

論文 弾性波法を用いたコンクリート充填性の推定に関する実験

荒金 直樹*1・坂井 孝*2・金子 稔*3・安田 正雪*4

要旨: 従来、コンクリートにおける弾性波を利用した非破壊試験では、FFTアナライザーや加速度センサーなどの高価な解析装置を必要とし、耐久性診断などへの適用は容易ではなかった。本報では、弾性波を電氣的にアナログ処理することで安価で簡便に利用できる非破壊試験システムを提案し、基礎的な実験によりその有効性を検討した。実験では、コンクリート打設時に型枠の上から、弾性波を利用した本システムを用いて、締固めの違いによるコンクリートの充填性を推定するとともに、その後の硬化過程について調査した。

キーワード: 弾性波, 充填性, 振動周波数特性, アナログ乗算器, スイープ波

1. はじめに

近年、高流動コンクリートの使用により型枠内部の状況を目視により確認できない箇所、あるいは過密配筋や狭隘箇所へのコンクリートの充填の信頼性は向上したが、構造体の品質保証をするため、充填管理を目的とした充填確認センサーの利用もなされている¹⁾。一方、通常のコンクリートを用いる場合、一般に締固め作業は所定の締固め方法を遵守して実施されるが、過密配筋や狭隘箇所では、締固めが不十分な場合にコンクリートの品質変動などと相俟ってジャンカやコールドジョイントなどの欠陥が発生することも少なくない。構造体の品質保証のためには、充填性を確認しながら打込み・締固めを実施することが重要であるが、現場環境、操作性およびコストなどから充填管理は容易ではなく、コンクリートの充填確認の容易な診断方法が期待されている²⁾。

従来の充填状況を感知する方法には、表-1に示す方法などがある³⁾。

本報は、安価で簡便に利用できる非破壊試験システムを提案し、弾性波法を用いた本シ

ステムによって、型枠の外側から、コンクリートの打込み・締固めにおける充填状況を推定するとともに、その後の硬化過程の状況を調査した結果について述べたものである。

2. システム概要

2.1 測定原理

本システムは、弾性波（周波数50Hz～5kHzのスweep波）を用いて型枠を加振して、その振動周波数特性（以下、周波数特性と略す）の変化より、型枠内部のコンクリートの充填状況を感知するものである。本システムの概念図を図-1に示す。

表-1 コンクリートの充填状況を感知する方法

センサー等の設置場所	充填状況を感知する方法
型枠の外側	①コンクリートの打込み前後の型枠の温度変化をとらえる赤外線法 ②光透明星枠による目視法 ③打撃音法 ④型枠に設けた小径穴からのペーストの漏れ(空気穴)
型枠の内側	①電氣的方法(通電, 電氣抵抗, 静電容量, 電圧, 電圧印加方式) ②光センサー

*1 東洋建設(株)総合技術研究所美浦研究所材料研究室研究員 工修 (正会員)

*2 曙ブレーキ工業(株)戦略企画部門ICAT主査

*3 曙ブレーキ工業(株)戦略企画部門ICAT係長

*4 東洋建設(株)総合技術研究所美浦研究所材料研究室主任研究員 (正会員)

