

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月18日現在

機関番号：50101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：平成21年度～平成23年度

課題番号：21560492

研究課題名（和文）：超音波伝播速度による強度発現途上にあるコンクリートの弾性係数評価方法に関する研究

研究課題名（英文）：Research on Evaluation of Elastic Modulus of Early Age Concrete by Ultrasonic Velocity

研究代表者：澤村 秀治 (SAWAMURA SYUJI)

函館工業高等専門学校・環境都市工学科・教授

研究者番号：70321362

研究成果の概要（和文）：

コンクリートの超音波速度は、細骨材量や粗骨材量などコンクリート中の材料の構成の影響を強く受け、セメントマトリックス強度が小さい強度発現途上の若材齢コンクリートでは、その傾向が著しい。したがって、超音波計測の結果を汎用的なものとするためには、骨材量の影響を適切に評価しなければならない。本研究では、骨材の超音波速度がその容積率に応じてコンクリートの超音波速度に寄与するとしてモデルを考え、骨材量がコンクリートの超音波速度に及ぼす影響の定量化を試みた。さらに、それらの結果を基に、コンクリートの超音波速度の計測結果から、若材齢コンクリートの弾性係数の変化を評価する手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

The composition of a concrete material, like sand-aggregate ratio or coarse aggregate content, strongly influences ultrasonic wave velocity of concrete. In early age concrete with small cement matrix strength, the tendency is more remarkable. Therefore, in order to generalize the measurement technique by the ultrasonic wave velocity, it is necessary to evaluate the influence of the aggregate content. In this study, the model assumed that the ultrasonic velocity of aggregate influenced ultrasonic velocity of concrete by the percentage of the aggregate volume content. And, we tried the quantification of the influence that the aggregate content exerted on ultrasonic velocity of concrete. In addition, based on those results, we proposed the technique for evaluating the change in the stiffness coefficient of the early age concrete from the measurement result of a ultrasonic wave velocity of concrete.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成21年度	1,700,000	510,000	2,210,000
平成22年度	1,300,000	390,000	1,690,000
平成23年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：若材齢コンクリート，超音波速度，骨材容積率，アーレニウスプロット，有効材齢，動弾性係数

1. 研究開始当初の背景

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。例えば、研究代表者らが継続的に行っている、膨張コンクリートの膨張ひずみ発現性状における温度依存性をモデル化する研究では、コンクリートの強度発現と膨張ひずみの発現が密接に関係しているため、これらの相互作用を明らかにするために、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。

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研究代表者が調査した範囲では存在しない。これは、非破壊で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る。

超音波伝播速度とコンクリートの圧縮強度や弾性係数の関係については、鳥取大学・緒方英彦らの研究があり、たとえば「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）に、超音波伝播速度と動弾性係数の関係が示されている。しかし、これらもやはり硬化コンクリートが対象になっており、若材齢コンクリートの剛性変化を評価できるものではない。

このように、従来の硬化コンクリートを対象にした超音波計測方法・評価方法では、若材齢コンクリートの剛性変化の評価に対応することはできない。これに対して研究代表者らは、平成18～19年度に科研費による補助を受けて行った研究（課題番号18560456）において、①超音波伝播速度を利用した若材齢コンクリートの剛性変化の自動計測システムを開発し、②若材齢コンクリートの静弾性係数と超音波伝播速度の関係を実験により明らかにし、③超音波伝播速度による強度発現途上にあるコンクリートの剛性変化を評価する手法を提案している。

2. 研究の目的

これまで研究代表者らが行った実験では、主としてコンクリートの養生温度を要因として若材齢コンクリートの超音波伝播速度の変化のデータを蓄積してきた。この結果、開発した計測システムは、若材齢コンクリートの強度発現性状を容易にかつ正確に捉え

ることができ、それらの温度依存性について超音波伝播速度を介したアーレニウスプロットによるモデル化を試みるなどして、この計測システムの有用性を確認している。しかしながら、これまでのデータは、同一配合のコンクリートに対して得られたものであり、計測方法、およびその結果の評価方法を汎用的なものにするためには、①供試体の形状寸法などの計測条件、②コンクリートの配合条件の違いが若材齢コンクリートにおける超音波伝播速度計測結果に及ぼす影響を定量化しなければならない。

そこで本研究課題では、若材齢コンクリートの弾性係数の変化を評価するための計測技術を確立することを目的として、科学研究費の交付を希望する期間内に以下のことを実施し、明らかにすることとした。

