

## 論文

フレッシュコンクリートの強度発現モニタリングへの  
電気抵抗式水分計の適用性に関する研究

榎園正義\*・谷倉 泉\*\*

\*(一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所, 研究第二部 研究課長(〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

\*\*(一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所, 研究第二部 部長(〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

打設直後に刻々と変化するフレッシュコンクリートの強度発現状態については、簡便で経済的な非破壊検査手法に対するニーズが増加している。本研究は、高周波容量式と電気抵抗式の2方式の電気式水分計を用いたフレッシュコンクリート硬化時のモニタリング手法、鉄筋コンクリートのかぶり深さおよび試験体温度が水分計の指示値に及ぼす影響について検証実験を行って、その適用性を確認したものである。その結果、新型水分計を用いた水分管理手法によればフレッシュコンクリートの表面に接触させることによって初期材令における強度発現の推定が可能であることなどが明らかになった。

キーワード：電気抵抗式水分計、鉄筋かぶり、強度推定、モニタリング

## 1. はじめに

現在、土木、建築分野でのコンクリート表面の水分管理には広く普及している高周波容量式の水分計（従来型水分計）が用いられている。ただし、この水分計については道路橋床版防水便覧において測定の信頼性が劣ることが指摘されており、防水層の施工管理に限らず、コンクリート表面の水分量をより正確に評価できる測定器の開発が求められていた。そこで筆者らは、現場で想定される凹凸のある各種表面仕上げで適用可能な電気抵抗式の水分計（新型水分計）を開発<sup>1)</sup>し、道路橋床版表面の水分量の測定精度の向上に向けて定性的および定量的な評価方法を提案<sup>2), 3)</sup>している。

この新型水分計では、フレッシュコンクリートの電気抵抗値を測定できることから、水和反応に用いられていない残留水分の変化を計測することで、フレッシュコンクリートの強度発現のモニタリングが可能と考えられる。しかし一方で、測定精度向上の面からは、測定値への影響が懸念される鉄筋かぶり厚さと温度依存性の関係については<sup>4)</sup>解明されていないのも現状である。

本研究では、電気式水分計（従来型高周波容量式、新型電気抵抗式）を用いたフレッシュコンクリート硬化時のモニタリング手法および鉄筋コンクリートのかぶり厚さと試験体温度が両水分計の指示値に及ぼす影響について確認実験を行い、水分計の適用性を検証したものである。

表-1 水分計の種類と主な仕様

種類	主な仕様
従来型水分計A (HI-520)	①測定方式:高周波容量式(20MHz) ②測定対象:コンクリート、モルタル、ALC他 ③測定範囲:コンクリート(0~12%)、モルタル(0~15%)
新型水分計B (HI-100相当品)	①測定方式:電気抵抗式 ②測定対象:コンクリート床版 ③測定範囲:コンクリート床版(0~6%)、 電気抵抗換算値(カウント値;10~990)

## 2. 実験概要

## 2.1 水分計の種類とカウント値（電気抵抗換算値）

実験に用いた水分計は、広く普及している高周波容量式の従来型水分計（HI-520；従来型水分計Aと呼ぶ）と電気抵抗式の新型水分計（HI-100相当品；新型水分計Bと呼ぶ）とした。両水分計の主な仕様を表-1に示す。

## 2.2 電気抵抗とカウント値（電気抵抗換算値）について

新型水分計Bは、コンクリートの水分含有量によって電気抵抗が変化することを利用した原理であり、コンクリートの電気抵抗を10kΩから820GΩの広範囲な測定ができる特徴がある。また、計測機能として広範囲な電気抵抗値を取扱いし易くするため、ここではカウント値（電気抵抗を10~990に換算）表示を採用した。

### 3. フレッシュコンクリート硬化過程のモニタリング

#### 3.1 鋼繊維入り超速硬セメント打設後の適用実験

##### (1) 実験概要

道路橋床版の部分補修や増厚工法等の短時間施工の条件で使用する鋼繊維入り超速硬セメント（以下、SFJCと呼ぶ）の打設直後から硬化時までの水分量の変化を把握するため、従来型水分計 A と新型水分計 B の 2 種類を用いた比較実験を行った。

