

論文 モルタルの凝結硬化過程の評価への電磁パルス法の適用

角田 蛍^{*1}・内田 慎哉^{*2}・鎌田 敏郎^{*3}

要旨: 本研究では、モルタルを対象として、その内部に鉄筋を設置した状態で電磁パルス法により非接触で鉄筋に衝撃を与え、これによって発生する弾性波を鉄筋に貼り付けたセンサで受信し、その波形特性の経時変化をモニタリングすることで、凝結硬化過程の評価を試みた。また、この波形特性とプロクター貫入抵抗試験により推定した凝結時間との対応関係についても併せて検討した。その結果、本研究の範囲内では、電磁パルス法により測定した波形エネルギーおよび周波数スペクトルは、鉄筋とモルタルとの界面の状態に応じて変化するパラメータであり、モルタルの始発時間を推定できる可能性があることを明らかにした。

キーワード: 凝結硬化過程, 非破壊試験, 電磁パルス法, 伝搬速度, 波形エネルギー, 周波数スペクトル

1. はじめに

著者らは、超音波法によりセメント系材料の凝結硬化過程における物理的および化学的な物性変化を評価する方法についての検討を行ってきた¹⁾。その結果、超音波伝搬特性である最大振幅値および周波数スペクトルは、凝結硬化にともなう物理的な物性変化である見掛け粘度の増加状況を良く反映した指標であることを明らかにした。これに対して、伝搬速度が急激に増加する時間に着目すれば、エトリンガイト結晶の生成状況と良い対応関係があることも見出した。しかしながら、依然として凝結の始発や終結時間を適確に推定することは困難であった。

一方、RILEMにおいても、原理の異なる各種非破壊試験によりセメント系材料の凝結硬化過程を評価する研究は行われており、Technical Committeeによりその成果がまとめられている²⁾。しかしながら、凝結の始発や終結時間を適確に推定する方法については課題を残したままであった。

そこで、上記課題を解決するための基礎研究として、本研究では、モルタルを対象として、その内部に鉄筋を設置した状態で電磁パルス法により非接触で鉄筋に衝撃を与え、これによって発生する弾性波を鉄筋に貼り付けたセンサで受信し、その波形特性の経時変化をモニタリングすることで、凝結硬化過程の評価を試みた。また、

プロクター貫入抵抗試験により推定した凝結時間と電磁パルス法で得られた波形特性との対応関係についても併せて検討した。

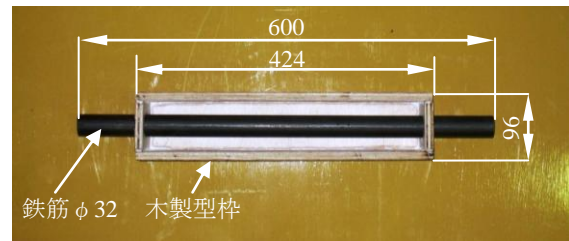
2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

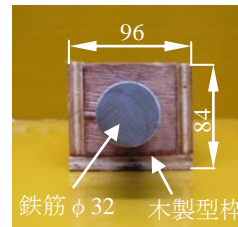
実験に用いたモルタルの配合を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、表乾密度が 2.57g/cm³ の淀川水系の川砂を使用した。モルタルの材質の違いが評価パラメータである波形特性に与える影響を把握するため、水セメント比に3つのバリエーション (30, 45 および 60%) を設けた。

2.2 計測概要

写真-1 に型枠の概要を示す。型枠は木製合板で作製し、その寸法は、幅 96mm、高さ 84mm、長さ 424mm である。型枠両側面の中央部にそれぞれ穴を開け、型枠中



(a) 側面図



(b) 断面図

[単位: mm]

写真-1 型枠概要

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	単体量 (kg/m ³)		
	W	C	S
30	170	567	569
45	170	378	723
60	170	283	801

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 特任助教 博士(工学) (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