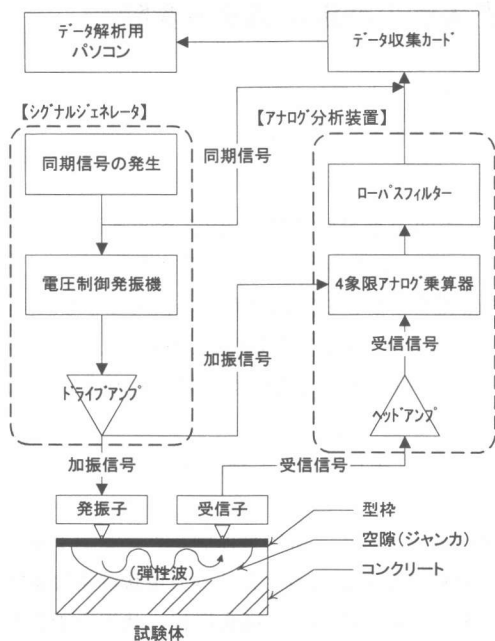


図-1 システム概念図

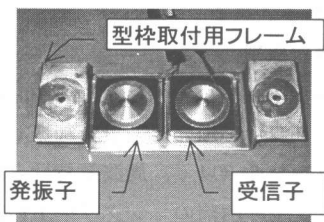


写真-1 センサー部の外観

2.2 センサーの特徴

センサーには、直径27mm、厚さ0.5mmの圧電セラミックでできた圧電素子（共振周波数4.6±0.5kHz）を用いた。外観を写真-1に示す。

2.3 測定原理および記録方法

測定原理を以下に述べる。弾性波の加振信号を $V_r = A \sin(\omega t + \alpha)$ 、受信センサーから得られた受信信号を $V_i = B \sin(\omega t + \beta)$ とし、乗算すると式(1)に示す出力が得られる。但し、AおよびBは振幅、 ω は周波数、 α および β は位相のズレである。アナログ分析装置内で、この波形 ($V_r \times V_i$) は、ローパスフィルターを通過すると、 $\cos(2\omega t + \alpha + \beta)$ の成分が除去され、 $\cos(\beta - \alpha)$ の成分のみが取り出される。この結果を電圧に変換

してデータとして取り込む。

本システムでは、周波数 ω を連続的に50Hz～5kHzに変化するスイープ波を用いることで周波数特性を検出し、以下の実験における状況下でのコンクリートの充填性および硬化過程における評価を行った。

$$\begin{aligned} & A \sin(\omega t + \alpha) \times B \sin(\omega t + \beta) \\ & = 1/2 \cdot AB \{ \cos(\beta - \alpha) - \cos(2\omega t + \alpha + \beta) \} \end{aligned} \quad (1)$$

3. 実験概要

実験はシリーズI～シリーズIIIからなる。シリーズIではコンクリートの締固め時間の影響、シリーズIIではコンクリートの締固め位置からの距離の影響、シリーズIIIでは薄肉コンクリート板における適用性について調査した。

3.1 実験方法

(1) シリーズI

表面塗装合板（厚さ12mm）を用いて、建築物の壁を想定した18cm（厚さ）×45cm（幅）×25cm（高さ）の型枠を4体製作して、コンクリートをハンドスコップで均一に打ち込み、①締固めなし（試験体I-1）、②棒型振動機で5秒加振（試験体I-2）、③棒型振動機で10秒加振（試験体I-3）、④棒型振動機で20秒加振（試験体I-4）の4水準の試験体について、コンクリート打込み前、締固め前後およびコンクリートの凝結の終結までの周波数特性を測定した。