##### (2) 実験方法

試験体は、超速硬セメントを用いた平板コンクリート試験体（ $400 \times 400 \times 80 \text{mm}$ ）を製作・使用した。コンクリートの配合は基準強度 3 時間で  $24 \text{N/mm}^2$ 、 $W/C 38\%$ 、 $s/a 51.3\%$ 、スランプ  $6.5 \text{cm}$ 、空気量  $3.0\%$ 、粗骨材の最大寸法  $25 \text{mm}$ 、超速硬セメント、 $\text{SF} 100 \text{kg/m}^3$  とした。

また、打設条件は恒温恒湿室  $20^\circ\text{C}$ 、 $60\%$ 、打設後 3 時間の圧縮強度は平均  $27.2 \text{N/mm}^2$  であった。

測定では従来型水分計 A は含水率（%）表示で、新型水分計 B はカウント値表示として、試験体表面上に上・中・下各 2 箇所合計 6 箇所の測点で測定を行った。両水分計による測定状況を写真-1 に示す。

##### (3) 実験結果と考察

従来型水分計 A による含水率（%）は、図-1 に示すように打設直後から 2 時間経過時点までは測定上限の  $12\%$  以上の FFF 表示で、その後は  $12\%$  以下の測定範囲となったが、バラツキが生じて表示は不安定となった。これは、コンクリートに混入した鋼繊維によって、測定する静電容量が微妙に変化し、その影響を受けることが原因ではないかと考えられる。

一方、新型水分計 B のカウント値では、SFJC 打設直後の湿潤状態から 1 時間経過後におけるカウント値は  $819 \sim$  最大  $990$  ( $10 \text{k}\Omega$  以下) で、2 時間経過後ではカウント値が急激に低下傾向を示し、4 時間経過後ではカウント値  $200$  ( $2 \text{M}\Omega$ ) 付近で安定し、鋼繊維の影響を殆ど受けずに乾燥状態に到る傾向が確認された。このカウント値の変化から水和反応の経過を示唆する残留水分状態の変化が把握できるため、硬化状態の推定が可能と考えられる。

#### 3.2 超速硬コンクリート打設後の硬化に伴う適用実験

##### (1) 実験概要

超速硬セメント系の試験体製作時に、コンクリート打設直後から 3 時間後までの水分量の変化を把握するため、両水分計を用いた比較実験を行った。

##### (2) 実験方法

試験体は、超速硬プレミックスコンクリート（製品名；ジェットパック）を用いたコンクリート平板試験体（3 体/回； $400 \times 400 \times 65 \text{mm}$ ）を 2 回打設（ケース 1, 2）し、合計 6 体製作した。また、設計基準強度は 3 時間で  $24 \text{N/mm}^2$  とした。



(a) 従来型水分計 A (b) 新型水分計 B

写真-1 水分計による測定状況

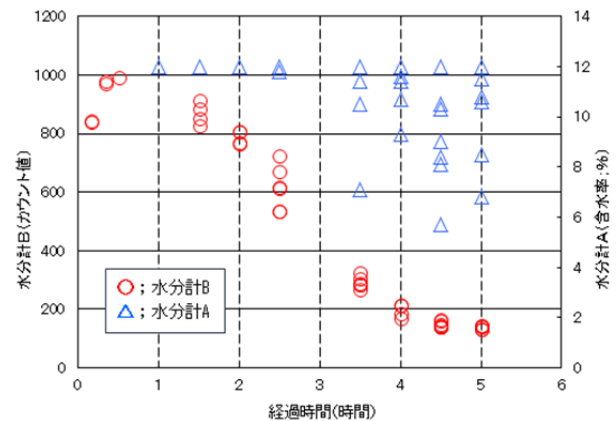
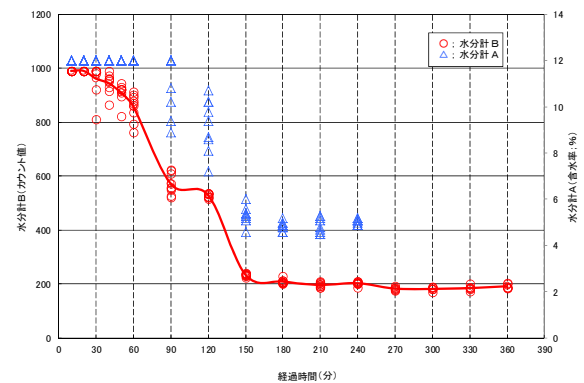
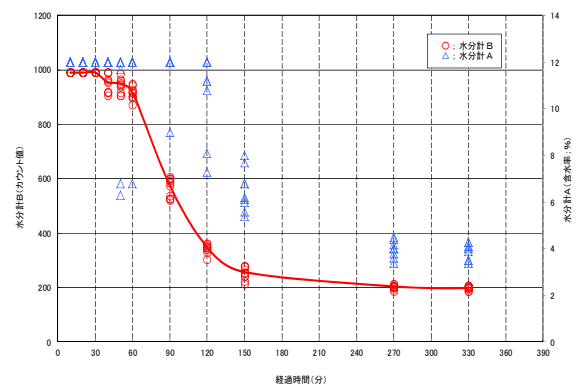