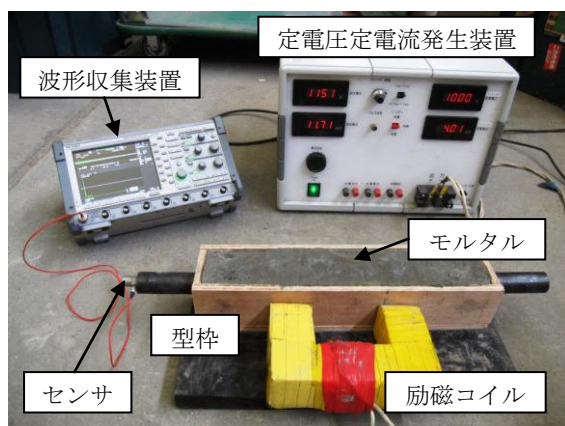


写真-2 計測概要

中央にφ32の長さ600mmの鉄筋を1本挿入した。なお、鉄筋のかぶり厚は、すべての面に対して20mmとした。

電磁パルス法による計測概要を写真-2に示す。写真に示す励磁コイルは、厚さ約0.25mmのコの字型の電磁鋼板を230枚積層し、直径2.0mmのマグネットワイヤをコイルに10回巻き付けたものである。この励磁コイルに定電圧定電流発生装置を用いて、印可電圧1000V、パルス幅200μsのパルス状の電流を流し、コイル周辺に瞬間的な磁界を発生させ、鉄筋を振動させた。コイルは、磁界中の磁束線と鉄筋の長手方向とが平行になるように、鉄筋直上、かつ鉄筋長手方向中央の型枠表面から20mm離れた位置に設置した。鉄筋の片端部には、弾性波を受信するための30kHz共振型AEセンサを貼り付けている。センサで受信した信号は、サンプリング周波数1MHzでデジタル化した後、サンプリング数10,000点で波形収集装置に電圧の時刻歴応答波形として記録した。電磁パルス法による計測は、セメントに水を加えた時点から開始し（この時点で型枠内にモルタルは打設されていない）、24時間が経過するまで30分間隔で行った。なお、モルタルは、練り混ぜ終了後、ただちに型枠に投入した。

2.3 電磁パルス法における波形特性の算出方法

コイルに電流を流した時刻と、鉄筋端部に貼り付けたセンサが信号を検知した時刻との時間差から伝搬時間を算出した。鉄筋の長手方向の中央位置からセンサまでの距離を算出した伝搬時間で割ることにより伝搬速度を求めた。

また、波形エネルギー： E は、受信した電圧波形の振幅値をそれぞれ2乗した後、それらを総和することにより算出した。波形エネルギーの算出式を以下に示す。

$$E = \sum_{i=1}^n A_i^2 \quad (1)$$

ここで、 A_i ：電圧波形における*i*番目の振幅値、 n ：サンプリングデータ数である。

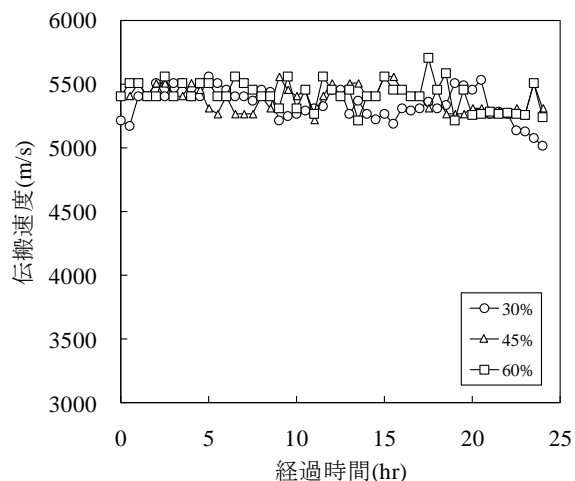


図-1 伝搬速度と経過時間の関係

さらに、周波数スペクトルは、得られた受信波形を高速フーリエ変換 (FFT) して求めた。

2.4 プロクター貫入抵抗試験

電磁パルス法による計測と併行して、プロクター貫入抵抗試験を実施した。この試験で使用した型枠は、幅96mm、高さ84mm、長さ424mmの角柱の木製合板で作製したものである。

