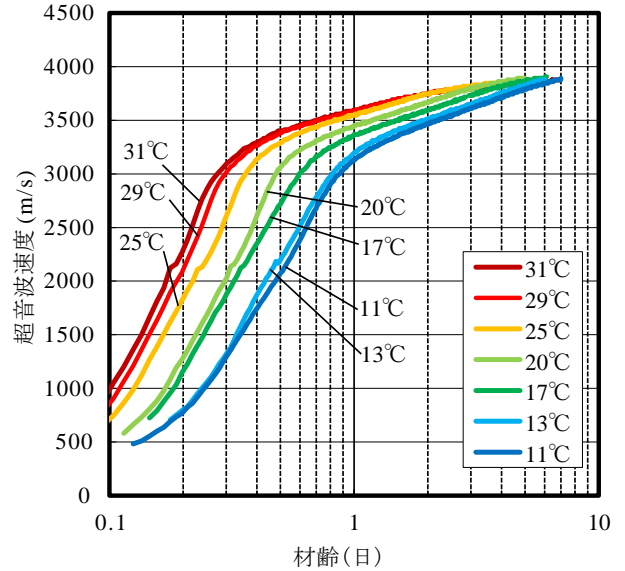


図-6 モルタル超音波速度の経時変化

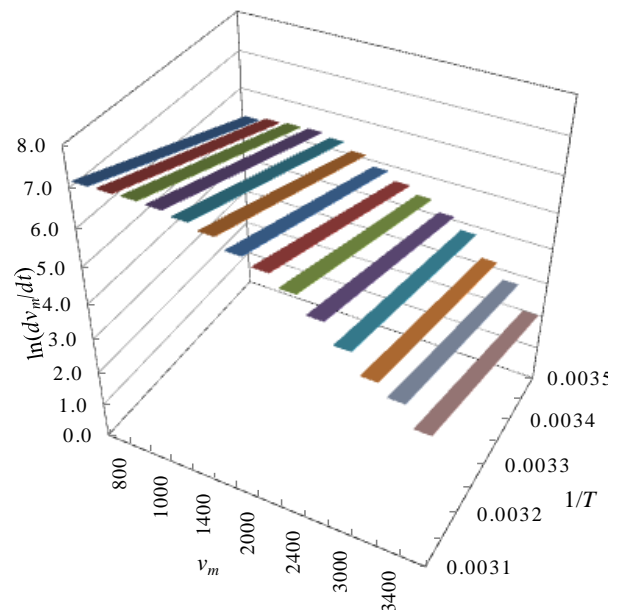


図-7 超音波速度のアーレニウスプロット

タルの超音波速度のカーブは同一のラインに集まる。したがって、モルタル超音波速度の変化の温度依存性は、式(3)によって適切に表現できることがわかる。

従来のようにコンクリートの弾性係数を不連続、断片的に測定する方法では、このように精密な解析・検討を行うことは不可能である。若材齢コンクリートの超音波計測では、わずかな温度の違いが計測データに鮮明に表れ、かつ計測データには乱れやばらつきがほとんど含まれないため、精度の高い検討が可能となる。

3.2 弾性係数と超音波速度の関係²⁾

若材齢時のコンクリートに発生する応力を計算するような問題では、強度発現途上にあるコンクリートの弾性係数の変化を適切に評価しなければならない。しかしながら、強度発現途上で弾性係数の変化のデータを得ることは一般的には困難である。これに対し、超音波計測では強度発現過程における剛性変化の実測値が得られるため、別途実験によってコンクリートの弾性係数と超音波速度の関係を求めておけば、これを介して超音波計測から弾性係数の実測値を得ることができる。コンクリートの弾性係数と超音波速度の関係を求めた例として図-9、図-10を示す。これらのデータは、セメントの一部を石灰石微粉末で置換することによってセメントペースト強度をコントロールして粗骨材容積率 G_c を0~50%の範囲で変えた疑似若材齢コンクリートを用い、φ100mm円柱供試体の超音波速度、動弾性係数、静弾性係数の測定結果を整理したものである。これらによると、コンクリートの石灰石微粉末置換率および粗骨材容積率が異なり、強度に差があっても弾性係数と超音波速度の関係は概ね同一曲線上にあり、簡単な回帰式でモデル化することが可能である。