図-1 水分量（含水率, カウント値）の経時変化



(a) 打設試験ケース 1 (1 回目)



(b) 打設試験ケース 2 (2 回目)

図-2 水分量（含水率, カウント値）の経時変化

また、打設後の圧縮強度は2時間後で平均35.4N/mm<sup>2</sup>、4時間後で平均36.8N/mm<sup>2</sup>であった。

測定位置は、試験体表面の上段・中段・下段の各3箇所とし、合計9箇所の測点で行った。

### (3) 実験結果と考察

従来型水分計Aで測定された含水率は、図-2(a), (b)に示すように打設直後から2時間後までは測定値のバラツキが大きく計測不可能な状態であった。また、2.5時間以降では徐々にバラツキの幅が小さくなる傾向が両ケースともに確認されたが、特にケース2では表示値3.0～4.5%の範囲で常に変動した。この変動の要因としては、ケース1とケース2の表面仕上げの凹凸の影響によるものではないかと考えられる。一方、新型水分計Bによるカウント値では、ケース1、ケース2ともに打設0.5時間後から計測が可能な状態となり、2時間後までは若干のバラツキはあるが、2.5時間以降は、殆どバラツキがなく両ケースともに安定したカウント値200 (2MΩ相当)を示し、水和反応により水分量が減少した表面乾燥状態であると考えられる。

以上の結果から、超速硬プレミックスコンクリート打設直後から硬化までの水分量の変化は、新型水分計Bを用いて表面に接触させるだけで安定した計測が可能である。この新型水分計Bでカウント値と圧縮強度の関係を求めておけば、カウント値から硬化状態、すなわちフレッシュコンクリートの圧縮強度の推定が可能と考えられる。

また、多くの現場で断面修復用として使用されるポリマーセメントモルタル (PCM) についても、同様の実験を行った結果、打設直後から水和反応の進展により水分量が減少するほぼ同様の傾向が得られることを確認した。

## 4. 鉄筋入りコンクリートが水分計指示値に及ぼす影響

### 4.1 実験概要

鉄筋コンクリートのかぶり厚さが水分計の指示値に及ぼす影響を確認するため、鉄筋コンクリートのかぶり厚さが異なる試験体を用いた従来型水分計Aと新型水分計Bの比較実験を行った。

### 4.2 実験方法

鉄筋入りのコンクリート試験体(以下、試験体と呼ぶ)は、写真-2に示すような□100×100×400mmの型枠に、異形鉄筋(D13)のかぶり厚さを5, 10, 15, 20mmおよび30mmの5段階で配筋し、早強セメントコンクリートを打設して作製したもの5体を使用した。

コンクリートの配合は、呼び強度24N/mm<sup>2</sup>、スランプ8cm、粗骨材の最大寸法25mm、早強セメント、打設条件は、スランプ8cm、空気量4.4%、コンクリート温度18℃、外気温17℃で、打設後7日の圧縮強度は平均25.2N/mm<sup>2</sup>で、31日では平均35.7N/mm<sup>2</sup>であった。

表-2 実験番号と確認内容

実験番号	確認内容	水分計の種類
実験1	・コンクリート打設後水分量の経時変化(打設直後から硬化後まで)	②新型水分計
実験2	・鉄筋かぶり厚さの影響把握(その1)(硬化後)	①従来型水分計A ②新型水分計B
実験3	・鉄筋かぶり厚さの影響把握(その2)(硬化後)	②新型水分計B



