

# 論文 型枠面での高周波静電容量測定によるコンクリート充填状態の判定に関する研究

瀬古 繁喜<sup>\*1</sup>・三井 健郎<sup>\*1</sup>・結城 秀恭<sup>\*2</sup>・中川 裕巳<sup>\*2</sup>

**要旨：**型枠外側から高周波静電容量を測定する方法に着目し、コンクリート打設中に型枠内側の充填状態を判定する方法を検討した。高周波静電容量センサーの特性を把握する基礎的な実験の結果、高周波静電容量センサーは、型枠含水率の影響を受けるが、空隙の厚さの違いをある程度評価できることがわかった。さらに、型枠の含水状態を変化させた条件下で、充填状態の異なる試験体を、型枠部測定センサーと内部測定センサーを用いて測定する実験を行った。二つのセンサーで得られた測定値の関係から判別関数を求め、判別点数によってコンクリート充填状態を評価できることが確認できた。

**キーワード：**高周波静電容量、型枠、充填状態、空隙厚さ、模擬豆板、含水率、判別点数

## 1. はじめに

躯体コンクリート品質を確保するためにはコンクリート打設段階において、充填不良を発生させないことが重要である。これまで、型枠内側の充填状態を判定するために、赤外線カメラを用いた装置や<sup>例えは1)</sup>、コンクリートの充填を検知する埋設型のセンサー<sup>例えは2)</sup>が開発されているが、型枠面でランダムに発生する充填不良を即時に把握することは依然難しい。

筆者らは、型枠内側でのコンクリートの充填状態を判定する方法として、型枠外側から高周波静電容量を測定する方法に着目した。本報では、高周波静電容量センサーの測定値による型枠面での空隙厚さあるいは模擬豆板の検出精度を室内の基礎実験により確認するとともに、高周波静電容量に及ぼす型枠の湿润状態の影響を除外してコンクリートの充填状態を判定する方法を検討することとした。

## 2. 高周波静電容量センサーの概要

高周波静電容量センサー（以下センサーと記す）は、図-1に概要を示すように先端と内部

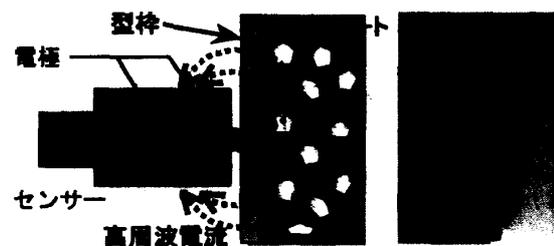


図-1 高周波静電容量センサーによる測定の概要

に電極を有する直径 50mm の円筒形である。本装置は、センサー先端の電極とセンサー内部の電極間で高周波電流を印加したときに、測定対象の高周波静電容量の多寡に従って正弦波出力信号の周期が変化する特性があることを利用する。本装置では、高周波静電容量の代表値として、センサーを空中に向けたときと、測定対象に当てたときの正弦波出力周期の差を時間の単位 ( $10^{-12}\text{sec}$  《PS》) で表す。

## 3. センサーの特性を把握する基礎実験

### 3.1 実験概要

実験は3つのシリーズで実施した。シリーズ1

\*1 (株)竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 工修 (正会員)

\*2 (株)ケツト科学研究所 技術部 (非会員)

では異なる型枠材料単体の高周波静電容量（以下指示値と記す）を評価した。シリーズ 2 ではコンクリートを充填した型枠で、空隙厚さが指示値に及ぼす影響を検討した。シリーズ 3 では含水状態の異なる型枠におけるコンクリート充填状態の違いが指示値に及ぼす影響を検討した。

(1) 実験因子と水準

シリーズ 1~3 における実験の因子と水準を表-1 に示す。

表-1 実験因子と水準

シリーズ	実験因子	水準
1	型枠材料種類	塗装12mm, 普通12mm, 普通9mm, アクリル10mm
	型枠材料ロット*1	A, B, C, D
2	空隙厚さ*2	0mm, 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm, 40mm
3	コンクリート充填状態	コンクリート, 空隙10mm*3, 模擬豆板*4
	型枠水中浸漬時間	0分, 60分