①供試体長など、供試体の形状・寸法が、若材齢コンクリートの音波伝播速度計測結果に及ぼす影響を明らかにし、最適な供試体の形状・寸法を提案する。

②セメントペースト、細骨材、粗骨材それぞれの存在および体積濃度が、若材齢コンクリートの超音波伝播速度計測結果に及ぼす影響を明らかにし、それらを定量化する。

③さまざまな配合設計条件を持つ若材齢コンクリートの超音波伝播速度と動弾性係数、静弾性係数の関係を、実験結果を基に定量化する。

④超音波伝播速度による強度発現途上にある若材齢コンクリートの力学特性を評価する方法を確立し、計測方法・試験方法の標準化・規格化を提案する。

⑤若材齢コンクリートの体積変化を扱う研究テーマへの応用を提案する。

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、直ちに超音波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、開発した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指定したインターバルで記録した受信波形データを全て保存しているため、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解析支援

システムを有している。

本研究課題によって予想される成果は、先に示したような若材齢コンクリートの体積変化を扱う問題において、これまで何らかの計算モデルを仮定せざるを得なかったコンクリートの剛性変化の部分に正確な「実測値」を与えるものであり、これまでにない有力な研究ツールとなることが期待できる。

さらには、超音波計測手法、計測結果の評価方法を標準化することによって、若材齢コンクリートの強度発現性状を正確に評価する試験方法の規格化を目指す。このような試験方法を規格化することによって、例えば各種混和材料が若材齢時のコンクリートの強度発現に及ぼす影響の評価、あるいは温度がコンクリートの強度発現に及ぼす影響の精密な評価などを容易に行うことができるようになり、各分野での応用が期待できる。

3. 研究の方法

超音波伝播速度 V_p とコンクリートの弾性係数 E_c の関係は、硬化コンクリートにおいてはコンクリートの配合の違いの影響をあまり受けないことを研究代表者らの実験で確認している。しかし、セメントマトリックス部の剛性が小さい若材齢コンクリートでは、超音波伝播速度は配合の違い、特に骨材の存在や骨材量の影響を強く受けると考える。超音波伝播速度によって、強度発現途上にある若材齢コンクリートの弾性係数推定手法を汎用的なものにするためには、配合の違いが若材齢コンクリートの超音波伝播速度に及ぼす影響を実験によって明らかにしなければならない。

3-1 配合条件等を変えた超音波計測データの蓄積

これまでの研究で開発した超音波計測システムを用い、コンクリートの配合設計条件、計測条件を変えた実験を行い、超音波計測データを蓄積する。

3-2 セメントペーストの超音波伝播速度の変化の温度依存性

超音波計測は、供試体を恒温槽に入れて行うが、セメントの水和熱のため供試体温度は完全に一定とはならない。また、モルタルやコンクリートの配合が変化すると、単位セメント量や骨材量の違いによって、供試体の温度履歴も変化してしまう。したがって、温度履歴がコンクリートの超音波伝播速度の変化に及ぼす影響を的確に評価し、超音波伝播速度に対するセメントペースト、細骨材、粗骨材の寄与を分離して定量化するためには、セメントペーストの超音波伝播速度の変化（≒強度発現）と温度の関係を知る必要がある。

研究代表者らはこれまでの研究で、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート

の超音波速度の変化と温度の関係が、アーレニウスの反応速度則に従うことを明らかにした。本研究では、これらを応用し、セメントペーストの超音波速度の変化の温度依存性のモデル化を行った。

3-3 超音波伝播速度に対する骨材の寄与の定量化

コンクリートの超音波速度は、ペーストの超音波速度 V_{PA} 、細骨材の超音波速度 V_S 、粗骨材の超音波速度 V_G が合成された見掛けの速度である。本研究では、コンクリートの超音波速度 V_P を骨材容積率でモデル化できると仮定し、超音波速度に対する骨材の寄与の分離推定を試みる。ここでは、温度履歴の影響を正確に考慮するために、3-2 で求めたモデルを基にした温度等価材齢を用いる。

異なる骨材体積濃度のデータから得られるモデル式を組み合わせた連立方程式を解くと、ペースト、細骨材、粗骨材の超音波速度を分離推定することができる。理論的には骨材の超音波速度は温度等価材齢にかかわらず一定値となるが、実際には一定とはならないことが予想される。この場合にはペースト、骨材間のインターフェース効果が考えられるため、この部分についても適切なモデル化を試みる。

3-4 超音波計測の標準化と応用性の検討

ここまでで得られた成果を基に、骨材の影響を適切に考慮できる若材齢コンクリートの超音波計測・評価手法を確立し、標準化の検討を行う。また、超音波速度とコンクリートの弾性係数の関係のデータを蓄積し、若材齢コンクリートの体積変化を扱う研究テーマ等への応用を提案する。