試験体およびセンサーによる測定位置を図-2に示す。測定は、型枠にセンサーを手で押し付けを行った。

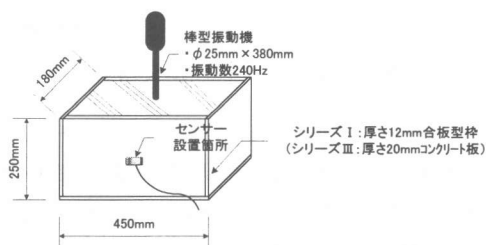


図-2 シリーズIの試験体および測定箇所

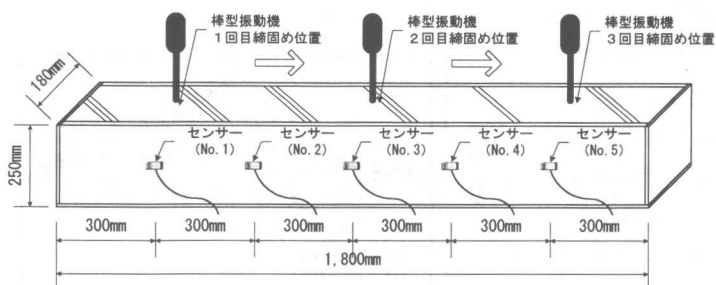


図-3 シリーズⅡの試験体および測定箇所

(2)シリーズⅡ

締固め位置からの距離と充填性の関係を調査するため、表面塗装合板(12mm厚)を用いて、18cm(厚さ)×180cm(幅)×25cm(高さ)の型枠を製作し、コンクリートを打込み、①棒型振動機で、試験体の左から30cmの1箇所を20秒加振(試験体Ⅱ-1)、②棒型振動機で3箇所の加振位置を順次移動しながら20秒づつ加振(試験体Ⅱ-2)する2水準について実験を行った。

試験体の周波数特性の測定は、型枠に5個のセンサーを型枠取付用フレームで固定し、締固め前後および締固め中に行った。試験体およびセンサーによる測定位置を図-3に示す。

なお、振動締固めの前と後で充填性に明確な差が生じるよう、型枠内にD10を横筋100mmピッチ、縦筋195mmピッチでダブル配筋とした。

(3)シリーズⅢ

型枠に、厚さ20mmのコンクリート板を使用した場合(試験体Ⅲ)における、本システムが適用可能性について実験した。型枠の

形状・寸法は、シリーズⅠと同一とし、型枠内にD10を横筋100mmピッチ、縦筋100mmピッチでダブル配筋とした。

試験体の周波数特性の測定は、コンクリート打設前、打設後、棒型振動機で20秒加振後、および材齢1日において行った。

3.2 コンクリートの使用材料と調合

使用材料と物性を表-2に、コンクリートの調合を表-3に示す。コンクリートの目標スランプは 12 ± 2.5 cm、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

4. 実験結果と考察

4.1 シリーズⅠ

コンクリート打設前の周波数特性を図-4に示す。それぞれの試験体によって周波数特性の特徴は異なるが、測定範囲50Hz~5kHz全域に亘って複数のピークが確認できた。次に、コンクリート打込み直後で締固め前の周波数特性を図-5に、締固め後を図-6に示す。

図-5より、型枠内にコンクリートを打設す

表-2 使用材料と物性

種類	使用材料(記号)	物性
セメント	早強ホルランドセメント(C _H)	密度3.13g/cm ³ , 比表面積4600cm ² /g
	普通ホルランドセメント(C _N)	密度3.16g/cm ³ , 比表面積3270cm ² /g
水	上水道水(W)	
細骨材	鹿島産陸砂(S1)	表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率2.44%, 粗粒率2.42
	笠間産砕砂(S2)	表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率1.64%, 粗粒率3.11
粗骨材	笠間産砕石(G)	表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率0.60%, 粗粒率6.83 実積率59.8%, 最大寸法20mm
混和剤	AE減水剤(Ad)	リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体

表-3 コンクリートの調合

実験の種類	スランプ(cm)	水セメント比(%)	空気量(%)	粗骨材かさ容積(m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)								試験結果	
					W	C _H	C _N	S1	S2	G	Ad	スランプ(cm)	空気量(%)	
シリーズⅠ	12	55	4.5	0.64	165	300	—	560	240	1019	3.000	10.5	3.7	
シリーズⅡ	12	53	4.5	0.65	164	—	310	623	156	1036	3.317	13.5	4.5	
シリーズⅢ	12	53	4.5	0.65	164	—	310	623	156	1036	3.317	11.5	4.5	

ると、いずれも2～3kHzの周波数が卓越するような特性を示し、コンクリートが打設されたことを周波数特性の変化で確認することができた。図-6より、締固め時間による違いは明確ではなかった。ただし、試験体I-2では締固め前に、最大振幅を示す周波数が約2.3kHzであったが、締固め後に2.1kHzになるなどの試験体毎の波形の変化は確認できた。