写真-2 測定位置 (①～⑤)

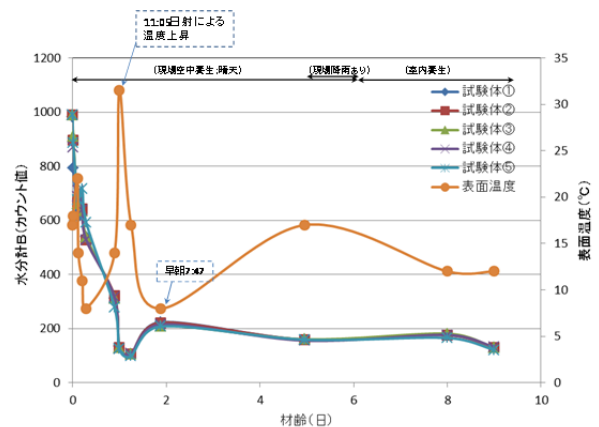


図-3 水分量と試験体温度の経時変化

実験番号と確認内容を表-2に示す。実験1は、新型水分計Bのみを用いてコンクリート打設直後から硬化に至るまで、金コテ仕上げを行った各試験体の打設面を測定対象として、長さ方向に3箇所を測定し、その平均値を求めた。また、実験2、実験3では硬化後の試験体を反転し、平坦なコンクリート面側から鉄筋かぶり厚が所定の5～30mmとなるように設置し、写真-2に示す測定位置①～⑤を10mmピッチに移動させて測定した。ここで③は中央で、鉄筋直上となる。

なお、従来型水分計Aで含水率がバラツキ場合には、約10秒間の変動値から平均値を求めた。

### 4.3 実験結果と考察

#### (1) 実験1 (コンクリート打設直後～硬化まで)



図-3 に示すように、早強コンクリート打設直後のカウント値は最大 990 以上 (10kΩ 以下) であったが、3 時間後には約 600 (30kΩ) , 7 時間後は約 520 (50kΩ) , 24 時間後は約 135 (28MΩ) , 日射によって表面の乾燥が促進された約 30 時間後では約 106 (200MΩ) と非常に乾燥した状態となり、水和反応すなわち残留水分の状態変化を示しているのではないかと考えられる。

### (2) 実験 2 (硬化後)

従来型水分計 A は、図-4(a)に示すように、かぶり厚さの違いによって含水率が変化し、その含水率の変動もかぶり厚さが 5 から 30mm へと大きくなると、変動幅は 0.4% から 0.1% へと小さくなる傾向が認められ、含水率の表示値とその変動の幅は鉄筋かぶり厚さの影響によるものではないかと推察される。すなわち、従来型水分計 A で鉄筋の影響を受けずに測定を行うためには、30mm 以上のかぶりを確保する必要があると考えられる。

一方、新型水分計 B では、図-4(b)に示すように鉄筋かぶり厚さ 5~25mm (試験体 No.1~No.4) の平均カウント値は概ね 200 (2MΩ) と一定で、かぶり厚さ 30mm (試験体 No.5) で平均カウント値が 168 と若干低い結果となったが、最も鉄筋かぶりの小さな試験体 No.1 のバラツキが少ないうえ、試験体 No.1~No.4 はほぼ同様な表面乾燥状態であり、窓側に近い試験体 No.5 のみ日射の影響で若干乾燥が進行しているものと推定される。

以上のことから、従来型水分計 A と新型水分計 B を比較すると、新型水分計 B は鉄筋かぶり厚さの影響を殆ど受けずに測定可能であるが、従来型水分計 A は検出対象の水分量の他に、かぶり 30mm 位置の鉄筋の影響を受けて静電容量が変化するため、含水率表示値が変動し、測定値に誤差を生じることがわかった。

### (3) 実験 3 (硬化後)

鉄筋かぶり厚さの影響を詳細に検証するため、各試験体 No.1~No.5 の端部から 10mm ピッチで測定値位置を合計 9 箇所にて、長さ 90mm までの各測定位置を新型水分計 B を用いて測定したカウント値の分布を図-5 に示す。

