

論文 印加電圧方式によるコンクリートの水分率推定方法に関する基礎研究

佐野 禎^{*1}・末吉 良敏^{*2}・平田 隆祥^{*3}・十河 茂幸^{*4}

要旨：フレッシュコンクリートから硬化過程にいたるコンクリート中の水分の変化を、印加した電圧の残留値から推定する埋込み型センサおよび計測システムを提案し、モルタル供試体を対象とした評価試験を行った結果、センサの出力電圧とモルタルの自由水率の間に相関性が確認された。また、この埋込み型センサを用いてコンクリートの自由水率の変化を推定することにより、圧縮強度を推定できる可能性を示した。

キーワード：印加電圧方式，非破壊，自由水率，結合水率，圧縮強度，推定精度

1. はじめに

フレッシュコンクリートから硬化過程にいたるコンクリート中の水分の変化はセメントの水和と密接に結びついており、その変化の状態を連続してモニタリングすることが出来れば、水和に関連した各種性質を予測する上で有効な手法と成り得る。

水分測定の方法については、これまでも多くの研究¹⁾がなされており、測定原理として、(a) 水分をコンクリートとの比抵抗から測定する方法、(b) コンクリートに設けた小孔内の湿度および結露水を測定する方法、(c) 中性子線を利用する方法などが挙げられる。しかし、従来の方法の多くは測定に煩雑な作業や熟練を要求されることが多く、簡便かつ長期的に安定してモニタリングすることが課題となっていた。

そこで、本研究では埋込み型センサと汎用データロガーにより、電気的にかつ非破壊でコンクリート内部の水分の変化を連続モニタリングする計測システムを提案し、計測対象をモルタルとしてその推定精度を確認した。さらに水分の移動が無い状態では、水分の変化が強度の増進と密接に結びついていることを確認した。

2. 計測システム

2.1 埋込み型センサ

写真-1に埋込み型センサの外観を示す。センサは多孔質材料、電極棒、基板およびケーブル、保護ケースの4つの部品で構成され、寸法はφ1.5×2.4cmである。このセンサはコンクリートの水分の変化を、多孔質材料内の連続空隙に浸透させたセメントペースト中の水分の変化から検知する。そのため、セメントペーストは粘性等に関わらず、多孔質材料に均一に浸透する必要がある。しかし、前回試作したセンサ¹⁾は配合によって、多孔質材料の形状や構造等の問題からペーストが均一に浸透されず、計測精度が

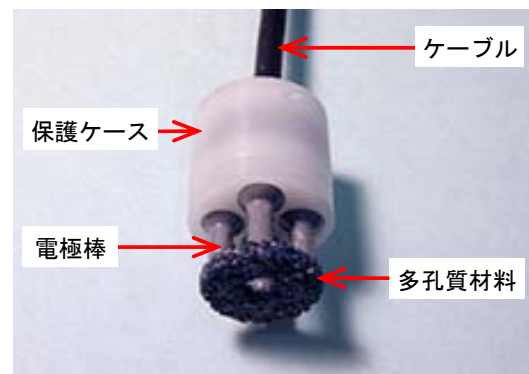


写真-1 埋込み型センサ

*1 (株)東京測器研究所 第三製造部 研究主任 工修 (正会員)

*2 (株)東京測器研究所 第三製造部 次長 (正会員)

*3 (株)大林組 土木技術本部 構造技術部 リニューアルグループ 博士(工学) (正会員)

*4 (株)大林組 技術研究所 副所長 工博 (正会員)

悪化する可能性があった。そこで、多孔質材料部は可能な限りアスペクト比（高さ/直径）を小さく、空隙が大きい構造とした。また、コンクリート中の水分の移動方向を極力拘束せず、かつ全方位での水分の移動が可能ないように、多孔質材料と保護ケースの間に十分な空間を設けた。

2.2 計測原理

図-1に計測システムの回路を示す。センサの多孔質材料をコンデンサとして、その内部空隙に吸収したセメントペーストの水分変化を電氣的に捉える印加電圧方式は、交流電源を用いての電気抵抗、比抵抗、静電容量等を測定して水分の変化を捉える方法²⁾とは原理的に異なる。