材齢3日に脱型した試験体I-1と試験体I-3の側面を写真-2に示す。

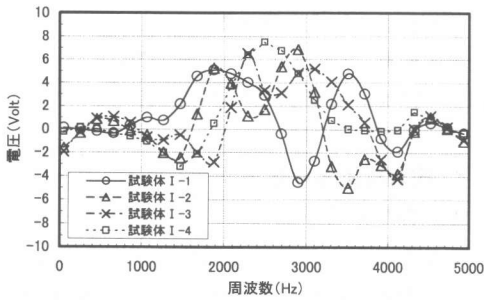


図-4 コンクリート打設前の周波数特性

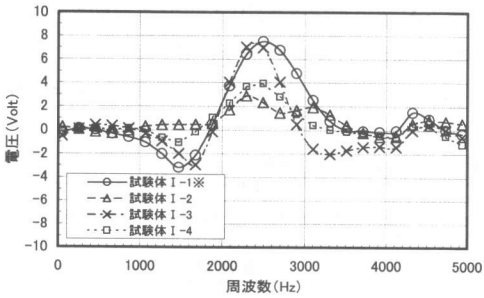


図-5 コンクリート打設直後の周波数特性

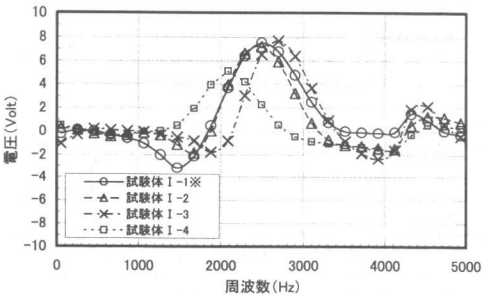


図-6 コンクリート締固め後の周波数特性

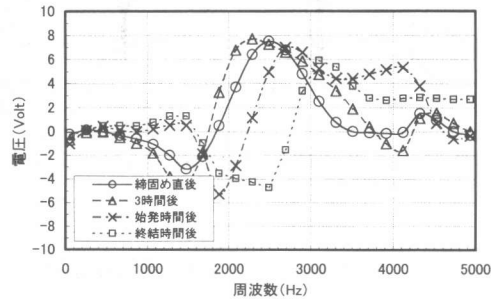


図-7 試験体I-1の経時変化

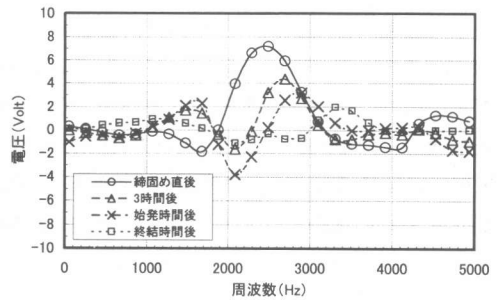


図-8 試験体I-2の経時変化

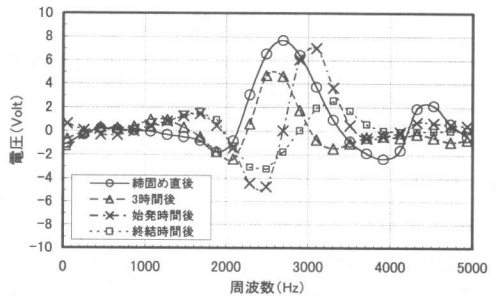


図-9 試験体I-3の経時変化

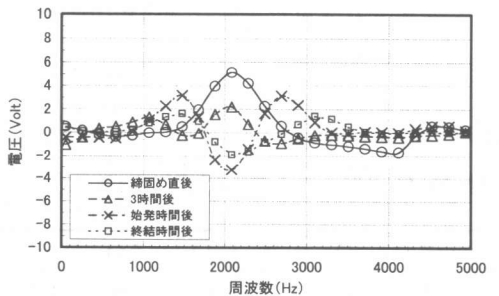


図-10 試験体I-4の経時変化

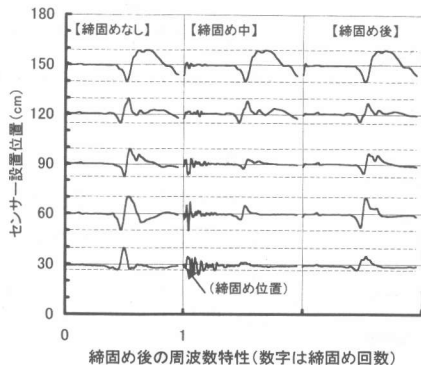


図-11 試験体 II-1の周波数特性

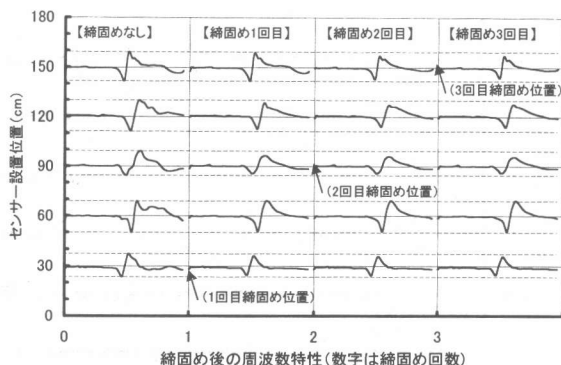


図-12 試験体 II-2の周波数特性

締固めた試験体 I-2, I-3及び I-4は充填されていたが、締固めない試験体 I-1ではジャンカがみられた。コンクリートが打込まれたことは、周波数特性が図-4から図-5のような変化を示すことで判定できるが、ジャンカや締固め時間の差によるコンクリートの充填性については同一試験体の周波数特性の経時変化から、相対的に評価する必要があると考えられる。

このため、シリーズ II, IIIではセンサーを固定して測定し、その経時変化について調査した。