4. 研究成果

4-1 単位細骨材量が若材齢時のモルタルの超音波速度に及ぼす影響

骨材が若材齢コンクリートの超音波速度に及ぼす影響を評価するための基礎資料を得ることを目的とし、その第一段階として、単位細骨材量が若材齢時のモルタルの超音波速度に及ぼす影響を実験的に検討し、時間とともに温度の影響をも考慮できる超音波速度計算モデルの提案を試みた。

若材齢時のセメントペーストおよびモルタルの超音波速度の変化を測定し、超音波速度に対する細骨材量の寄与について検討を行った。その結果、以下のような知見を得た。

①セメントペーストの超音波速度発現特性の温度依存性は、アーレニウスの反応速度則でモデル化できる。この結果を基に、修正した有効材齢を示した。

②モルタルの超音波速度は、セメントペーストの超音波速度 v_p 、細骨材の超音波速度 v_s および細骨材容積率 Sc の関数としてモデル化できる。

③異なった細骨材容積率を与えたモルタルの超音波速度の計測結果を組み合わせることにより、セメントペーストの超音波速度 v_p 、細骨材の超音波速度 v_s を分離して推定することができた。

④モルタル超音波速度 v_m の計算モデルは、全体としては実用的に十分な精度を有するものの、有効材齢 0.3 日未満の精度については検討が必要である。

4-2 強度発現途上にあるコンクリートの超音波速度における粗骨材量の影響の定量化

若材齢コンクリートの超音波速度は、配合設計条件のうち、骨材量の影響を強く受ける。超音波速度による若材齢コンクリートの弾性係数推定手法を汎用的なものにするためには、骨材量が超音波速度に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。これに対し研究代表者らは、若材齢モルタルを対象に、超音波速度計測結果から、セメントペーストの超音波速度、細骨材の超音波速度を分離推定し、超音波速度に対するセメントマトリックス部の強度発現、細骨材量の影響を時間と温度の関数として定量化することを検討してきた。

ここでは粗骨材を含むコンクリートを対象に、粗骨材容積率が若材齢コンクリートの超音波速度に及ぼす影響を実験的に検討し、時間とともに温度の影響をも考慮できる超音波速度計算モデルの提案を試みた。

強度発現途上のモルタルおよびコンクリートの超音波速度の変化を連続的に測定し、モルタルの超音波速度発現特性の温度依存性の定量化、およびコンクリートの超音波速度に対する粗骨材量の寄与のモデル化を行った。その結果、以下のような知見を得た。

①モルタルの超音波速度発現特性の温度依存性は、アーレニウスの反応速度則でモデル化できる。この結果を基に、修正した有効材齢を示した。修正有効材齢を用いることにより、温度の影響を適切に考慮することができる。

②コンクリートの超音波速度は、モルタルの超音波速度 v_m 、粗骨材の超音波速度 v_g および粗骨材容積率 G_c の関数としてモデル化できる。

③異なった粗骨材容積率を与えたコンクリートの超音波速度の計測結果を組み合わせることにより、モルタルの超音波速度 v_m 、粗骨材の超音波速度 v_g を分離して推定することができた。

④コンクリート超音波速度 v_c の計算モデルは、モルタルの超音波速度 v_m を補正することにより、有効材齢 0.5 日以降では実用的に十分な精度を示すが、有効材齢 0.5 日未満の領域における精度確保が今後の課題である。

4-3 粗骨材粒子のサイズが若材齢コンクリートの超音波速度に及ぼす影響

これまでに若材齢コンクリート、および疑似若材齢コンクリートを用い、骨材量や細骨材率が若材齢コンクリートの超音波速度、弾性係数に及ぼす影響を検討してきた。その結果若材齢コンクリートの超音波速度は、骨材条件の影響を強く受けることを把握したが、さらに、粗骨材粒子のサイズが若材齢コンクリートの超音波速度に影響するのではないかと考えた。

ここでは、粗骨材粒子のサイズが若材齢コンクリートの超音波速度、動弾性係数に及ぼす影響を評価することを目的とし、石灰石微粉末の置換により意図的にセメントペーストの強度を低下させた疑似若材齢コンクリートを用いた実験を行った。さらに超音波速度については、自動計測システムによる実験を行った。