図-2に印加電圧方式の概念図を、図-3に出力電圧と水分の変化の関係を示す。まず多孔質内の空隙にコンクリート中のペーストを浸透させる（A 印加前）。次に多孔質材内に配置された電極から浸透させたペーストに電圧を印加する。この電圧の印加によりペースト内部の水分の中で分子間力などの影響を受けていない比較的ルーズな自由水に存在するOH⁻などの陰イオンは陽極に、K⁺、Na⁺などの陽イオンは陰極に移動し、電荷が蓄積される（B 印加区間）。印加を止めると直ちに電極間に蓄積された電荷が放電される（C 放電区間）。放電の過程は、コンクリート中の水分量やイオン濃度の変化により電気伝導度が変化するため、この放電過程の残留電圧の変化を計測することで、コンクリート中の水分の変化を相対的に捉えることができる。

なお、放電の過程は測定対象の配合や使用するセメントの種類およびそのメーカーによっても固有の変化を示し、また水分の変化以外にも、塩分や中性化などの影響を受けると推測される。

2.3 計測システム

計測システムは埋込み型センサと、汎用型データロガーおよびスイッチボックスからなる計測部から構成される。複数の埋込み型センサを取付けることで、コンクリートの水分の変化を相対的に、非破壊でリアルタイムに多点モニタリングすることが可能である。

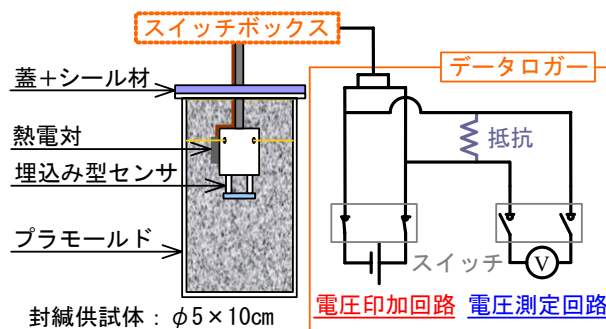


図-1 計測システムの回路

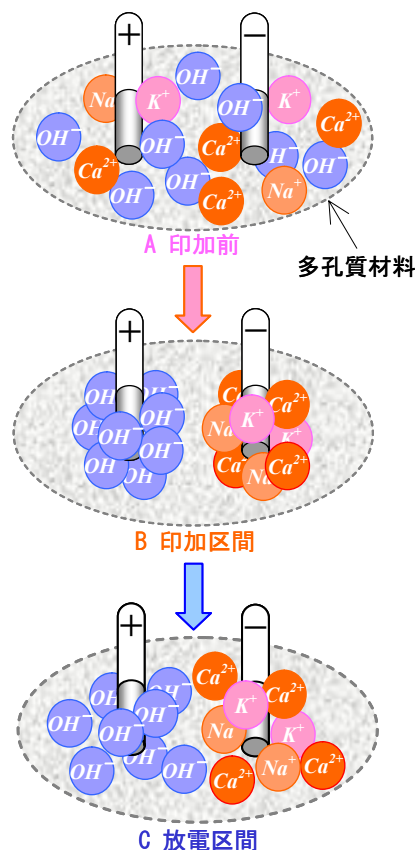


図-2 印加電圧方式の概念図

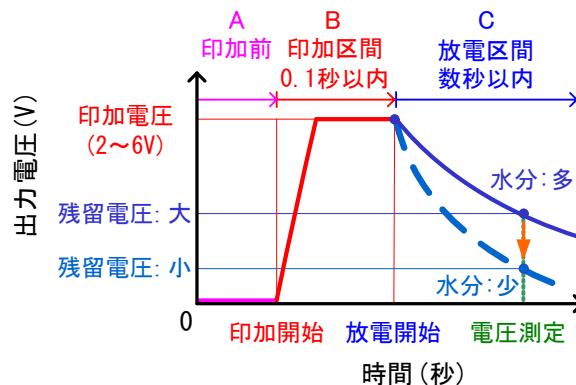


図-3 出力電圧と水分の変化の関係

表-1 モルタルの配合

配合 No.	W/C (%)	S/C	単体量 (kg/m ³)			混和剤(C×%)	
			W	C	S	A	B
1	40	0.8	391	977	780	2.5	0.1
2	50	0.91	429	857	780	1.0	0.2
3	60	1.02	458	764	780	0	0.5

