

論文 マイクロ波式水分センサの特性に対する塩分の影響

中垣一宏*¹・田代利明*²・小河洋夫*³・鬼頭昌之*⁴

要旨：コンクリート製造における細骨材表面水率の測定方法として普及している、マイクロ波センサ式オンライン型水分計は、その出力特性が測定時の試料充填状態や塩化物等の電解質含有量の影響を受けるため、細骨材の表面水率管理に単独で用いるのは困難であった。そこで同方式センサを用いたオフライン型簡易水分計により、簡単な操作で試料の充填状態を一定とする採取方法を検討し、次いで塩化物量とセンサ出力の相関性を各種細骨材について調査した。その結果、簡便な操作で高精度の測定が可能な試料採取方式が得られ、また塩化物量とセンサ出力の間に高い相関性の成り立つことが明らかになった。

キーワード：細骨材、表面水率、マイクロ波、塩化物量、誘電率

1. はじめに

細骨材の表面水率管理方法として、連続的な測定の可能なオンライン型水分計の利用が近年増加傾向にある。これらオンライン型水分計にはいくつかの形式があるが¹⁾、その中で水分によるマイクロ波の吸収を利用した「マイクロ波センサ式水分計」は、最も普及している形式のひとつである。しかし同水分計には、貯蔵ビン内の砂の充填状態が一定でない場合に誤差を生じやすいという課題がある^{2) 3)}。貯蔵ビン内の砂の状態が測定値に影響を与えるのは多くの形式の水分計に共通の課題であり、その結果細骨材表面水率の管理は試験室におけるJIS A 1111等に規定された測定により実施され、オンライン型水分計による測定値は参考値として用いられるにとどまっている例が少なくない。

一方、高強度コンクリートや高流動コンクリートの普及により、コンクリート製造現場における厳密な単位水量管理の必要性が高まりつつある^{4) 5) 6) 7)}。そのため、測定にやや時間がかかるうえ操作にある程度の熟練を要し、測定頻度

に限界のあるJIS法だけでは、刻々と変化する細骨材表面水率の十分な管理が困難になりつつある。このような現状から、簡便で高精度の測定が可能な水分計の開発が望まれている。

これらの要望に応じて開発されたのがマイクロ波センサ式オフライン型水分計であるが、その出力特性はオンライン型水分計と同様に砂の品質や塩化物量の影響を受けることが知られている⁷⁾。本研究は、マイクロ波式水分センサの、試料充填状態および塩化物量に対する応答特性について検討し、より高い測定精度を得られる測定法の確立を目的としたものである。

2. 試験概要

2.1 試験装置

試験には、マイクロ波センサ式オフライン型簡易水分計（以下「簡易水分計」と称する）を用いた。同水分計は水分によるマイクロ波の吸収を利用したもので、試料の水分含有率により変化する誘電率の違いをマイクロ波の減衰により検出するものである。

*1 日工電子工業(株) 開発部 (正会員)

*2 (株)クレオ テクノサポート事業部 取締役事業部長

*3 晴海小野田レミコン(株) 工場次長

*4 (株)クレオ テクノサポート事業部 (正会員)

誘電体にマイクロ波を照射すると、誘電損失と呼ばれる現象によりマイクロ波のエネルギーが熱エネルギーに変換される。誘電損失の大きさすなわちマイクロ波の減衰量は照射対象物の物性により異なり、次式で与えられる⁸⁾。

$$P = 2 \pi f E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \quad (1)$$

ここで、 P : 加熱電力密度 (W/m^3)

f : マイクロ波周波数 (Hz)

E : マイクロ波の電界強度 (V/m)

ϵ_0 : 真空中の誘電率

ϵ_r : 被照射物の比誘電率

$\tan \delta$: 被照射物の誘電正接

照射するマイクロ波の周波数および出力を一定とすれば、 f 、 E は定数となるため、被照射物の発熱量すなわちマイクロ波吸収量は、被照射物に固体の物性値である $\epsilon_r \tan \delta$ に比例する。

コンクリートのような固体の空隙の含水率と誘電率の間には一次関数的な相関の成り立つことが知られており⁹⁾、充填状態が同等であれば、細骨材の含水率または表面水率についても同様な相関が成り立つものと考えられる。そのため試料の表面水率の変化によりセンサ出力は直線的に変化し、その相関は最小二乗法による一次回帰計算で容易に求められる。この作動原理はオンライン型のマイクロ波センサ式水分計についても同様である。

