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

Research on the Evaluation method of Early Age Strength Property of Concrete by Application of Ultrasonic Speed

函館工業高等専門学校 環境都市工学科 学生員 臼井 裕規(Yuki Usui) 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) アイレック技建㈱ 開発営業部 永島 裕二(Yuji Nagashima)

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. 筆者らは現在,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の研究に取り組んでいるが,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おり,これらの相互作用を明らかにするために超若材齢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とを実感している.

超音波伝播速度を応用したコンクリートの探査や力学特性の評価²⁾には多くの研究や適用事例があるが、これらはすべて硬化コンクリートを対象にしたものであり、強度発現途上にある若材齢コンクリートを対象にした研究事例は調査した範囲では存在しない、これは、非破壊によってコンクリートの力学特性を評価するために超音波が有効であることについては多くの研究者で共通の認識があるものの、供試体の取り扱いさえもできないほどの若材齢コンクリートの計測には超音波の適用は不向きであると考えられているためであろう。

本研究は,若材齢コンクリー Hの強度発現や弾性係数の変化の評価に,超音波伝播速度の応用を提案するものである.今年度の研究では,打設直後からコンクリー Hの超音波伝播速度を測定することができる自動計測システムを開発し,これによる超音波伝播速度の計測データと,これと対を成す若材齢コンクリー Hを対象としたコンクリー Hの圧縮強度 静弾性係数試験データを組み合わせることによって,超音波伝播速度による若材齢コンクリー Hの弾性係数の評価方法について検討を行った.

2.実験の概要

2.1 コンクリートの配合

実験で使用したコンクリートの材料を表 - 1に、配合の一覧を表 - 2に示す . 開発した計測システムによる超音波伝播速度の測定は、普通ポルトランドセメントを用いた配合 N と膨張コンクリートの配合 R および S に対して、それぞれ打設・養生温度を 10 ,20 ,30 の 3 水準に設定して行った . 膨張混和材の種別は表 - 1に示したとおりで、添加量については低添加型膨張混和材の標準使用量とし、セメント内割りで20kg/m³とした .N ,R ,S の標準的な配合の他に sa ,wc シリーズの配合では、細骨材率 s/a と水セメント比 W/C を大きく変えて、配合条件が超音波伝播速度と静弾性係数の関係

に及ぼす影響を確認することとした.ただし,これらの配合では単位水量を統一しているので,細骨材率の大きいsa75 はセメントペーストが明らかに不足しており,sa100 については練混ぜが不可能なため単位水量を増しペースト量を増加した.また,細骨材を使用しないsa0 ではセメントペーストが分離して,粗骨材空隙を十分に充填できない状態であった.

表 - 1 使用材料一覧

| 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 |
| | CSA系乾燥収縮抑制型 | 3.08 |
| 膨張混和材 (R) | CSA系水和熱抑制型 | 2.83 |
| 細骨材 | 函館市豊原産天然砂 | 2.59 |
| 粗骨材 | 上磯峩朗産砕石2005 | 2.70 |
| 混和剤 | AE減水剤標準型 | 1.08 |
| 助剤 | micro-air 101 (1000倍希釈) | 1.00 |

表 - 2 コンクリー 1の配合

| 配合名称 | W/C | s/a | 単位質量(kg/m³) | | | | | | | |
|------------|------|-------|-------------|-----|-------|-------|------|------|-------|------|
| 配口口小 | % | % | W | O | Ex(S) | Ex(R) | S | G | AE減水剤 | AE助剤 |
| N | 55.0 | 48.0 | 165 | 300 | 0 | 0 | 858 | 968 | 4.50 | 0.75 |
| R | 55.0 | 48.0 | 165 | 280 | 20 | 0 | 857 | 967 | 4.50 | 0.75 |
| S | 55.0 | 48.0 | 165 | 280 | 0 | 20 | 857 | 968 | 4.50 | 0.75 |
| sa 0 | 55.0 | 0.0 | 165 | 300 | 0 | 0 | 0 | 1862 | 0.00 | 0.00 |
| sa25 | 55.0 | 25.0 | 165 | 300 | 0 | 0 | 447 | 1397 | 2.40 | 0.00 |
| sa50(wc55) | 55.0 | 50.0 | 165 | 300 | 0 | 0 | 893 | 931 | 2.40 | 0.00 |
| sa75 | 55.0 | 75.0 | 165 | 300 | 0 | 0 | 1340 | 466 | 7.50 | 1.80 |
| sa100 | 55.0 | 100.0 | 230 | 300 | 0 | 0 | 1521 | 0 | 12.55 | 0.00 |
| wc30 | 30.0 | 50.0 | 165 | 550 | 0 | 0 | 791 | 824 | 11.00 | 0.00 |
| wc40 | 40.0 | 50.0 | 165 | 413 | 0 | 0 | 847 | 883 | 4.95 | 0.00 |
| wc70 | 70.0 | 50.0 | 165 | 236 | 0 | 0 | 920 | 959 | 1.65 | 0.00 |
| wc90 | 90.0 | 50.0 | 165 | 183 | 0 | 0 | 941 | 981 | 1.28 | 0.00 |