セメント：普通ポルトランドセメント 細骨材：珪砂6号

A：高性能 AE 減水剤（メラニンスルホン酸系）

B：増粘剤（セルロース系）

表-2 試験条件

W/C (%)	センサ No.	各材齢の養生および温度条件		
		0~105d	105~147d	147~196d
40	1,2,3	封緘 20℃	封緘 20℃	封緘 20℃
	4,5,6			
	7		気乾 20℃	水中 20℃
	8		水中 20℃	気乾 20℃
60	9	封緘 室温	封緘 室温	
	10,11,12	封緘 20℃	封緘 20℃	

3. 評価試験方法

3.1 試験概要

本試験では W/C = 40, 50, 60% のモルタルを計測対象として、20℃一定環境下で封緘養生を行い、センサの出力電圧と自由水率、結合水率、および圧縮強度を比較し、センサの推定精度を検討した。また、W/C = 50% ではセンサの温度影響と外部環境要因による水分の変化を与えた場合のセンサの追従性も確認した。なお、本研究では出力電圧を「印加電圧放電時の残留電圧」、自由水率を「自由水量/単体量」、結合水率を「(単体量 - 自由水量) / 単体量」と定義した。

3.2 配合および使用材料

表-1 に配合と使用材料を示す。センサの精度は多孔質材料へ浸透したペーストの性質に支配される可能性がある。従って、ブリーディング水が分離した状態で侵入すれば誤差が生じ得るため、増粘剤を加えて分離を制御した。またフローは0打フローで200~250mm、ブリーディング率は0.5%以下になるよう配合を設計した。

3.3 試験条件

表-2 に試験条件を示す。W/C = 40, 60% は寸法φ5×10cmのセンサ供試体を3体作製し20℃一定環境下で封緘養生を行った。また、W/C = 50% については6体作製した。その内3体(No.4~6)は20℃一定環境下で封緘養生を行ない、2体(No.7, 8)は材齢105日まで封緘養生を行った後脱型し、それぞれ気乾養生(湿度30~60%前後)と水中養生(水道水を使用)を交互に行った。残り1体(No.9)は20℃一定環境下で材

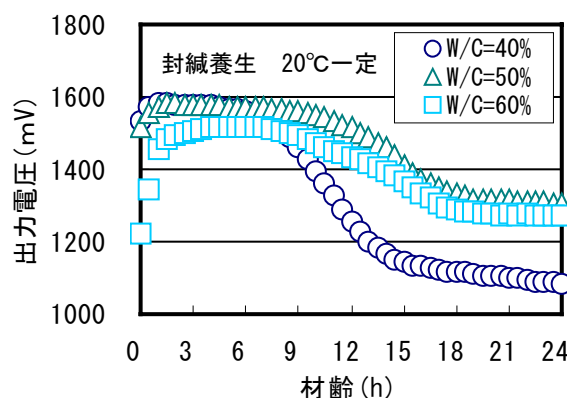


図-4 各 W/C の出力電圧（平均値）の経時変化

齢105日まで封緘養生を行ない、その後は室温で引き続き封緘養生を行なった。なお、自由水量測定用および圧縮強度試験用供試体については20℃一定環境下で封緘養生を行った。

3.4 自由水量と強度の測定

材齢1, 2, 3, 7, 14, 28, 56, 105, 196日で自由水量の測定と圧縮強度試験を行なった。自由水量の測定はモルタル供試体を粉砕し、5mmふるいに残った5~10mm程度の試料片100gを105℃の真空乾燥炉で72時間以上乾燥させ、恒量となった時点の損失量を自由水量とした。

4. 試験結果

4.1 センサの出力電圧

(1) センサの出力電圧の取扱い

センサの出力電圧と供試体温度は、打設直後から30分間隔で計測した。図-4に材齢24時間までのW/C = 40%, 50%, 60%における20℃一定環境下で封緘養生を行なったモルタルの出