なお、ここで言う「マイクロ波」とは、周波数が300MHzから30000MHzまでの電磁波を指す。マイクロ波のうちレーダ、情報伝達以外の用途に用いる周波数帯が電波法により定められており、簡易水分計はこのうちのUHF帯域の電波(数百MHz～数千MHz)を用いたものである。

2.2 試験材料

試験には山砂と砕砂を各2種類づつ用いた。山砂はともに千葉県市原市万田野産で、粒度分布が異なる。砕砂はいずれも粗目砂で、岩質はチャートおよび石灰岩である。使用した細骨材の粗粒率(FM)および表乾比重を表-1に示す。

塩化物量による評価試験は海砂を想定したため、添加する塩化物は未精製塩とした。使用し

た未精製塩は塩化ナトリウムを主成分とし、微量の「にがり」と5～7%の水分を含んでいる。

表-1 試験用細骨材の品質

細骨材の種類	粗粒率	表乾比重
細目山砂	2.30	2.57
粗目山砂	2.70	2.59
チャート質砕砂	3.35	2.63
石灰岩質砕砂	3.53	2.66

2.3 試験方法

(1) 試験採取方法の影響評価(試験1)

試料採取・充填方法による影響を評価する試験には、準備した細骨材のうちの細目山砂を用いた。表面水率を約2、4、6、8%に調整した試料を準備し、センサ出力の測定を各水準20回づつ、計80回行った。また、各水準の正確な表面水率は、センサ出力の測定と同時にJIS A 1111に定められた質量法により測定した。

評価する試料採取方法は以下の2種類とした。

①試料の表乾比重と測定容器の容量から予め決定した質量の試料を測定容器に採取し、試料表面をへら等で平滑にする方法。以下この方法を「質量法」と称する。マイクロ波式センサは、マイクロ波の到達する領域に存在する水分の量により出力が異なることが予想され、同方式は試料の「量」を一定に保つことを主眼を置いた採取方法である。

②試料を測定容器に山盛りに投入し、一定の振動を加えてから容器の上面高さに合わせてストレータエッジで試料をかき取る方法。以下この方法を「容積法」と称する。本試験では簡略化のためプラスチックハンマで容器を4方向から3回づつ計12回軽く叩いて振動を加えたが、フローテーブル(JIS R 5201)等を用いて標準化すれば、試験担当者の違いによる誤差の縮小に有効であろう。マイクロ波式センサは試料の充填状態により出力が変動することが知られており、同方式は試料の「充填状態」を一定に保

つことに主眼を置いた採取方法であると言える。

試料を入れた測定容器は簡易水分計の所定位置にセットし、その上からマイクロ波センサを一定位置まで押し下げて挿入接触させ、センサの出力電圧を読み取る。

(2) 塩化物量による影響評価 (試験 2)

表-1 に示した 4 種の細骨材に未精製塩を添加し、添加量によるマイクロ波式センサの出力特性の変化を評価した。試験条件は以下のとおりである。

① 塩化物量は 0%, 0.025%, 0.050%, 0.075% の 4 水準を基準としたが、未精製塩が数% の水分を含むため、実際の塩化物量の試料調整時の未精製塩の含水率により補正して求めた。

② 表面水率の水準は山砂では約 2.5%, 5.0%, 7.5%, 10.0% の 4 水準とした。しかし粗目の砕砂は保水力が乏しいため、やや低めに設定し、約 2.0%, 4.0%, 6.0%, 8.0% の 4 水準とした。

③ 測定回数は表面水率 1 水準あたり 10 回、すなわち同一砂・同一塩化物量の 1 試料あたり 40 回とした。

④ 試料採取方法は、「試験 1」の解析結果を基に精度の高い方法を検討するものとした。

3. 実験結果および考察

3.1 試料採取方法の影響

(1) 「質量法」と「容積法」の比較評価

試料採取方法の影響を評価するために採用した「質量法」、「容積法」いずれの採取法についても、試料の表面水率とセンサ出力の間には極めて高い相関が成り立つ。「容積法」の測定結果を表-2 に、「質量法」の測定結果を表-3 にそれぞれ示す。また、両採取法による測定の一次回帰計算結果を図-1 に示す。

一次回帰の相関係数 (r) の値は、質量法で 0.992、容積法では 0.991 といずれも高く、また採取法による差も見られない。しかし各採取法の測定結果を詳細に見てみると、それぞれの方法がなお問題点を内包していることがわかる。

「容積法」では採取試料の質量を一定として

表-2 「容積法」測定結果

表面水率 (%)	センサ出力 (mV)		変動係数 (%)
	分散幅	平均幅	
1. 7	393~405	3 9 2	1. 8 1
3. 2	436~469	4 5 2	1. 7 4
6. 8	581~665	6 0 9	3. 3 7
8. 9	666~748	7 0 8	3. 1 5