3. 実験結果および考察

3.1 弾性波伝搬速度による評価

図-1に弾性波の伝搬速度と経過時間との関係を示す。この図に示す経過時間0時間とは、セメントに加水をした時刻を示しており、この時点においては、空気のみが存在する。得られた弾性波伝搬速度は、計測開始から終了するまでの間、いずれの水セメント比においても、約5400m/sとほぼ一定であった。しかもこの速度は、鉄筋の伝搬速度：5960m/sと概ね近い値となった。著者らの既往の研究によれば、電磁パルス法により振動する鉄筋部分は、コイル直下に限定される³⁾。したがって、コイル直下の鉄筋部分が振動することにより弾性波が発生する。この弾性波は、鉄筋部分およびモルタル部分を伝搬すると考えられる。しかしながら、伝搬速度は、経過時間の増加に関わらず、また水セメント比による差異もないことから、波の波頭部は鉄筋部分のみ伝搬していると考えられる。ここで、水セメント比30%におけるモルタルを型枠に投入した直後での受信波形の一例を図-2に示す。図中の A_0 が波の波頭部の最大振幅値となる。この最大振幅値が時間の経過とともに変動しなければ、波の波頭部は鉄筋のみを伝搬しているものと考えられる。図-3から図-5に波の波頭部の最大振幅値と経過時間との関係の水セメント比ごとにそれぞれ示す。図に示す波頭部の最大振幅値比とは、経過時間0時間（セメント

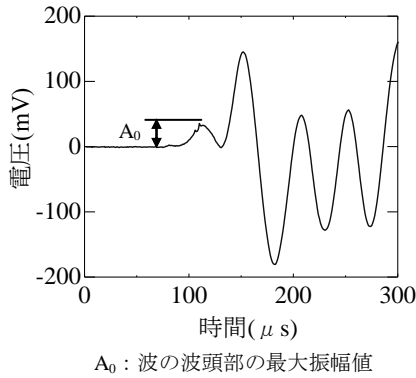


図-2 時刻歴応答波形および波の波頭部の最大振幅値

に加水した時点かつ型枠内にモルタルが投入されていない状態)における最大振幅値を1としたときの、以降30分おきに測定されたそれぞれの最大振幅値の比率として定義した。図より、モルタル投入前後から計測が終了するまでの間、最大振幅値は概ね一定であった。これより、電磁パルスにより発生した弾性波の波頭部は鉄筋部分を主に伝搬していることが明らかとなった。

3.2 波形エネルギーによる評価

図-6 から図-8 に波形エネルギー比と経過時間との関係の水セメント比ごとにそれぞれ示す。ここでいう波形エネルギー比とは、経過時間0時間における波形エネルギーを1としたときの、以降30分おきに測定されたそれぞれの波形エネルギーとの比率として定義した。図によれば、水セメント比がいずれの場合においても、型枠にモルタルを投入した直後に、急激に値が低下していることが確認できる。これは、モルタルにより鉄筋周辺が拘束されたためである⁴⁾。また、モルタル投入直後の波形エネルギーの低下は、水セメント比が小さいほど顕著に表れた。これは、水セメント比の違いによる粘性の差異により鉄筋の拘束の程度が変化したものと考察できる。

その後、時間の経過にともなって、波形エネルギーがさらに小さくなった後、エネルギーが徐々に増加し、極大値を示した。この傾向は、いずれの水セメント比においても同様であった。ただし、水セメント比が大きくなると、極大値となる時刻は遅くなることがわかる。著者らの既往の研究成果によれば、波形エネルギーの増加はモルタルと鉄筋界面の付着力が低下したことを意味する⁴⁾。したがって、本実験において、波形エネルギーが大きくなった要因としては、例えば、鉄筋下側に溜まったブリージング水が考えられ、これにより鉄筋界面の付着力が低下した可能性がある。しかしながら、現時点では、詳細な理由は不明であるため、今後検討を行う予定である。

図-6 から図-8 に、プロクター貫入抵抗試験の結果を水セメント比ごとに示す。ここでは、前述の波形エネルギーと対応させて示している。JIS A 6204 では、凝結の

目安として、貫入抵抗値が 3.5N/mm^2 および 28.0N/mm^2 に達したときをそれぞれ始発および終結の時刻としている。これを参考にすれば、波形エネルギーが極大値を示

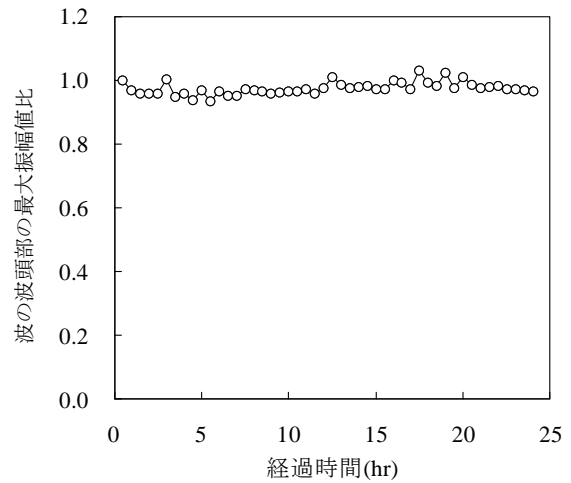


図-3 波の波頭部の最大振幅値比と経過時間との関係 (W/C=30%)