\*1: 材料ロットの違いは厚さ12mmの塗装合板で実施  
 \*2: 型枠面で発泡スチロール板の厚さを変えて調整  
 \*3: 発泡スチロール板を型枠面に設置  
 \*4: ウェットスクリーニングした粗骨材を厚さ20mmで設置

(2) 使用材料とコンクリートの配(調)合

型枠材料は、日本農林規格に適合するコンクリート型枠用合板で厚さ 12mm のウレタン塗装合板、厚さ 12mm 及び 9mm の普通合板、および厚さ 10mm の透明アクリル板とした。コンクリートの使用材料を表-2 に、スランブ 18cm とした配(調)合を表-3 に示す。

(3) 測定項目と実施方法

シリーズ 1 では、指示値と高周波水分計による含水率を、1 水準(1 枚)あたり 5cm 間隔に 9 点

測定した。1 点の測定時間は約 1 秒である。

シリーズ 2 では、コンクリート打設前に指示値と高周波水分計による含水率を 5cm 間隔に 9 点測定し、打設後に同じ位置の指示値を測定した。試験体の概要を図-2 に示す。試験体は、厚さ 12mm の塗装合板で 2 体作製し、発泡スチロール板の枚数を調整して空隙厚さを変えた。

シリーズ 3 では、コンクリート打設前後に同じ位置の指示値を測定した。型枠は気中乾燥状態(浸漬 0 分)と 60 分間水中に浸漬させたものとし、測定直前に型枠両面の水を拭って試験を行った。試験体はシリーズ 2 と同一とし、図-3 のように測定箇所は 5cm 間隔で 9 点を基本として模擬豆板の場合は 6 点とした。

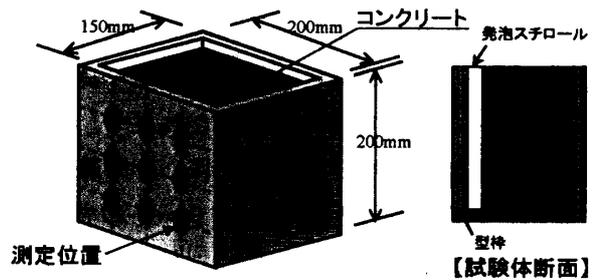


図-2 試験体の概要

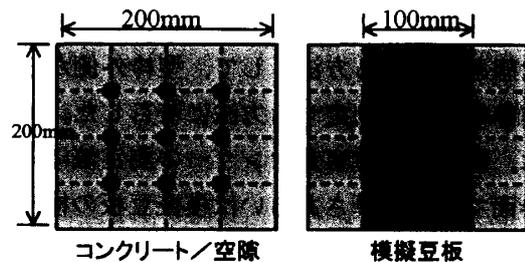


図-3 型枠面での測定位置 (シリーズ 3)

表-2 コンクリートの材料

種類	性質
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	君津産山砂, 表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.6%
粗骨材	八王子産碎石, 表乾密度2.67g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.8%
混和剤	AE減水剤(標準形)

表-3 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	S/a (%)	質量配(調)合(kg/m <sup>3</sup> )				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
55.0	47.1	180	327	819	941	0.818

3.2 実験結果と考察

(1) 型枠材料種類と指示値の関係(シリーズ 1)

各型枠材料における指示値と含水率の測定結果をまとめたものを表-4 に、各測定位置での含水率と指示値の関係を図-4 に示す。表-4 より、指示値の変動係数は 2.4~4.9% の範囲にあり、いずれの型枠材料でも指示値のばらつきは大きくないが、同じ厚さ 12mm の塗装合板でも

ロット間で指示値には差がある。図-4より、指示値は全体として型枠材料の種類によらず含水率にほぼ比例して高い。一つの型枠材料でも各測定位置での含水率は1~2%の幅があり、含水率が高いほど指示値が高い傾向がある。

表-4 型枠材料の指示値と含水率測定結果

		塗装12mm				普通 12mm	普通 9mm	アクリル 10mm
		A	B	C	D			
指示 値	平均値 (PS)	598	502	416	384	553	403	350
	変動係数 (%)	2.4	2.6	3.7	3.1	3.2	4.9	2.4
含水率 平均値(%)		8.7	7.2	5.1	3.4	9.3	5.6	0.0