表-3 「質量法」測定結果

表面水率 (%)	センサ出力 (mV)		変動係数 (%)
	分散幅	平均幅	
1. 7	393~415	4 0 3	1. 7 6
3. 2	437~466	4 5 0	1. 6 9
6. 8	580~613	5 9 8	1. 5 7
8. 9	624~708	6 7 8	3. 1 7

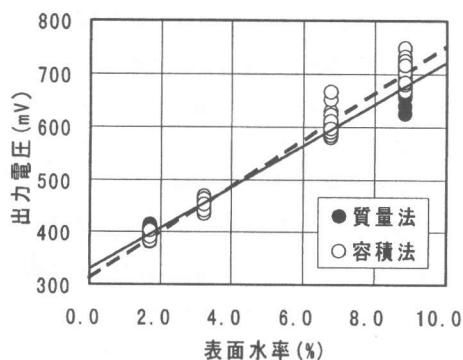


図-1 「試験 1」測定の一重回帰計算結果

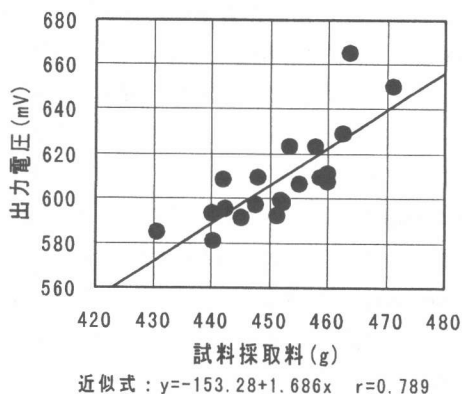


図-2 「容積法」試料採取量とセンサ出力の相関例

いないため、採取量の変動が測定誤差に直結する恐れがある。表-2から、表面水率の高い水準でセンサ出力の変動係数が大きくなっているのが見て取れるが、これには試料採取量の変動の関与が大きい。一例として表面水率6.8%の水準における「容積法」の試料採取量とセンサ出力の関係を見ると、図-2に示したとおり試料採取量とセンサ出力の間には明らかな正の相関があり、一次回帰計算による相関係数0.789と比較的強い相関の存在を示している。

「質量法」の場合には、試料採取量の変動が誤差発生の原因となる恐れはないが、試料の充填状態すなわち嵩を一定に保つ方策が取られていないことで誤差の発生する恐れがある。表-3によれば、表面水率6.8%以下の水準ではセンサ出力の変動係数は1.57~1.76と安定しているが、表面水率8.9%の水準では3.17と増大している。これは、試験の際にこの水準のみ測定者が交替したため、試料をへらでならす際の「くせ」によるばらつきが出たものと思われる。

(2) 試料採取方法の再検討

「試験1」の結果から、質量法は試料充填状態の変化により、また容積法は試料採取量の変化により測定誤差の発生する恐れのあることが判明した。また質量法では、測定時の試料面に凸凹や傾斜が残るのも問題であった。

そこで、これら課題を解決する手法として試料高さ調整用の治具を用いる方法を考案した。すなわち、予め定めた質量の試料を測定容器に採取し、一定の厚みを持つ蓋（試料高さ調整器）で加圧することにより、試料の容積を一定化する。この結果、測定誤差発生の大きな要因であった「試料採取量の変動」および「試料充填状態の変動」を抑えることができるため、安定した測定結果が得られるものと考えられる。

図-3は、このようにして定めた採取法により、同一試料を二人の測定者が同時並行測定した結果を比較したものである。回帰線に若干のシフトはあるものの、両測定者の「くせ」の違いによる測定値の誤差は小さく、表面水率の値

に換算して0.3~0.4%程度に抑えられている。また相関係数（ r ）の値も0.997および0.996と極めて高い。この試験結果から、塩化物量の影響評価（試験2）については、この試料採取法を用いるものとした。