次に、各試験体について締固め後からコンクリートの凝結までの周波数特性の変化を図-7～図-10に示す。凝結の始発までは、試験体によって周波数特性の変化が一様ではないものの、終結後では試験体 I-1を除いて、約2.5kHzの電圧が小さくなっていることがわかる。ジャンカがある試験体 I-1については、周波数特性の経時変化が小さいものの、試験体 I-2, 試験体 I-3および試験体 I-4については、コンクリートの硬化過程を検知できる可能性が示唆された。

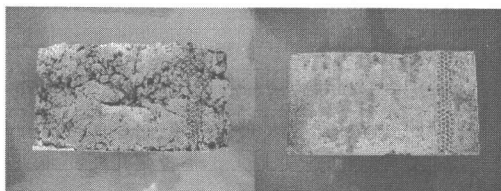


写真-2 試験体の表面
(左:試験体 I-1, 右:試験体 I-3)

4.2 シリーズ II

打設直後と締固め終了時の各測定点での周波数特性について、試験体 II-1を図-11に、試験体 II-2を図-12にそれぞれ示す。また、試験体脱型後の状況を写真-3に示す。

図-11から、試験体 II-1では、センサー設置位置が30cm～120cmで高周波成分の振幅が小さくなっているが、150cmでは変化がみられなかった。写真-3から、センサー設置位置が150cmでは、締固め後もジャンカがあったため、周波数特性に変化がみられなかったと考えられる。

図-12から、試験体 II-2では、締固め1回目に30～90cmの範囲で波形が小さくなり、2回目には120～150cmの範囲でも波形が小さくなった。

次に、試験体 II-2における1回目の締固め中の周波数特性の変化を図-13に示す。試験体 II-2は、締固め時間5秒で、30cm～90cmの範囲で波形が小さくなっているが、締固め時間10秒以降では、ほとんど変化がないことがわかる。

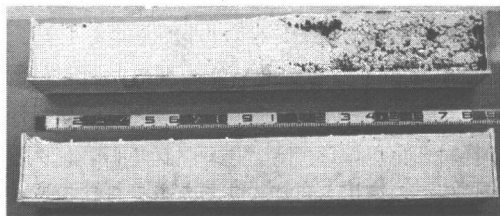


写真-3 試験体の表面
(上:試験体 II-1, 下:試験体 II-2)