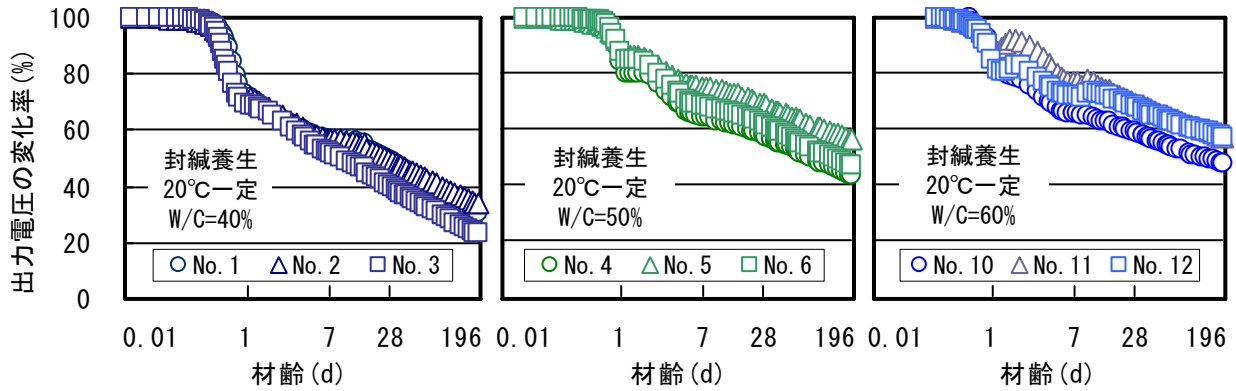


図-5 各 W/C における出力電圧の変化率の経時変化

出力電圧（平均値）の経時変化を示す。出力電圧の減少量は水セメント比が小さいものほど大きい。センサの最大出力電圧は必ずしも水セメント比、単位水量、単位セメント量とは一致していない。これは、センサの出力電圧が水分の変化と同様に可溶性のイオン、すなわち電気伝導度の影響を大きく受けているためと考えられる。

また、最大出力電圧発生時間は最も水分が多い打設直後ではなく、W/C = 40%が打設後 1.5h、50%が 2h、60%が 3h で、水セメント比が小さいほど最大となる時間が短い傾向が認められた。

そこで本研究では、出力電圧は最大出力電圧時を 100%飽水状態として、そこから出力電圧の変化率で水分の変化を取扱った。

(2) 配合の影響

図-5に 20°C一定環境下で封緘養生を行なった各水セメント比におけるモルタルの出力電圧の変化率の経時変化を示す。各配合とも打設直後から連続して計測されている。またセンサ間の出力電圧の変化率のバラツキは最大 10%であったが、材齢 7 日以降は変化率の減少の傾きはほぼ一致している。

図-6に各水セメント比における出力電圧の変化率の経時変化の平均値を示す。出力電圧の変化率は、W/C= 50%と 60%に明確な違いは認められなかったが、材齢 7 日以降では水セメント比が小さいものほど減少率が大きいことが確認された。なお、これ以降の項目に関しては、ここに示した各配合の平均値で評価した。

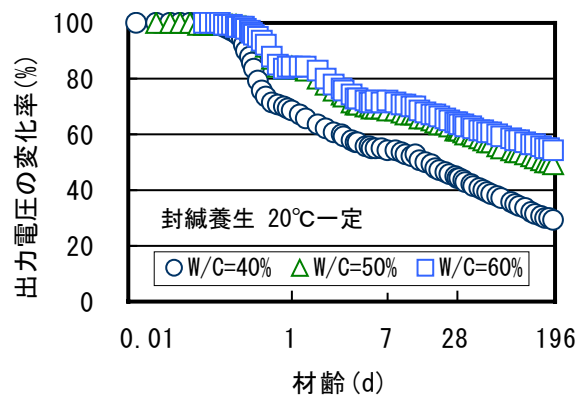


図-6 各 W/C における出力電圧の変化率（平均値）の経時変化

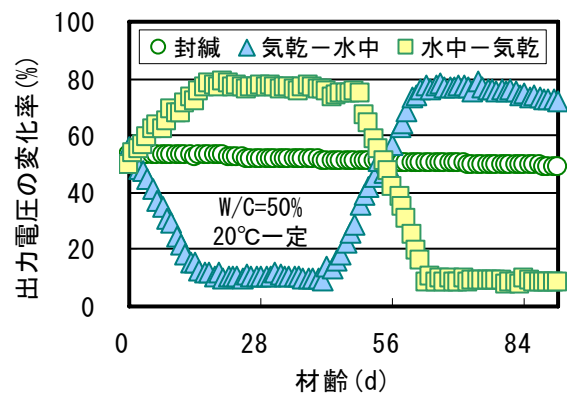


図-7 養生条件の影響

(3) 養生条件の影響

図-7に 20°C一定環境下の W/C=50%のモルタルにおいて、養生条件がセンサの出力電圧の変化率に及ぼす影響を示す。水和がある程度進行した 105 日まで封緘養生を行った後、No.7 は気乾養生→水中養生、No.8 は水中養生→気乾養生に変更し、外部環境からのモルタル内部への