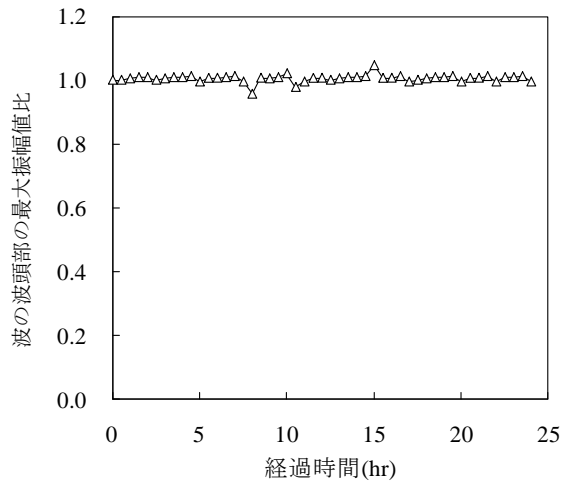


図-4 波の波頭部の最大振幅値比と経過時間との関係 (W/C=45%)

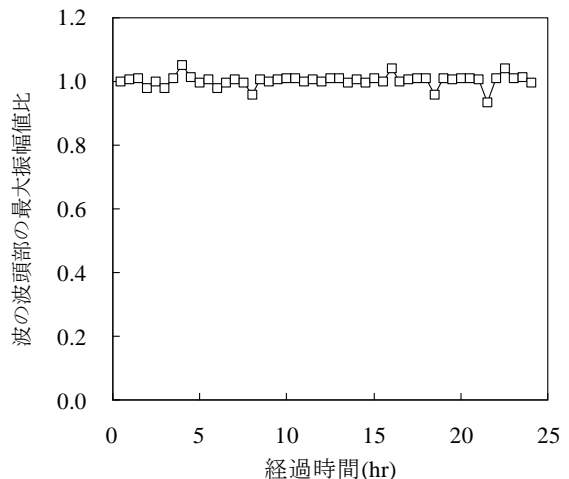


図-5 波の波頭部の最大振幅値比と経過時間との関係 (W/C=60%)

す時刻とプロクター貫入抵抗試験で推定した始発時刻は、いずれの水セメント比においても、概ね一致していることがわかる。一致する理由については今後詳細に検討すべきではあるが、このような結果は波形エネルギーの極大値から始発時刻が推定できることを示唆するものである。

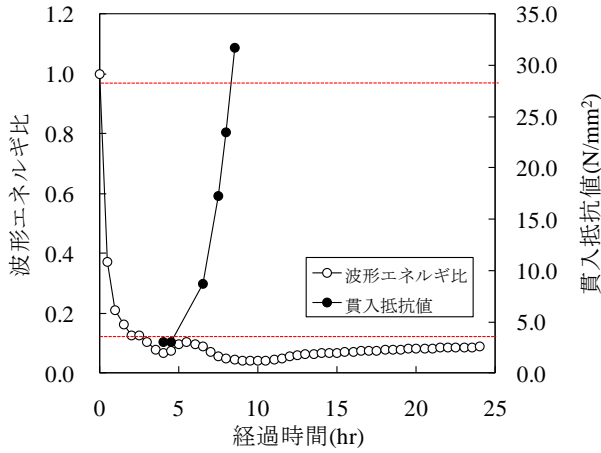


図-6 波形エネルギー比と貫入抵抗値との関係 (W/C=30%)

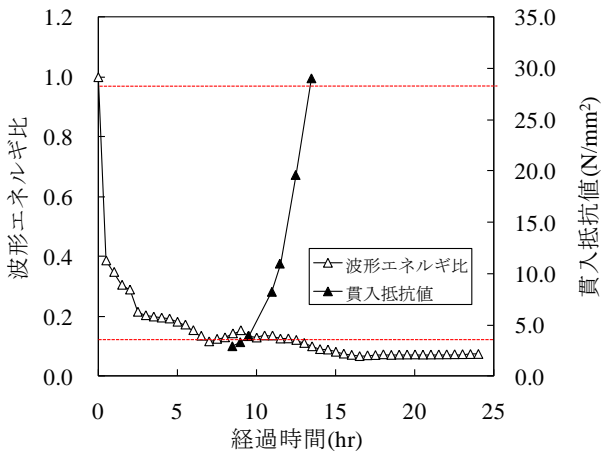


図-7 波形エネルギー比と貫入抵抗値との関係 (W/C=45%)