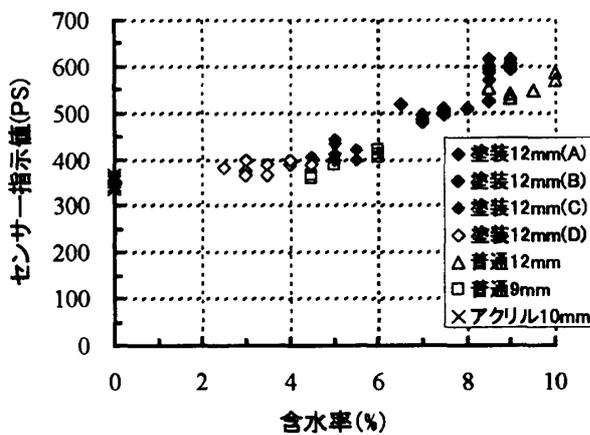


図-4 型枠材料の含水率と指示値の関係

(2) 空隙厚さと指示値の関係(シリーズ2)

空隙厚さを変えて測定した指示値をまとめたものを表-5に示す。空隙厚さと指示値の関係を図-5に示す。図-5より、二つの型枠とも空隙厚さが大きいほど指示値は低下する。空隙厚さが小さい範囲では指示値の低下割合が大きく、空隙厚さが20mmまでの範囲では、指示値の低下割合から空隙厚さをある程度判定できると考えられる。20mmより厚い空隙の場合には、空隙厚さに対する感度が低下するため、空隙の

表-5 各空隙厚さにおける指示値測定結果

型枠	空隙厚さ(mm)								打設前 指示値	型枠含水 率(%)
	0	5	10	15	20	25	30	40		
A	894 2%	710 5%	603 2%	558 3%	508 3%	504 3%	458 3%	456 3%	378 9%	3.0
B	1047 5%	817 2%	678 2%	623 5%	602 2%	583 3%	540 2%	536 3%	468 6%	5.9

※表中の上段は指示値(PS)、下段は指示値の変動係数を示す。

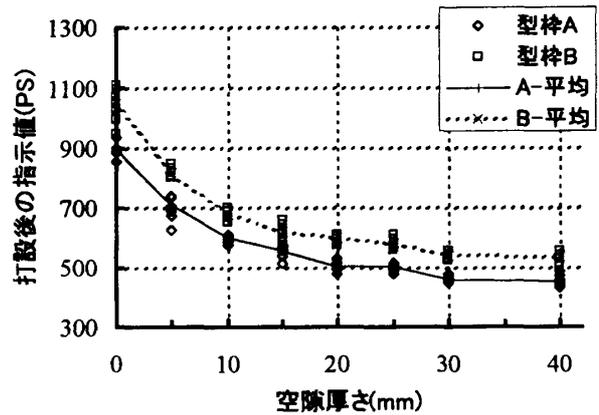


図-5 空隙厚さと指示値の関係

有無は判断できるが厚さを判定することは困難である。二つの型枠を比較すると、型枠Bの方が高い指示値を示した。これはBの型枠含水率が高いことに起因して、型枠材料自体の指示値が異なったことによる。したがって、型枠材料自体の含水率の影響を除外できれば、空隙の厚さや有無が判定できると考えられる。

(3) 含水状態の異なる型枠でのコンクリート充填状態と指示値の関係(シリーズ3)

コンクリート打設前に測定した指示値と型枠の浸漬時間の関係を図-6に示す。打設後と打設前に測定した指示値の関係を図-7に示す。

図-6より、打設前の指示値は、水中浸漬時間0分では383~495PSであったが、水中浸漬時間60分では、488~1103PSと高い範囲となり、ばらつきが大きくなった。ばらつきの原因は、測定位置によって含水状態が異なったことが考えられる。