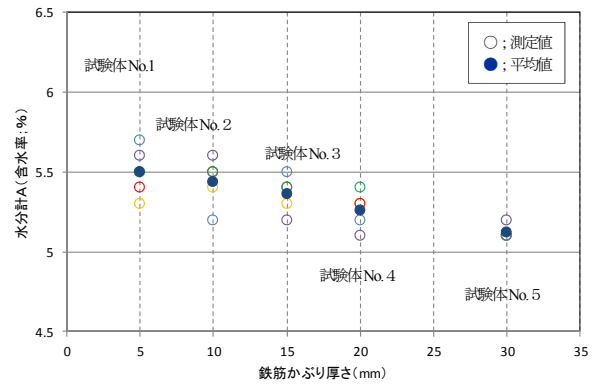
この図中の最も鉄筋の影響を受ける可能性のある試験体 No.1 のかぶり 5mm に着目すると、端部から 50mm の測定位置が鉄筋の直上③の測点となるが、分布図からは大きな変動が無く鉄筋の影響は認められなかった。

このことから、新型水分計 B は、コンクリート内の鉄筋等の金属の影響を受けずに測定が可能であることが確認できた。

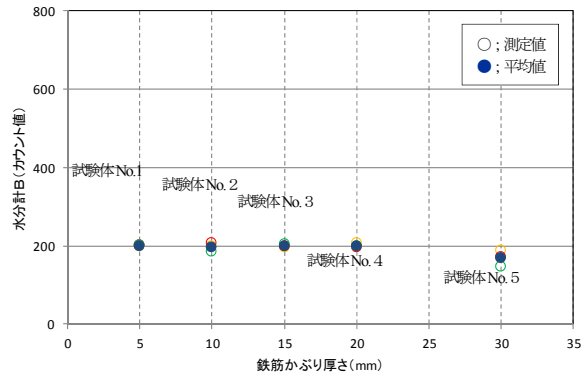
## 5. コンクリート温度が水分計指示値に及ぼす影響

### 5.1 実験概要

新型水分計 B を用いた現場でのコンクリート表面の測定は、種々の温度条件下で実施されることが想定されることから、試験体の温度の異なる条件下でカウント値を



(a) 従来型水分計 A (測定位置③)



(b) 新型水分計 B (測定位置③)

図-4 水分量の測定結果 (鉄筋かぶり 5~30mm)

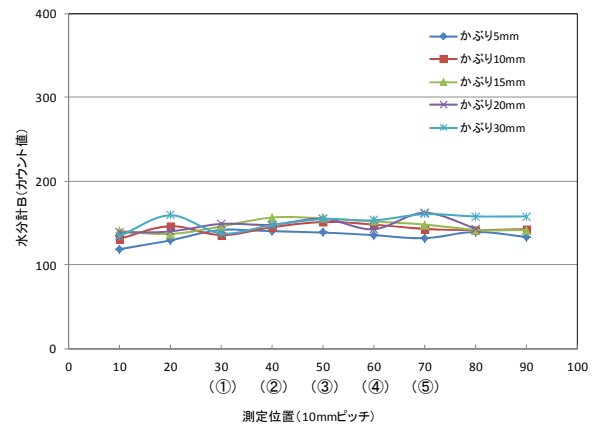


図-5 新型水分計 B の測定結果 (試験体 No.1~No.5)

表-3 試験体の種類と質量

試験体	No. 3	No. 4
質量 (g)	12558.1	12924.9
備考	・7日間以上水中養生後の湿潤状態の質量を示す。	

測定し、水分計指示値に温度依存性が認められるかどうかについて検証実験を行った。

## 5.2 実験方法

試験体は、JIS規格のコンクリート平板試験体（ $300 \times 300 \times 60\text{mm}$ ）で、表-3に示す試験体No.3を基本とし、一部No.4を使用した。また、表面仕上げ条件は①上面（ブラスト処理面）、②側面（平滑面）とした。測定項目と測定方法を表-4に示す。測定は各試験温度条件で試験体の上面側に上段・中段・下段に各3測点、合計9測点とし、その平均値を求めた。また、温度依存性に関する実験条件を表-5に示す。