2.2 超音波伝播速度の自動計測

超音波計測用供試体,計測システムの概要を図 - 1,図 - 2に示す.超音波伝播速度測定用の供試体は長さを200mm とし,アルミ製型枠とコンクリートの間はエアキャップで絶縁した.供試体端部の型枠は発泡ポリスチレンパネルと厚さ0.5mmのステンレス板で作成し,一方に超音波発振探触子,他方に受信探触子をセットしておき,この中にコンクリートを打設して超音波伝播速度を測定した.

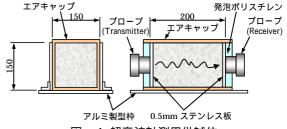


図 - 1 超音波計測用供試体

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,伝播速度の計算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行う.また計測された受信波形データは全て保存されているので,それらの追跡によって Vp=2500m/s 未満の段階で ノイズに埋もれがちな微

弱な受信波形からも超音波の到達時刻を読み取ることが可能である.供試体の温度の計測には熱電対を用い,中心部と表面付近の温度をディジタルデータロガーで測定した.



図 - 2 計測システムの概要

2.3 若材齢コンクリートの圧縮強度 静弾性係数試験

コンクリートの超音波伝播速度と静弾性係数の関係を把握するために、配合Nのコンクリートに対して3本×12材齢=36本の円柱供試体を作成し、圧縮強度静弾性係数試験を行った.供試体は、打設後から気温20~22の実験室内で型枠に入れたまま封かん状態で養生した.供試体の取り扱いが可能な強度が得られたらジェットセメントペーストでキャッピングし、ただちに脱型して供試体の超音波伝播速度の測定、コンピュータで制御された圧縮試験機による静弾性係数試験を行った.コンクリートの応力・ひずみ関係の測定にはコンプレッソメーターを使用し、静弾性係数はJISA1149-2001「コンクリートの静弾性係数試験法」に従い、応力・ひずみ曲線上のひずみが50meの点と圧縮強度の1/3の点を結ぶ割線の勾配として求めた.なお、円柱供試体の受ける温度履歴についてはダミー供試体の温度を計測しておき、有効材齢で管理することにした.

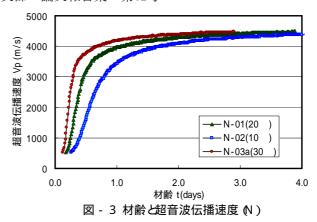
3.実験結果

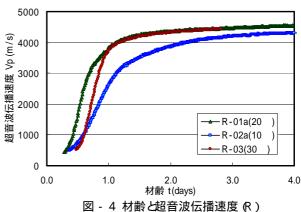
3.1 超音波伝播速度の自動計測結果

図 - 2に示した計測システムを用い、コンクリー けび直後から超音波伝播速度の計測を行った.打設直後でコンクリートの強度発現が十分でない段階では、供試体内での超音波の減衰が大きく、受信波が微弱であるため、超音波伝播速度を測定することはできない.今回使用した計測システムと供試体の組み合わせでは、超音波伝播速度が 2500m/s 程度になるとソフトウェアが受信波形から自動的に到達時間を読み取ることができ、伝播速度の自動計測が可能になる.超音波伝播速度が 2500m/s 未満の部分では、パーソナルコンピュータに保存された受信波形を分析することによって到達時間を特定し、超音波伝播速度を求めた.この方法によって、本計測システムでは、超音波伝播速度が500m/s 程度までのデータを得ることができた.

図 - 3に結合材に普通ポルトランドセメントを用いた配合 Nの結果を、図 - 4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 の結果を示す .CSA 系乾燥収縮抑制型膨張混和材を用いた配合 S の結果については、本稿執筆時点では計測中であった.