疑似若材齢コンクリート、若材齢コンクリートを用いた計測を行い、粗骨材粒子サイズが超音波速度に与える影響について検討を行った。その結果、以下のような知見を得た。

①疑似若材齢コンクリートの超音波速度は、LSP 置換率が高く、モルタル部の剛性が低いほど、粗骨材粒子サイズコンクリートの超音波速度に与える影響が著しい。しかし、動弾性係数は粗骨材粒子サイズによる影響は見られなかった。

②自動計測による若材齢コンクリートの超音波速度は、粗骨材粒子サイズが大きいほど速くなり、粗骨材粒子サイズがコンクリートの超音波速度に及ぼす影響を粗粒率で定量化できる可能性があることが判った。

③今後は、更に水準を増やし粗骨材粒子サイズの超音波速度に与える影響について検討する必要がある。

4-4 若材齢コンクリートの超音波速度計測を応用したモルタル凝結試験法の検討

現在、コンクリートの凝結特性を調べるためには、プロクター貫入試験が一般的に行われている。しかし、プロクター貫入試験は、手でモルタルに対する貫入針の貫入抵抗を測定するものであるため、試験に手間と時間を要し、安定した測定値を得るのも難しい。

一方我々は、若材齢モルタルを用いて、単位細骨材量が若材齢モルタルの超音波速度に及ぼす影響を検討してきた。これまでの研究で、若材齢モルタルの超音波速度は、細骨材量の影響を強く受けることを把握している。この研究を応用し貫入試験と超音波試験との関係を調べることが可能であると考えた。

そこで、本研究では若材齢モルタルの凝結特性を超音波速度の変化で捉えることを提案し、若材齢モルタルの超音波速度と貫入抵抗の関係を調べることを目的とする実験を行った。さらに、貫入抵抗の始発点と終結点の超音波速度を求める計算モデルの提案を

試みた。

細骨材容積率の異なるモルタルの貫入抵抗と超音波速度の測定を行い、それらの関係について検討し、以下のような知見を得た。

①モルタルの超音波速度の変化を計測することによって、凝結の始発時刻、終結時刻を求めることができる。

②超音波速度は細骨材容積率の影響を受けるため、凝結始発時、終結時の超音波速度を細骨材容積率 Sc の関数で表し、補正する方法を提案した。

③従来のプロクター貫入試験はブリージングの影響を受けるため、正しい凝結特性を表さない場合がある。これに対し超音波計測による凝結試験では、より正確なモルタルの凝結性状を得ることができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

①澤村秀治, 丸山久一, 永島裕二: 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, 第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, CD-ROM, 2011.10

②澤村秀治, 高坂将太: 若材齢コンクリートの超音波速度計測を応用したモルタル凝結試験法の検討, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, pp5-595~5-596, 2011.9

③村上紘稀, 澤村秀治, 永島裕二: 粗骨材粒子のサイズが若材齢コンクリートの超音波速度に及ぼす影響, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, pp5-593~5-594, 2011.9

④安澤朋也, 村上紘稀, 澤村秀治: 粗骨材容積率を考慮した若材齢コンクリートの超音波速度のモデル化, 平成22年度土木学会北海道支部論文報告集, 第67号, E-11 (CD-ROM), 2011.2

⑤安澤朋也, 久守貴史, 澤村秀治: コンクリートの超音波速度に対するセメントペースト及び骨材の影響の定量化, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集 pp. V419-V420 (CD-ROM), 2010.9

⑥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度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 (CD-ROM), 2010.7

⑦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, E-8 (CD-ROM), 2010.2

⑧安澤朋也, 大西逸樹, 澤村秀治: 単位粗骨

材量が若材齢時のコンクリートの超音波速度に及ぼす影響, 平成21年度土木学会北海道支部論文報告集, 第66号, E-7 (CD-ROM), 2010.2

⑨大西逸樹, 澤村秀治, 永島裕二: 疑似若材齢モルタルにおける超音波伝播速度に対する細骨材の影響, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要, pp. 5-889~5-890 (CD-ROM), 2009.9

[学会発表] (計3件)

①澤村秀治: 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, 第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2011.10.21, 函館国際ホテル

②澤村秀治: 若材齢コンクリートの超音波速度計測を応用したモルタル凝結試験法の検討, 土木学会第66回年次学術講演会講演会, 2011.9.9, 愛媛大学

③澤村秀治: 強度発現途上にあるコンクリートの超音波速度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大会 2101 (さいたま), 物性一般II, 2010.7

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤村 秀治 (SAWAMURA SYUJI)

函館工業高等専門学校・環境都市工学科・教授

研究者番号: 70321362

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

丸山 久一 (MARUYAMA Kyuichi)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号: 30126479