## 5.3 実験結果と考察

図-6に示すように試験体表面が最大含水率5.35%相当の滞水状態の場合、試験体温度5~40°Cのカウンタ値は、平均で527~534と殆ど変化がない結果となった。また、含水率3%相当の表面乾燥状態の場合には、各試験体温度の変化に対して、カウンタ値は平均217~228と変化は小さく、ほぼ一定の値を示した。さらに、含水率0%相当の絶乾状態の場合には、各試験体温度の変化に対して、カウンタ値は平均47~54の範囲と変化は小さく、ほぼ一定の値を示した。

以上のことから、コンクリート平板試験体の滞水状態、表面乾燥状態および絶乾状態では、試験体温度5~40°Cの変化に対して、カウンタ値はほぼ一定指示となり、試験体温度の違いによるカウンタ値への影響（温度依存性）が生じないことを確認することが出来た。

表-4 測定項目と測定方法

測定項目	測定方法	主な仕様	型名
①カウンタ値 (電気抵抗換算値)	電気抵抗式水分計	・カウンタ値表示 (電気抵抗換算値)	・HI-100
②試験体温度	非接触表面温度計	・測定範囲: -20~400°C	・PT-3LD
③試験体質量	電子天秤	・最小0.1g	
④含水率	質量含水率による	・質量含水率測定	
摘要	・含水率計算で用いる湿潤状態の質量とは試験体を7日以上水中養生した後の質量で、絶乾状態の質量とは恒温槽（100°C以上）を用いて6日間以上強制乾燥した後の質量とした。		

表-5 実験条件

試験体の種類	目標含水率 (%)	試験温度 (°C)	水分状態
No. 3	6	5, 10, 20, 30, 40の5条件	・湿潤状態の含水率 (最大値)
	3~4	5, 10, 20, 30, 40の5条件	・表面乾燥状態の含水率
	0	5, 10, 20, 30, 40の5条件	・絶乾状態の含水率 (最小値)
No. 4	7	5, 10, 20, 30, 40の5条件	・湿潤状態の含水率 (最大値)
	0	5, 10, 20, 30, 40の5条件	・絶乾状態の含水率 (最小値)
摘要	・試験体の温度を5~40°Cの範囲で変化させた。 また、各試験温度条件では、2~6時間以上静置した後でカウンタ値を計測した。		