図 - 3には,打設・養生温度 10 ,20 ,30 のケースの





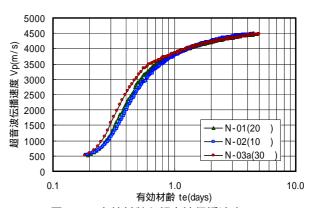


図 - 5 有効材齢と超音波伝播速度(N)

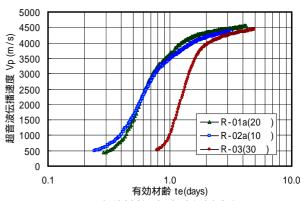


図 - 6 有効材齢 と超音波伝播速度 (R)

結果をあわせて示しているが、それぞれ滑らかな超音波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が、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 - 4は水和熱抑制型膨張材を併用し

た配合 R のケースであるが,超音波伝播速度の立ち上がりは図 - 3に比べて全体として遅れる傾向がある.さらに 30 のケースでは初期の超音波伝播速度の上昇傾向が 10 の結果と逆転するほど遅れていることがわかる.これは,水和熱抑制型膨張材には温度感応型遅延材が含まれており,今回の計測結果はその効果を明瞭に捉えたといえる.

次にこれらの結果を,コンクリー ド温度の計測結果を用い,時間軸を有効材齢 1)で整理してみた.有効材齢には,コンクリート標準示方書 構造性能照査編]による式(1)を用いた.

$$t_{e} = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_{i} \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_{i})/T_{0}} \right]$$
 (1) Δt_{i} 温度が T である期間の日数 T_{0} :1

図 - 5に配合Nの結果を示す.グラフで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,超若材齢域における超音波伝播速度の上昇傾向の温度依存性を,有効材齢によって適切に表現できることがわかった.図 - 6は配合Rの結果を示したものであり,有効材齢で表示することによって,30 のケースの強度発現遅延傾向がさらに明瞭に現れている.一方で,温度が10 ,20 のケースでは,温度が高いほうに遅延傾向があるものの,温度依存性を有効材齢で表現できることがわかる.

3.2 超音波伝播速度と静弾性係数の関係

超音波伝播速度とコンクリートの静弾性係数の関係を把握するために,若材齢コンクリートの圧縮強度 静弾性係数試験を行った.計測されたコンクリートの応力 - ひずみ曲線の例を図 - 7に示す.最初に記録された有効材齢 0.4 日の圧縮強度は0.8N/mm² であった.

図 - 8に ,コンクリー トの超音波伝播速度と静弾性係数の

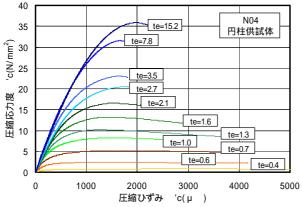


図 - 7 コンクリー Hの応力 - ひずみ曲線 (N)

関係を示す .静弾性係数試験は 3 本の供試体を一組として行ったが ,図 - 8には ,個々の円柱供試体の超音波伝播速度と静弾性係数の関係がプロットされている .縦軸の静弾性係数を図のように対数で表示すると ,これらには概ね線形関係が認められるが ,ここでは超音波伝播速度と静弾性係数の関係を2次式で近似することとした .

図 - 8より,超音波伝播速度と静弾性係数の関係を表現す

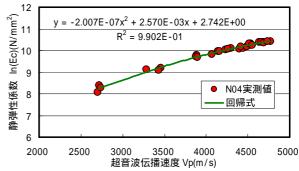


図 - 8 超音波伝播速度 と静弾性係数の関係 (N)

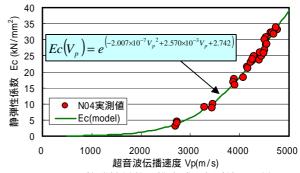


図 - 9 静弾性係数の推定式と実測値の関係

るモデルとして,静弾性係数の実測値が得られている範囲の下限と超音波伝播速度がゼロの間の領域を外挿できる式(2)を求めた.図・9に計算モデルと実測値の関係を示す.

$$E_c = e^{\left(-2.007 \times 10^{-7} V_p^2 + 2.570 \times 10^{-3} V_p + 2.742\right)}$$
 (2)

E_c:コンクリー lの静弾性係数 (N/mm²)

 V_n :超音波伝播速度 (m/s)

既往の研究²⁾では,超音波伝播速度と動弾性係数の関係を2次式で表現したものがあるが,2次式のモデルでは下に凸の曲線になるので,小さい超音波伝播速度の領域を外挿して表現することはできない.

3.3 配合条件が大きく異なるコンクリートの超音波伝播速度と静弾性係数の関係

コンクリートの配合条件が超音波伝播速度と静弾性係数の関係に及ぼす影響を把握するために、細骨材率と水セメント比を大きぐ変動させた配合 sa シリーズ、wc シリーズについても円柱供試体を採取し同様の試験を行った.水セメントはは圧縮強度とコンクリート中の細孔や空隙量を支配し、細骨材率はコンクリート中の粗骨材の体積濃度に関係するため、超音波伝播速度の測定値に影響を及ぼすと考えた.

