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,若材齢コンクリート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トの超音波 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 若材齢コンクリートを対象としたコンクリートの圧縮強度 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ト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 と水セメンド比 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/cm ³)	
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15	
膨張混和材 (S)	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	

			-					-		
配合夕秋	W/C	s/a	単位質量(kg/m ³)							
眼口石柳	%	%	W	С	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	00.0	50.0	165	183	0	0	0/11	081	1 28	0.00

表 - 2 コンクリートの配合

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.



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50mc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 けび設直後 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



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 1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 1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,静弾性係数は3.9kN/mm²であった.



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



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.

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.水セメント比は 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 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トの超音波伝播速度



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





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ド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