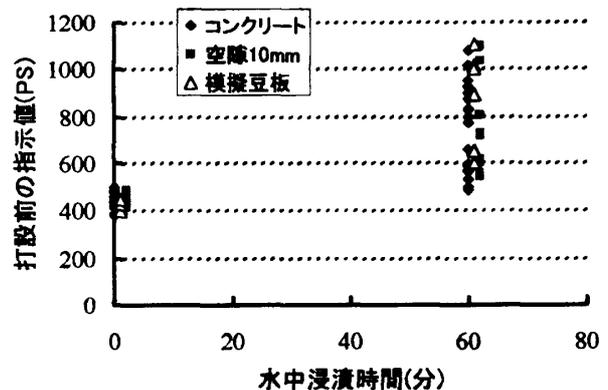


図-6 打設前の指示値と水中浸漬時間の関係

図-7より、打設後の指示値は、打設前の指示値に比例して高くなる傾向がある。コンクリート充填状態の違いに注目すると、打設前の指示値にかかわらず、コンクリート>模擬豆板>空隙10mmの順にほぼ層別できる。模擬豆板は、骨材によって空隙の割合が減少するために空隙10mmよりも大きな指示値を示していると考えられる。以上より、打設前後の指示値を用いることで、異なる含水状態の型枠でもコンクリート充填状態を層別できることが確認できた。

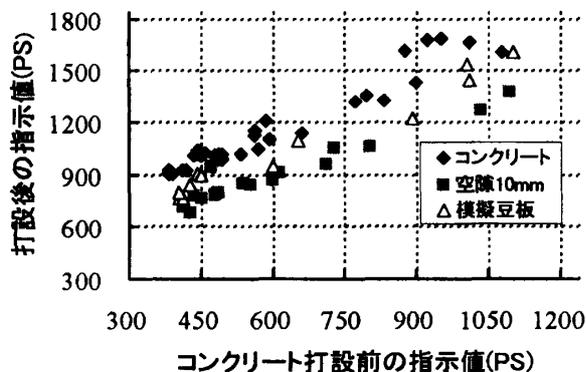


図-7 コンクリート打設後の指示値と打設前の指示値の関係

4. 型枠部測定センサーに関する基礎実験

4.1 実験概要

実際の施工では打設前に指示値を測定することは難しいため、型枠部測定センサーを作製してその特性を検討した。これは、コンクリート打設後でも型枠の含水状態の影響を評価できるよう、センサー内部の電極間隔を調整して測定範囲を狭めたものである。3の実験で使用したセンサーは区別のために内部測定センサーと記す。

(1) 実験因子と水準

実験の因子と水準を表-6に示す。

表-6 実験因子と水準

実験因子	水準
型枠の水中浸漬時間	0分, 15分, 60分, 180分, 360分
測定センサー種類	型枠部測定センサー, 内部測定センサー
測定時期	コンクリート打設前, 打設後

(2) 使用材料とコンクリートの配(調)合

型枠材料は、厚さ12mmのウレタン塗装合板とした。コンクリートの使用材料は表-2に示したものと同一であり、配(調)合は表-3に示したものと同一である。

(3) 測定項目と実施方法

測定項目は、内部測定センサーおよび型枠部測定センサーの指示値とし、打設前後で同じ位置を測定した。測定箇所は5cm間隔で9点とした。試験体の大きさおよび測定位置は図-2および図-3左に示したものと同一とした。試験体は、型枠の各湿潤条件で1体とした。型枠は、所定時間水中に浸漬させ、測定直前に型枠両面の水を拭いて試験を行った。

4.2 実験結果と考察

内部測定センサーおよび型枠部測定センサーで測定した打設前の指示値と型枠の浸漬時間の関係を図-8に示す。また、内部測定センサーおよび型枠部測定センサー両方の打設前と打設後の指示値の関係を図-9に示す。

図-8より、内部測定センサーと型枠部測定センサーともに、打設前の指示値は水中浸漬時間が長いほど高い。これは型枠の吸水量の影響が指示値を受けたためである。内部測定センサーと型枠部測定センサーの指示値は、いずれの浸漬時間でもほぼ同じ値を示した。打設前の指示値の標準偏差は、浸漬時間0分では10~22PSであるが、15分以上では213~385PSに大きくな