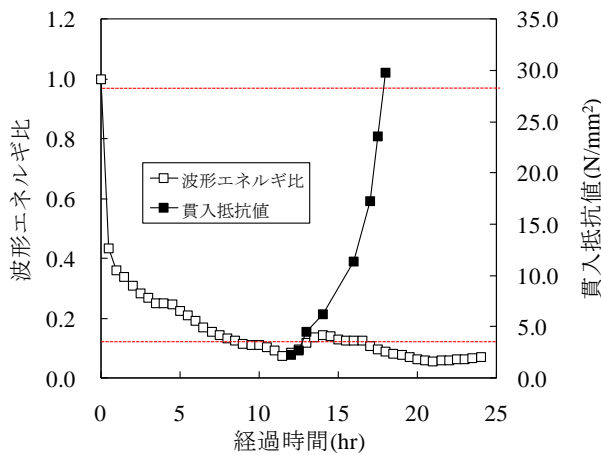
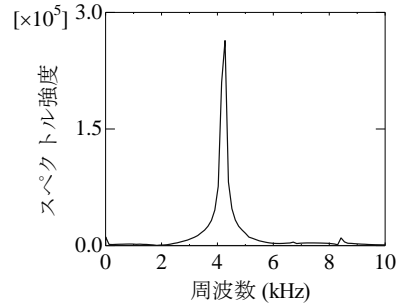
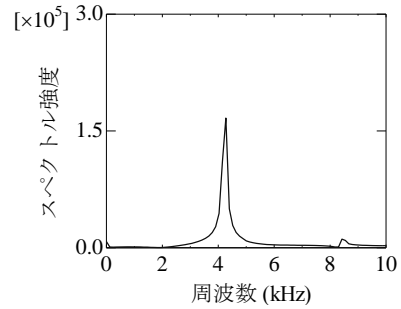


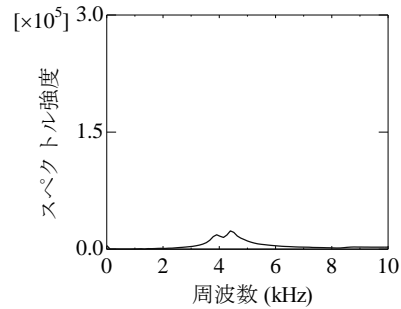
図-8 波形エネルギー比と貫入抵抗値との関係 (W/C=60%)