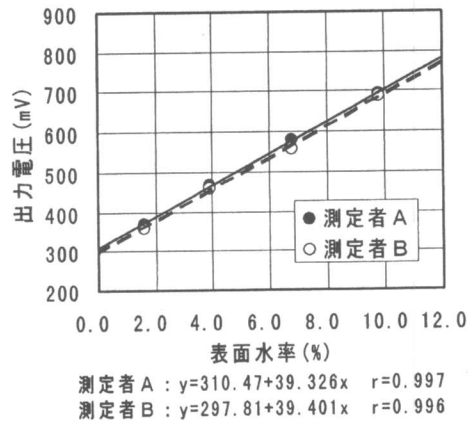


図-3 試料高さ調整治具を用いた採取法による測定結果例

3.2 塩化物量の影響

(1) 塩化物量によるセンサ出力の変動

「試験2」の結果、いずれの砂においても塩化物量の増大によりセンサ出力は大きくなるが、その挙動には砂の品質によらない一般的傾向が見られた。図-4は全く品質の異なる2種の砂、細目山砂と石灰砕砂についての塩化物量とセンサ出力の関係を図示したものである。両者の回帰線は全く異なっているが、塩化物量の増大によりセンサ出力が次第に大きくなる一方、回帰線の傾きはあまり変化しないという挙動は共通である。この挙動は試験に用いた4種の細骨材すべてに共通であった。またこの挙動は他の細骨材を用いた試験⁷⁾の結果とも一致している。

(2) 塩化物量とセンサ出力増大量の相関

塩化物を含む細骨材の表面水率測定を塩化物を含まない細骨材の相関式を用いて行った場合、塩化物の影響によりセンサ出力が増大するため正の誤差が発生する。この誤差の大きさを評価するため、「見掛表面水率シフト量（ $H\delta$ ）」という概念を導入した。ここで言う「見掛表面

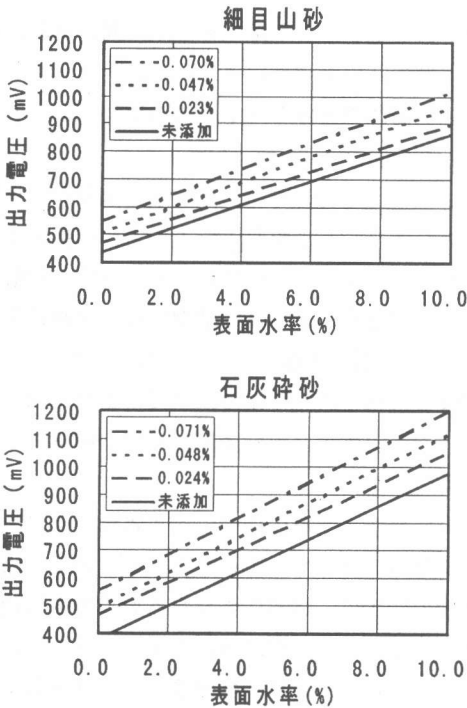
水率（ H_a ）」とは、塩化物を含まない試料で作成した表面水率とセンサ出力の相関式（一次回帰式）を用いて、塩化物を含有する試料の表面水率を計測した場合の「塩化物に起因する誤差を含んだ表面水率測定値」のことである。見掛表面水率（ H_a ）の、真の表面水率（ H_r ）からのシフト量（ $H\delta$ ）は、塩化物未添加試料の表面水率とセンサ出力の一次回帰式と、塩化物を添加した試料の一次回帰式を比較することで、下式により求められる。

$$H\delta = H_a - H_r \tag{2}$$

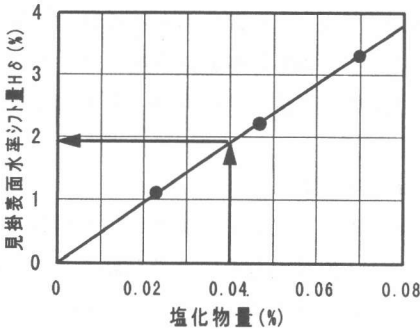
図－５は、粗目山砂の真の表面水率（ H_r ）を6.0%とした場合の、塩化物量と見掛表面水率シフト量（ $H\delta$ ）の関係を示したものである。この図は、たとえば塩化物量0.04%の粗目山砂の表面水率を、塩化物を含まない砂の一次回帰式を用い求めた場合のシフト量は約2.0%，すなわち測定値は6.0+約2.0=約8.0%となることを示している。同図から、塩化物量と見掛表面水率シフト量の間には、明確な比例関係の存在することが推定できる。

表－４は、表面水率を2，4，6，8および10%とした場合の、塩化物量と見掛表面水率シフト量の相関の一次回帰計算結果である。この表から試験に用いた4種の細骨材に共通の傾向として以下のことが見てとれる。

- ①いずれの場合も相関係数（ r ）は十分大きく、両者の相関は一次関数で近似できる。
- ②回帰線の傾きは、真の表面水率（ H_r ）が大きくなるにしたがって増加傾向にある。
- ③回帰式の切片はいずれも0前後である。すなわち回帰線はいずれも原点近傍を通る直線である。