水分の浸透、逸散をセンサが計測できるか検討した。出力電圧の変化率は、封緘養生（平均値）と比較して気乾養生では減少し、水中養生では増加した。これは気乾養生ではモルタル内の水分が乾燥の影響を受けて減少し、水中養生では吸水により増加したことによるものであり、センサは外部環境要因によるモルタル内部の水分移動を捉えていると考えられる。

(4) 温度影響と補正

図-8に外部からの水分移動が無い状態のW/C=50%のモルタルにおける、モルタルの絶対温度の逆数と出力電圧の自然対数の関係（アレニウスプロット）を示す。出力電圧はモルタルの温度変化により変動するが、これは自由水が高アルカリ性で、温度により電気伝導度が著しく変化することに起因している。ここで、絶対温度 T 時の出力電圧を $mV(T)$ 、 20°C (293K)時の計測値に補正した出力電圧を $mV(293)$ とすると、

$$mV(293) = \frac{mV(T)}{\exp\{-702.67(1/T - 1/293)\}} \quad (1)$$

で表され、任意の温度で計測した出力電圧を 20°C 時の出力電圧に補正出来る。なお、温度特性は約 $6.3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ （出力電圧の変化率に換算すると約 $0.4\%/^{\circ}\text{C}$ ）となったが、これは水和がある程度進行した硬化域に対応し、水和の進行に伴い水分率や空隙径等が変化するため若材齢等では温度特性が異なると推測される。今回のように、センサ間の出力電圧の変化率のバラツキが10%程度あり、かつ温度変化が少ない場合、補正の意味は少ないが、実構造物など温度変化が大きい場合は有効であると考えられる。

4.2 センサの出力電圧と自由水率

図-9に各水セメント比における自由水率の経時変化を示す。W/C=50%と60%に大きな違いは認められないが、図-6に示した水セメント比と出力電圧の変化率（平均値）の経時変化も同様の傾向を示している。この要因として両配合の電気伝導度が近いことが考えられる。

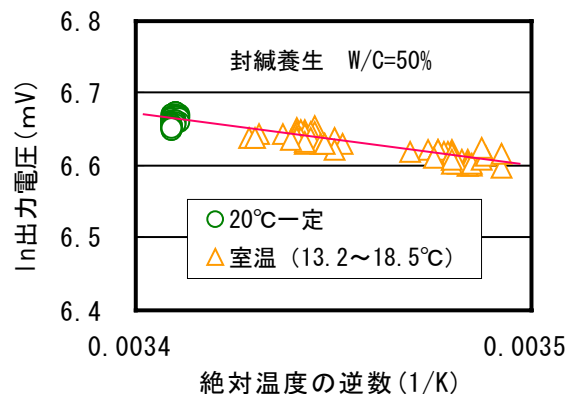


図-8 温度影響

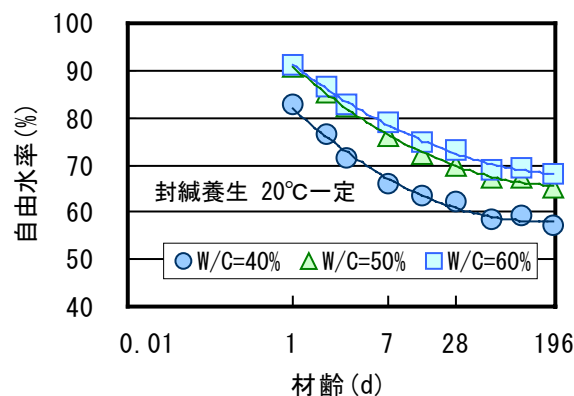


図-9 各W/Cの自由水率の経時変化

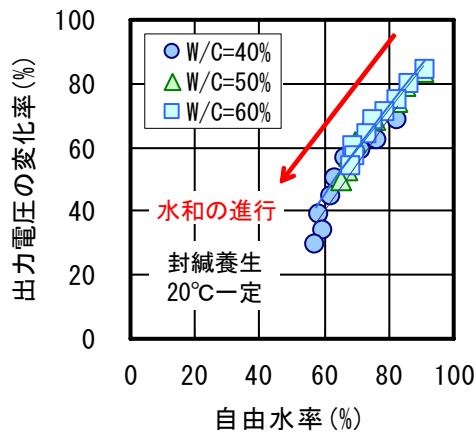


図-10 各W/Cの出力電圧の変化率と自由水率

図-10に出力電圧の変化率と自由水率の関係を示す。センサの出力電圧の変化率と自由水率は、水セメント比に係わらずほぼ直線関係となり、自由水率が低下すると出力電圧も低下する。