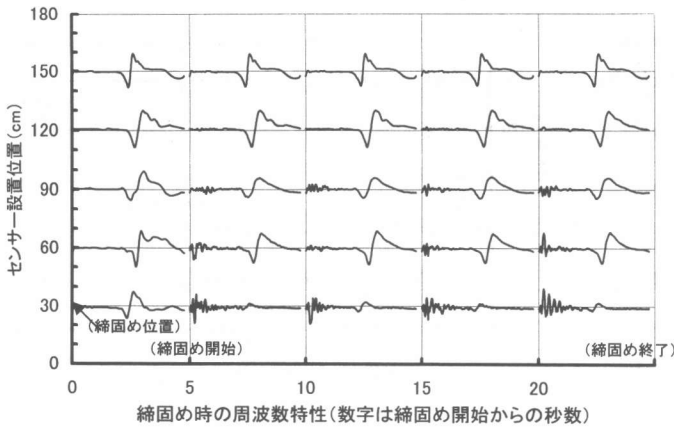


図-13 試験体Ⅱ-2の締固め中の周波数特性

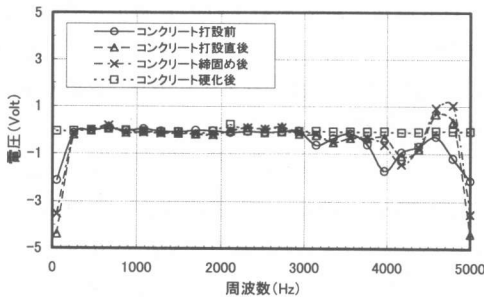


図-14 試験体Ⅲの周波数特性

4.3 シリーズⅢ

型枠にコンクリートを打設する前、打設直後、コンクリート締固め後およびコンクリート硬化後の周波数特性の変化を図-14に示す。

打設前では約3.1kHzと約4kHzにピークがあるが、打設後では約4.6kHzにピークがあり、周波数特性の変化が確認できた。また、打設後から締固め後の周波数特性の変化は小さかった。さらに、コンクリート硬化後の周波数特性は、測定周波数の全域でほぼ0の電圧値を示した。

試験体Ⅲでは周波数特性の振幅は小さいものの、コンクリートの状態変化による周波数特性の経時変化が確認でき、本システムのコンクリート板への適用も可能であると考えられる。

今後、コンクリート板については、合板に比べ単位質量が大きいいため受信信号が小さくなる

ので、加振信号の出力を大きくして判定しやすくする必要があると考えられる。

5. まとめ

本実験において、以下のような本システムの有効性が確認された。

- (1) 型枠内のコンクリートの有無を推定できる。
- (2) 型枠内のコンクリートが硬化したことを推定できる。
- (3) 型枠内のコンクリートの充填性の程度を推定できる。

- (4) 型枠裏面の状況把握が困難な打込み型枠の適用に可能性を見出すことができた。

参考文献

- 1) 坂井吾郎, 万木正弘, 坂田昇, 岩城実: 品質保証を考慮した高流動コンクリートの施工について, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.233~238, 1995
- 2) 金子祐一, 青柳隼夫, 松永勇雄: 型枠用コンクリート自動締固めシステムの開発, 日本建築学会大会梗概集, pp.163~166, 1993.9
- 3) 平田隆祥, 十河茂幸: 電圧印加方式によるコンクリートの充填感知に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.69~74, 1996
- 4) 佐々木晴夫, 山本康弘他: 打音法によるハーフPCa板に打設したコンクリート充填検査に関する研究, 日本建築学会大会梗概集, pp.139~140, 2000.9
- 5) 山田和夫, 山本正岳: 弾性波法を適用したコンクリートの非破壊検査法に関する基礎的研究, 日本建築学会大会梗概集, pp.103~104, 1991.9