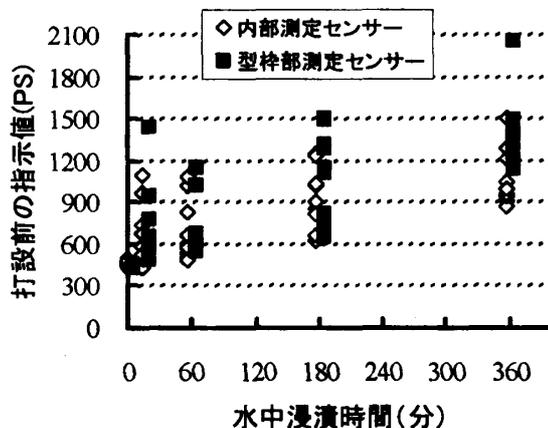


図-8 内部測定センサーと型枠部測定センサーの打設前の指示値と水中浸漬時間の関係

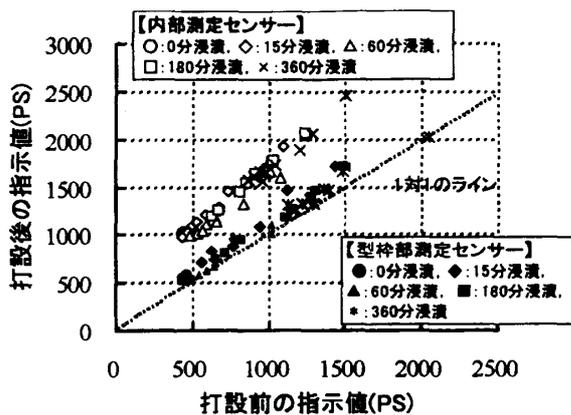


図-9 打設前と打設後の指示値の関係

った。このばらつきが大きくなる傾向は図-6と同じであり、測定位置によって含水状態が異なったことが原因と考えられる。

図-9より、内部測定センサーの指示値は、打設前では435~1508PSであったが、打設後では、983~2460PSとなり、コンクリートの充填によって550~950PS程度大きくなった。型枠部測定センサーの指示値は、打設前では435~2048PSであったが、打設後では533~2018PSとなり、コンクリートの充填によって若干大きくなるようであるがほとんど変わらない。したがって、型枠部測定センサーはコンクリート打設後でも型枠の含水状態の影響を評価できる。

5. コンクリート充填状態の判別に関する検討

5.1 実験概要

含水状態が異なる型枠を用い、コンクリート充填状態の異なる場合に、コンクリート打設後に型枠部測定センサーと内部測定センサーで測定した指示値の関係を検討した。

(1) 実験因子と水準

実験の因子と水準を表-7に示す。

表-7 実験因子と水準

実験因子	水準
コンクリート充填状態	コンクリート, 空隙10mm, 模擬豆板
型枠の水中浸漬時間	0分, 15分, 60分, 180分

(2) 使用材料とコンクリートの配(調)合

型枠材料は、厚さ12mmのウレタン塗装合板とした。コンクリートの使用材料は表-2に示したのと同じである。スラブを15cmとしたコンクリートの配(調)合を表-8に示す。

表-8 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	S/a (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
55.0	47.6	170	309	854	954	0.618

(3) 測定項目と実施方法

測定項目は内部測定センサーおよび型枠部測定センサーの指示値とし、コンクリート打設後に同じ位置を交互に測定した。測定箇所は5cm間隔で6点を基本とし、模擬豆板の場合は4点とした。試験体は図-2と同じとし、測定位置は図-3に示したのものから最下部を除いた位置とした。試験体は、1湿潤条件で2体とした。

5.2 実験結果と考察

(1) 内部測定センサーと型枠部測定センサーの指示値の関係

型枠部測定センサーで測定した指示値と型枠の浸漬時間の関係を図-10に示す。いずれの充填状態でも指示値は浸漬時間が長いほど高くなり、ばらつきも大きくなった。

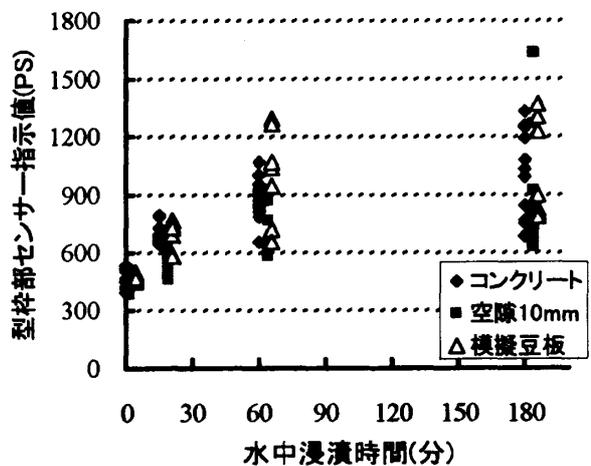


図-10 型枠部測定センサー指示値と水中浸漬時間の関係

内部測定センサーと型枠部測定センサーの指示値の関係を図-11 に示す。両者には正の相関があり、型枠部測定センサーの指示値にかかわらず、コンクリート>模擬豆板>空隙 10mm に層別できる。図-11 は、図-7 に示したコンクリート打設前後の指示値の関係と同じ傾向であり、型枠部測定センサーの指示値は打設前指示値の代用として、異なる含水状態の型枠の影響が評価可能な指標とすることができる。