すなわち、センサは水分移動が無い条件下では、水和の過程で自由水が結合水に変わり全体の水量が減少するという現象を打設後から連続で捉えており、自由水率の推定に十分な精度を

持つと判断されるとともに、配合間で電気伝導度が異なる場合には水セメント比の違いも識別が可能であると推測される。

4.3 センサの出力電圧と圧縮強度

図-11 に水分移動が無い条件下の各水セメント比における圧縮強度と結合水率の関係を、図-12 に出力電圧の変化率と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度と結合水率は水セメント比に係わらず、ほぼ同一放物線上に表される。また出力電圧の変化率と圧縮強度は水セメント比に係わらずほぼ直線関係となり、圧縮強度が増加すると出力電圧は低下する。

センサは結合水を直接測定することは出来ないが、水分移動の無い条件下では、水和の過程において自由水が結合水に変わって全体の水量が減少するという現象を材齢初期から連続して捉えていることから、結合水率を推定することも可能となり、結果としてマスコンクリート内部のような条件において水和に起因する圧縮強度の推定も可能となったと考えられる。

ただし、圧縮強度の推定精度は自由水率の場合と比較し若干低下する。

5. まとめ

コンクリート中の水分変化を、印加した電圧の残留値から推定する埋込み型センサおよび計測システムを提案し、モルタルを計測対象として自由水率と圧縮強度の推定精度を検討した。

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 埋込み型センサの出力電圧は、モルタル中の水分変化を捉えている。また、配合間で電気伝導度が異なる場合、水セメント比の違いも識別が可能であると推測される。
- (2) 埋込み型センサの出力電圧は、水和がある程度進行した材齢以降では、外部環境要因によるモルタル内部の水分移動についても計測することができる。
- (3) 埋込み型センサの出力電圧は、温度影響を受けるが、温度補正を行うことができる。
- (4) 埋込み型センサは、水分の移動の無い条件

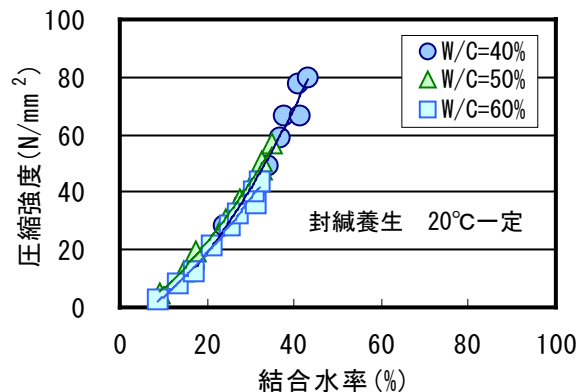


図-11 各 W/C における圧縮強度と結合水率

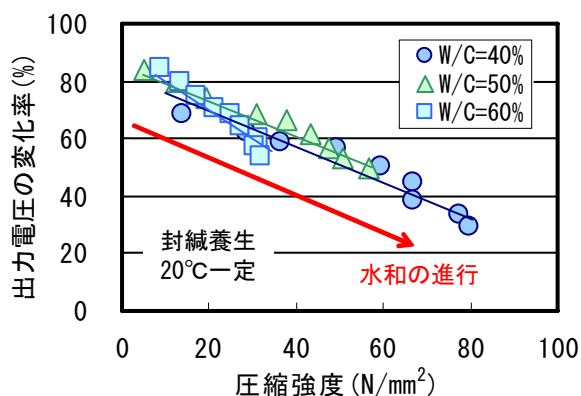


図-12 各 W/C の出力電圧の変化率と自由水率

下において、水和における自由水が結合水に変わって全体の水量が減少するという現象を捉えており、モルタルの自由水率および圧縮強度の推定が可能である。ただし、実構造物においてはセンサの出力電圧は電気伝導度の影響を受けるため、塩分や中性化などの影響を受けると推測される。

今後は材齢1年までモルタルの試験を継続し、コンクリートへの適応性を検討する予定である。

参考文献

- 1) 平田隆祥, 末吉良敏, 十河茂幸ほか: 埋込み型センサによるコンクリート中の水分量モニタリングに関する基礎研究, pp.112-113, 第56回セメント技術大会講演要旨 2002.5
- 2) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率の測定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第498号, pp.13-20, 1997.8