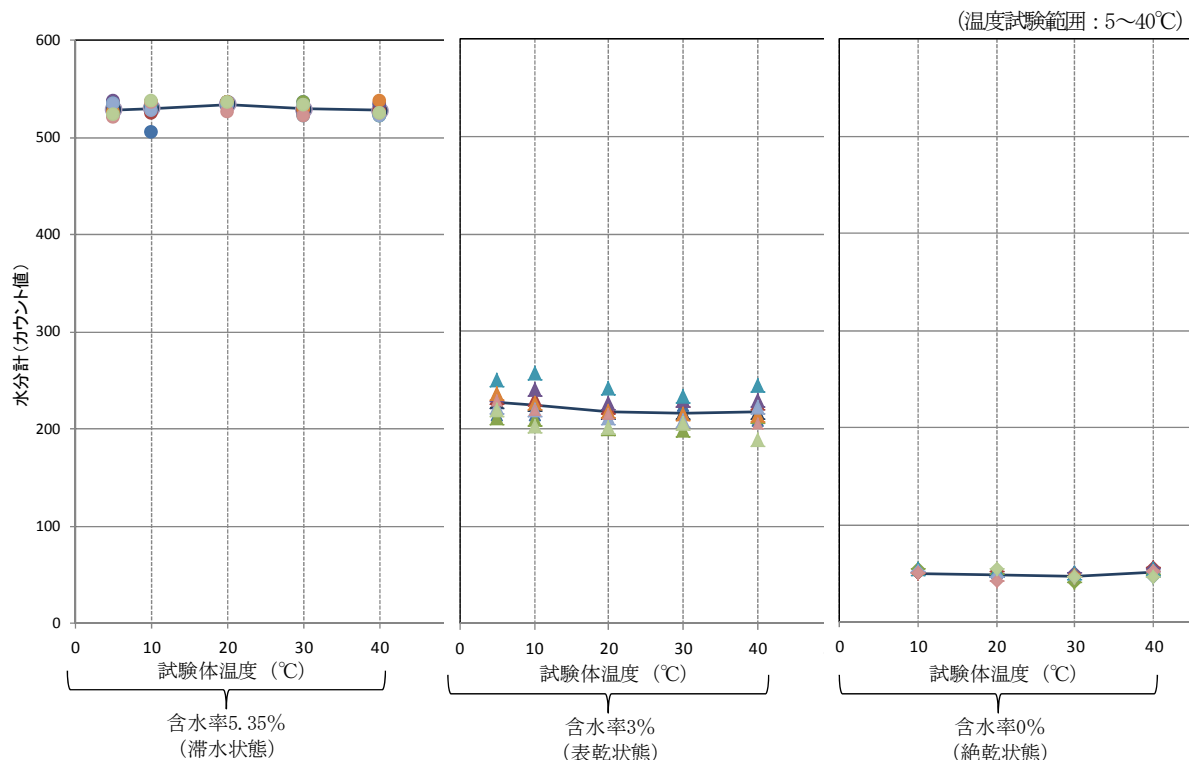


図-6 各試験温度における新型水分計B (カウンタ値) 測定結果

## 6. まとめ

本実験の結果によって得られた結果は、次のとおりである。

- (1) 電気抵抗式の新型水分計 B を用いて表面に接触させて水分量測定を行うことにより、SFJC、超速硬プレミックスコンクリート、ポリマーセメントモルタルおよび早強セメントコンクリートの打設直後から硬化過程までの硬化過程のモニタリングが可能である。一方、高周波容量式の従来型水分計 A では硬化するまでの測定値のバラツキが大きく、適用は困難である。
- (2) このカウント値から内在する水分量の変化、言い換えれば水和反応の過程が把握できることから、あらかじめカウント値と圧縮強度の関係を求めておけば、カウント値から硬化状態の推定が可能と考えられる。
- (3) 異形鉄筋 (D13) のかぶり厚さが水分計の指示値に及ぼす影響については、新型水分計 B は鉄筋かぶり厚さや混入した鋼繊維の影響を受けずに安定した測定が可能である。一方、従来型水分計 A は鉄筋かぶり厚さ 30mm 以内では鉄筋の影響を受けて測定結果が変動するため誤差を生じる。
- (4) コンクリート温度が水分計の指示値に及ぼす影響を検証した結果、各種水分条件下で試験体温度を 5～40℃の範囲で変化させた場合、そのカウント値の指示値はほぼ一定でコンクリート温度の影響は認められなかった。すなわち、この温度範囲であればコンクリート温度に依存せずに水分量の測定が可能である。
- (5) 新型水分計 B によるカウント値は、硬化したコンクリートが滞水した状態では最大値 500～600 (60kΩ～30kΩ) を表示するのに対して、各種フレッシュコンクリートの打設直後は、水分計の最大値 990 以上

(10kΩ 以下) を指示する特性があることが確認された。

## 7. おわりに

本研究においては、市販のコンクリート用電気式水分計 2 種類を用いて、フレッシュコンクリート打設直後から硬化するまでに残存する水分量の変化に着目した検証を行った。その結果、新型水分計 B を用いて表面に接触させるだけでコンクリート中の鉄筋や鋼繊維等の金属の影響を受けることなく簡便に測定可能であることや、コンクリート打設直後からの初期材令での強度発現についてのモニタリング手法としての適用性についても新たな知見が得られた。今後は、各種コンクリートでのデータ収集・蓄積を行い、残存する水分量と強度との関係から硬化状態の簡易判定手法の確立についても研究していきたい。

## 参考文献

- 1) 榎園正義, 谷倉泉, 後藤昭彦, 宮永憲一: 床版防水工における水分計の適用性に関する実験的研究, 土木学会第 67 回年次学術講演会, pp.19～20, 2013.9
- 2) 谷倉泉, 榎園正義, 後藤昭彦: 床版防水工における水分計の適用性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1112～1123, 2013.3
- 3) 谷倉泉, 榎園正義, 後藤昭彦, 宮永憲一: 床版防水工における水分計の適用性に関する実験的研究 (その 2), 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.731～732, 2014.9
- 4) 湯浅昇, 美田町雅弘, 沓掛文夫, 結城英恭: 試製新型高周波容量式水分計の表示値とセラミックセンサによる含水率の関係, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.219～222, 2012.8