図 - 10に超音波伝播速度と圧縮強度の関係を示す、このように配合条件が極端に異なるコンクリートでは、超音波伝播速度と圧縮強度の関係は大きくばらついている。水セメント比のみを変えた wc シリーズのみをみると両者の間にはある程度の相関が認められるものの、細骨材率を変えた sa シリーズでは全く相関が認められない、sa0、sa25 はモルタル分が完全に不足し、sa75、sa100 では細骨材間を充填するセメントペースト量が明らかに不足しており、良好なコンクリートとしての形を成しておらず、圧縮強度の測定値は信頼できるものではない。

図 - 11に sa ,wc シリーズのコンクリー hの超音波伝播速度

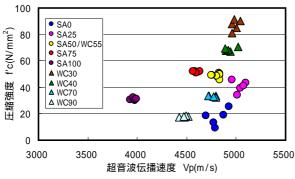


図 - 10 超音波伝播速度 と 圧縮強度の関係 (sa·wc)

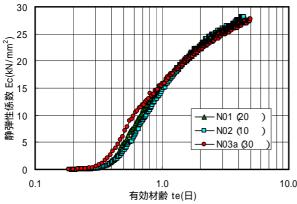


図 - 12 有効材齢と推定静弾性係数の関係 (N)

と静弾性係数の関係を示す。図 - 10に比べてばらつきが小さくなっており、両者にはある程度の相関関係が認められる。また、極端に細骨材率が大きい sa75 ,sa100 のケースを除いて式(2)の計算モデルのライン上にデータが分布している。式(2)として提案した計算モデルは、多少の配合条件の変動があっても、コンクリートの超音波速度と静弾性係数の関係を実用的に十分な精度で表現できることがわかる。

4.超音波伝播速度による静弾性係数の推定

式(2)の計算モデルによって、図-3、図-4に示した超音波伝播速度の実測値を用い、超若材齢域のコンクリートの静弾性係数の経時変化を推定してみた。それらの結果を図-12、図-13に示す。図-12の普通ポルトランドセメントを用いた配合では、温度が10、20、30の3水準ともに静弾性係数が発現する材齢は一致しており、その後の上昇傾向もほぼ同一のライン上にあるので、有効材齢で静弾性係数を説明できる。図-13の水和熱抑制型膨張混和材を用いた配合では、図-12と比較して静弾性係数の立ち上がりが遅れていることが明瞭に現れている。特に、30のケースでは温度感応型遅延材による影響が顕著に現れた。この方法により、超音波伝播速度の応用で、超若材齢域の静弾性係数の変化を間接的に測定することができる。

5.まとめ

今回の実験結果から,以下の知見を得た.

- 1. 開発した計測システムによって,超音波伝播速度が 500m/s 程度から上昇傾向を計測することができた.
- 2. 普通ポルトランドセメントを用いた配合では,超若材齢域における超音波伝播速度の上昇傾向の温度依存性

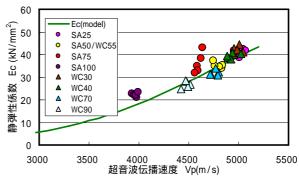


図 - 11 超音波伝播速度と静弾性係数の関係 (sa·wc)

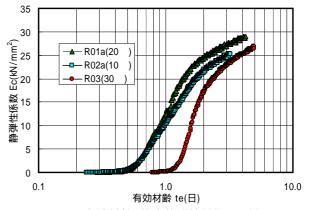


図 - 13 有効材齢と推定静弾性係数の関係 (R)

を有効材齢によって適切に表現できること,水和熱抑制型膨張混和材を用いた配合では,高温時に起こる強度発現遅延傾向を明瞭に捉えることができた.

- 3. 若材齢 コンクリー トの静弾性係数試験と組み合わせることによって,超音波伝播速度と静弾性係数の関係を示す計算モデルを求めた.
- 4. 細骨材率と水セメント比を大きく変動させた配合について同様の試験を行い、それらが超音波伝播速度の測定値に及ぼす影響を調べた.超音波伝播速度と圧縮強度の関係には大きなばらつきがあるものの、超音波伝播速度と静弾性係数の関係では、配合条件が大きく変動しても、概ね計算モデルに一致することがわかった.
- 5. 今回測定した超音波伝播速度の実測値と超音波伝播速度と静弾性係数の計算モデルにより今までできなかった超若材齢時からの静弾性係数の変化を,間接的ではあるものの実測することができるようになった.

参考文献

- 1)コンクリー ト標準示方書[構造性能照査編],土木学会, 2002,pp30-37
- 2)高田龍一,平木洋輔,緒方英彦,服部九二雄,超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価,コンクリート工学年次論文報告集24,pp1563-1568,2002
- 3)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