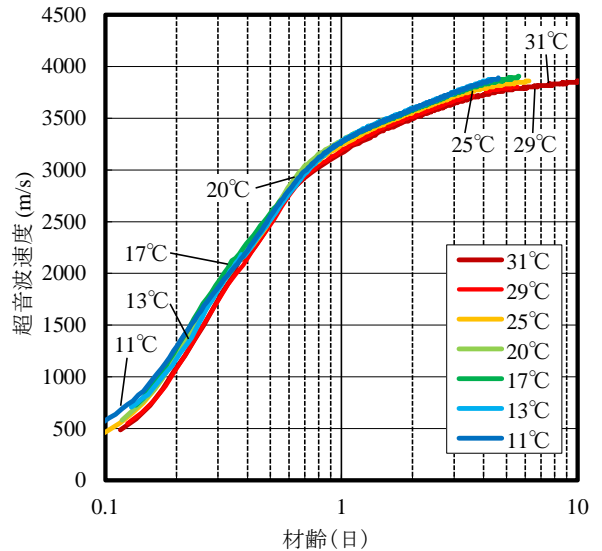


図-8 モルタル超音波速度と有効材齢の関係

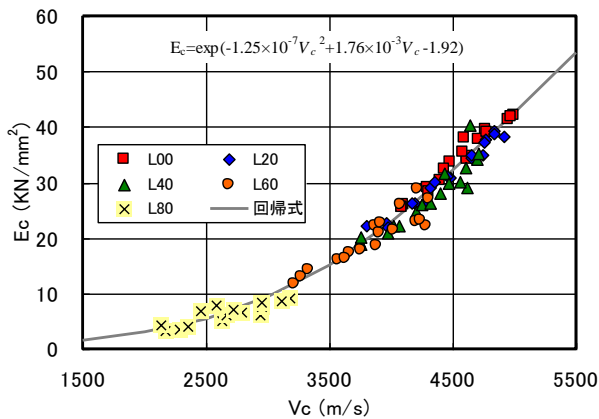


図-9 静弾性係数と超音波速度と関係

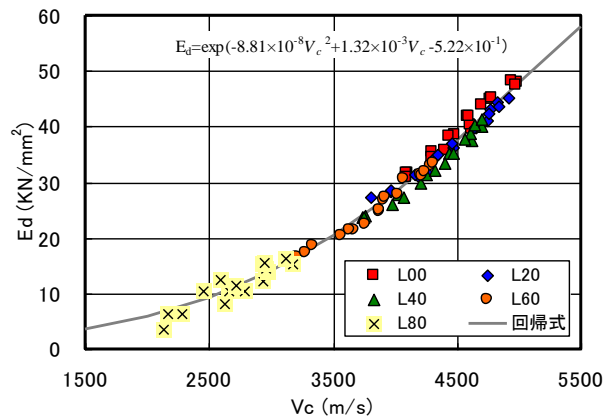


図-10 動弾性係数と超音波速度の関係

4. まとめ

本報告で紹介した超音波計測システムおよび計測結果の評価手法は、強度発現途上にあるコンクリートの強度発現、剛性変化の評価を精度良く行うことができることから、新たな計測方法として非常に有望であり、今後、様々な目的による応用がなされることを期待する。

参考文献

- 1) 澤村秀治, 安澤朋也, 丸山久一, 永島裕二: 強度発現途上にあるコンクリートの超音波速における粗骨材量の影響の定量化, コンクリート工学年次論文集, 第32巻, pp. 551-556, 2010.7
- 2) 大西逸樹, 安澤朋也, 澤村秀治: 疑似若材齢コンクリートの力学特性と超音波速度に対する骨材の影響, 平成21年度土木学会北海道支部論文報告集, 第66号, 2010, E-8(CD-ROM)