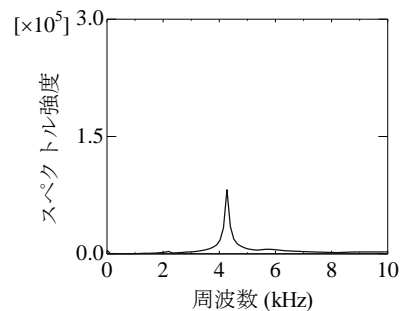
(a) モルタル投入前



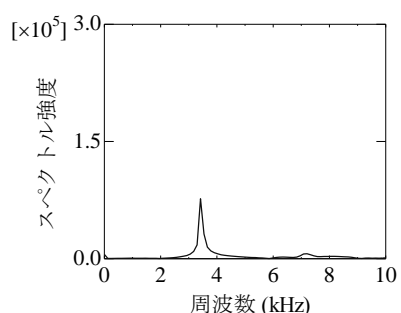
(b) モルタル投入直後



(c) 計測開始から4時間後

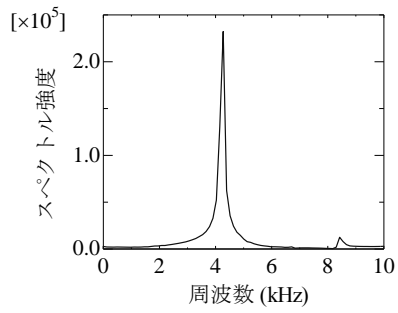


(d) 計測開始から5.5時間後

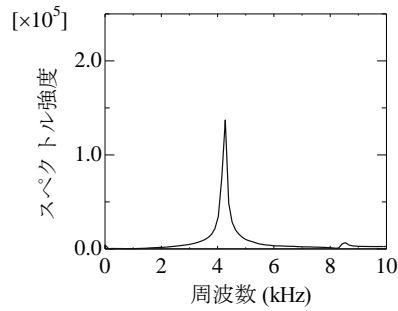


(e) 計測開始から24時間後

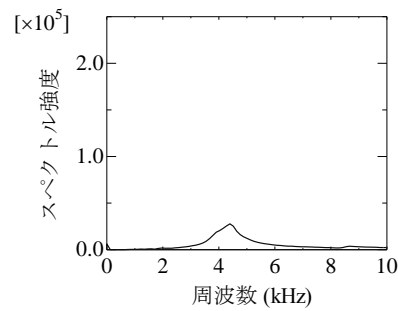
図-9 周波数スペクトルの経時変化 (W/C=30%)



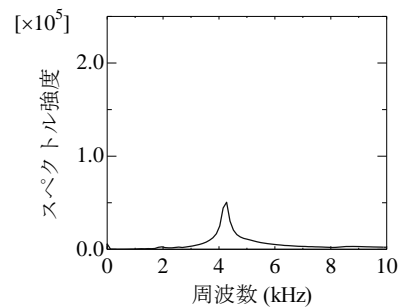
(a) モルタル投入前



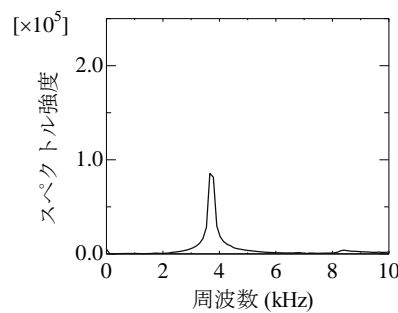
(b) モルタル投入直後



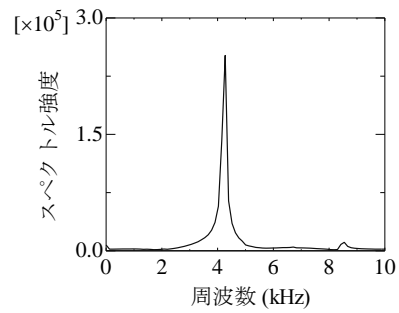
(c) 計測開始から 7 時間後



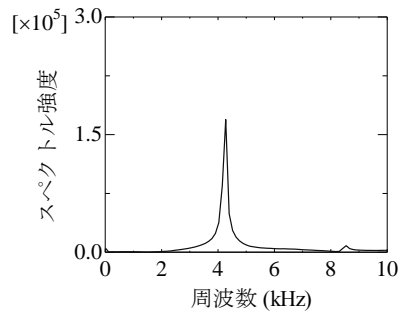
(d) 計測開始から 9 時間後



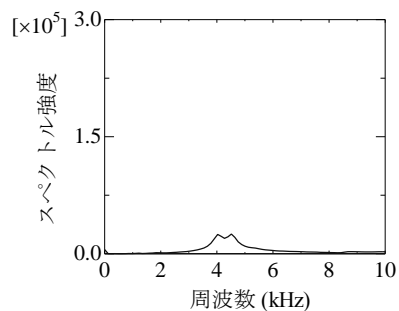
(e) 計測開始から 24 時間後



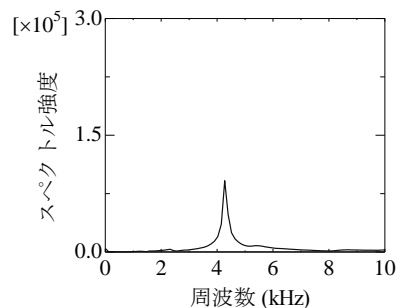
(a) モルタル投入前



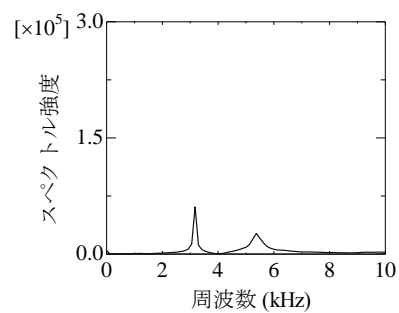
(b) モルタル投入直後



(c) 計測開始から 11.5 時間後



(d) 計測開始から 14 時間後



(e) 計測開始から 24 時間後

図-10 周波数スペクトルの経時変化 (W/C=45%)