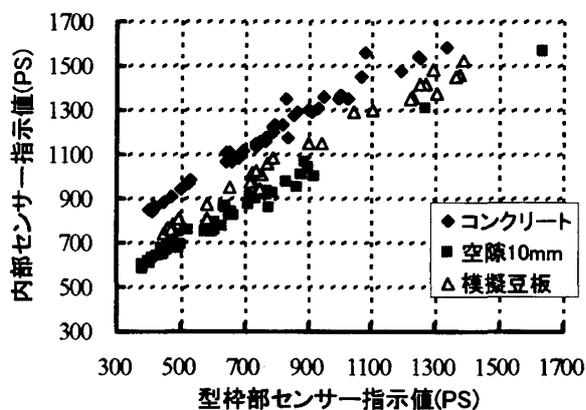


図-11 型枠部測定センサーと内部測定センサーの指示値の関係

## (2) コンクリート充填状態の判別

図-11 の測定データをもとに、型枠部測定センサー指示値  $x_1$  と内部測定センサー指示値  $x_2$  を説明変量とし、データの分布を二分する線形式(判別関数)を判別分析で求めた。得られた判別関数を式(1)に示す。式(1)は型枠部測定センサーと内部測定センサーの指示値を代入して判別点数(判別式からの偏差)を計算するものである。図-11 に示した測定データの判別点数の分布を図-12 に示すが、コンクリート、空隙 10mm、模擬豆板の 3 群に層別された。この結果より、コンクリート充填状態ごとに判別点数の閾値を設定することで、今回の実験で使用したコンクリートでは、内部測定センサーと型枠部測定センサーによる指示値から、型枠の含水状態の違いに関係なく、コンクリートの充填状態が型枠外側から判定できることがわかった。

$$y = -0.0173x_1 + 0.0206x_2 - 8.66 \quad (1)$$

$y$ : 判別点数,  $x_1$ : 型枠部測定センサー指示値

$x_2$ : 内部測定センサー指示値

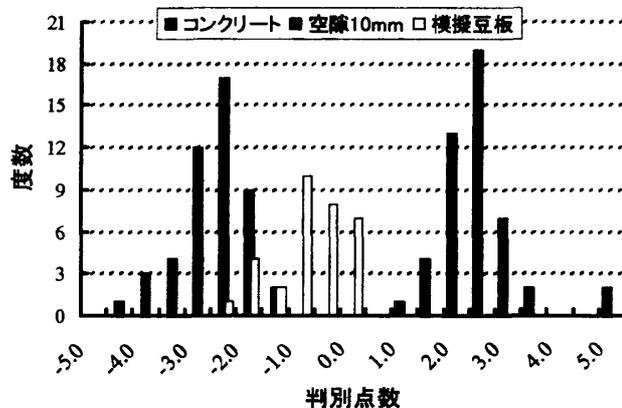


図-12 コンクリート充填状態と判別点数分布

## 6. まとめ

型枠外側から高周波静電容量を測定し、型枠内側のコンクリート充填状態を判定する方法を実験的に検討して得られた結果をまとめる。

- 1) 高周波静電容量センサーは型枠含水率の影響を受けるが、打設前の指示値を基準とすれば、打設後の指示値によってコンクリート充填状態の違いを層別できる。
- 2) 型枠部測定センサーは、コンクリート打設後も型枠の含水状態の違いを評価することができる。
- 3) 内部測定センサーと型枠部測定センサーで測定した指示値から判別点数を算定することで、今回実験で使用したコンクリートの充填状態の違いを評価することができる。

## 参考文献

- 1) 渡部正ほか: 型わく面の熱画像解析によるコンクリート打込み時の欠陥検出法に関する研究, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.51-59, 1993
- 2) 金子稔ほか: 振動を利用したコンクリート充填検知システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.973-976, 2002.8