図-11 周波数スペクトルの経時変化 (W/C=60%)

3.3 周波数スペクトルによる評価

図-9に、水セメント比30%における周波数スペクトルの経時変化を示す。これによると、モルタル投入前(経過時間0時間)では、約4.3kHzに単独のピークが出現した。ここで、弾性波の波頭部が鉄筋のみを伝搬していることを踏まえて、弾性波が鉄筋中を多重反射することにより出現する理論上の縦波共振周波数を次式により算出することとした。

$$f = C_p / 2L \quad (2)$$

ここで、 f ：弾性波が鉄筋内部を多重反射することにより出現する理論上の縦波共振周波数(Hz)、 C_p ：鉄筋を伝搬する縦波の速度(m/s)、 L ：鉄筋の長さ[=0.6m]である。3.1で算出した弾性波伝搬速度の平均値(5351m/s)と式(2)から、理論上の縦波共振周波数は約4.5kHzとなる。したがって、測定により得られたピーク周波数と縦波共振周波数とは、概ね一致していることが明らかとなった。モルタルの投入後は、モルタルと鉄筋との付着状態が向上することにより弾性波が鉄筋を伝搬する過程で分散し、その結果、センサで受信した波は著しく小さくなる。これにより、弾性波が鉄筋を往復する回数が時間の増加とともに少なくなる。これが原因で、スペクトル強度が小さくなったものと考察できる。経過時間が4時間になると、周波数スペクトルの強度がさらに小さくなった。その後、5.5時間となるまでの間に、スペクトル強度が徐々に大きくなり、5.5から24時間までの強度はほぼ一定であった。なお、周波数スペクトルにおけるピーク周波数が出現した周波数位置は、いずれの経過時間の場合においても、概ね同じ周波数の値であった。ここで、図-6に示す貫入抵抗試験の結果と比較すると、周波数スペクトルの強度がほぼ一定となり始める時刻と、プロクター貫入抵抗試験によって推定した始発時刻は概ね一致していることがわかる。この結果は、スペクトル強度に着目することにより、モルタルの始発時間が把握できる可能性を示唆するものである。なお、このような傾向は、水セメント比が45%および60%の場合も同じであった(図-10および図-11参照)。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 本研究の範囲内では、電磁パルス法により測定した弾性波伝搬速度は、モルタルの凝結硬化に伴う物性変化と対応して変化する伝搬特性ではないことが明らかとなった。

- (2) 波形エネルギーは、鉄筋とモルタルとの付着状態の変化に起因して変化する伝搬特性と考えられる。しかも波形エネルギーが極大値となる時刻とプロクター貫入抵抗試験で推定した始発時間は、概ね一致した。
- (3) 周波数スペクトルにおけるピーク周波数は、波形エネルギーと同様に、鉄筋とモルタルとの付着状態に対応して変動する伝搬特性であることがわかった。しかも、ピーク周波数のスペクトル強度が一定となり始める時刻と始発時間とは、概ね良い対応となった。
- (4) 以上のことから、電磁パルス法により測定した波形エネルギーの極大値および周波数スペクトルに着目すれば、モルタルの始発時間を推定できる可能性があることが示された。

今後は本手法で始発時刻が推定可能なセメントの種類、混和剤や混和材、あるいはその他の条件などについて詳細に検討を行う予定である。さらに、波形エネルギーが極大値となる以前の傾きに着目することで、セメントに加水した直後で計測した値から始発時刻を予測する手法へと高度化する予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究 22656100)の援助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Kamada, T., Uchida, S. and Rokugo, K.: Nondestructive Evaluation of Setting and Hardening of Cement Paste Based on Ultrasonic Propagation Characteristics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.3, pp.343-353, 2005.10
- 2) RILEM Report 31: Advanced Testing of Cement based Materials during Setting and Hardening, Report of RILEM Technical Committee 185-ATC, 2005.9
- 3) 角田 蛸, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宗像肛太郎: 電磁パルス法に基づくPCグラウト充填評価手法の妥当性検証への動磁場解析および衝撃応答解析の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1691-1696, 2010
- 4) 前 裕史, 鎌田敏郎, 峯澤博行, 内田慎哉: 非破壊試験による鉄筋-コンクリート界面の評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.811-816, 2008