図－４ 表面水率とセンサ出力の相関の塩化物量による変化



図－５ 塩化物量と見掛表面水率シフト量の一次回帰計算結果例

表－４ 塩化物と見掛表面水率シフト量の一次回帰計算結果

表面水率 %	細目山砂				粗目山砂				石灰岩質砕砂				チャート質砕砂			
	一次回帰式		相関関数		一次回帰式		相関関数		一次回帰式		相関関数		一次回帰式		相関関数	
	傾き	切片			傾き	切片			傾き	切片			傾き	切片		
2	41.247	-0.051	0.997		37.935	0.077	0.997		41.765	0.154	0.988		59.771	0.021	0.999	
4	44.387	-0.083	0.996		42.581	0.035	≒1*		44.538	0.125	0.993		62.810	0.069	0.999	
6	47.441	-0.112	0.995		47.312	-0.005	≒1*		47.353	0.097	0.996		66.015	0.116	0.998	
8	50.538	-0.145	0.994		51.957	-0.047	0.998		50.252	0.066	0.998		69.053	0.164	0.996	
10	53.634	-0.173	0.993		56.559	-0.085	0.999		52.983	0.036	0.999		72.300	0.207	0.994	

*粗目山砂の表面水率4%および6%の相関係数 r は、小数点以下第四位の四捨五入により 1 となる。

あり、 H_r の大きさにかかわらず、塩化物量と見掛表面水率シフト量(H_δ)の間には、ほぼ正比例の関係が成り立っている。

(3) 塩化物量とセンサ出力の相関性についての考察

塩化物量と見掛表面水率シフト量の間に比例関係が成立する理由を、以下のように推定する。

式(1)より、誘電体のマイクロ波を照射した際の減衰量(P)は、被照射体の比誘電率(ϵ_r)と誘電正接($\tan \delta$)の積に比例する。電解質溶液の誘電率は溶液濃度により比例するが、その変化量は溶液濃度と密接に関係すると考えられる。

表面水率が一定の場合、一定質量の試料中に含まれる水分量も一定となる。したがって塩化物量の変化は、試料に含まれる塩化物水溶液濃度の変化となって現れる。塩化物水溶液における ϵ_r と $\tan \delta$ の積が溶液濃度と一次関数的相関を持つのであれば、細骨材の塩化物含有量とマイクロ波吸収量すなわち式(1)における加熱電力密度(P)との間にも一次関数的相関が成り立つものと考えられ、塩化物濃度と見掛表面水率(H_a)の間にも一次関数的相関が成り立つ、すなわち見掛表面水率シフト量(H_δ)が塩化物含有量に比例するものと思われる。

4. まとめ

マイクロ波式水分センサの出力特性を調査するため、簡易水分計による試験を実施した。その結果は、次のようにまとめられる。

①マイクロ波式水分センサは、測定試料との挿入接触により水分量を検出しているため、簡易水分計の測定では試料の充填状態が測定精度に大きく影響する。充填状態を一定にするために、試料採取量を計量し、試料高さ調整器を用いて充填状態を一定にする試料採取方法を考案した結果、測定精度の向上が可能となった。

②簡易水分計は迅速でかつ正確な測定が可能なため、JIS法と簡易水分計の測定値との相関関係を正確に把握し、定期的に検量線を校正

することによって、JIS A 1111等による試験室における細骨材表面水率測定法の簡易法として十分に使用可能になると思われる。

③細骨材の塩化物含有量はマイクロ波式センサの出力に大きく影響するが、塩化物量が一定であれば、表面水率とセンサ出力の間の一次関数的相関は失われない。また塩化物の影響の程度は塩化物含有量に比例する。

【謝辞】本研究を行うにあたり、晴海小野田レミコン㈱の清原取締役工場長ならびに品質管理課の各位、㈱クレオ、テクノサポート事業部の山根課長、菊池主管、日工電子工業㈱の宮崎代表取締役社長、吉田取締役エンジニアリング開発部長のほか多くの方々に多大なご協力を戴きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 全生工組連新技術開発委員会：表面水自動測定装置に関する調査報告書，第5回生コン技術大会研究発表論文集，pp. 219-224，1989. 6
- 2) 辻本一志ほか：細骨材の自動表面測定装置の開発，第8回生コン技術大会研究発表論文集，pp. 145-148，1995. 6
- 3) 阿部淳一・小山明：表面水率変動への対応，月刊生コンクリート，Vol. 10，No. 11，pp. 170-172，1991. 11
- 4) 日本建築学会：高性能AE減水剤コンクリートの調合・製造および施工指針(案)同解説，1992. 6
- 5) 土木学会：高性能AE減水剤を用いたコンクリートの施工指針(案)，1993. 7
- 6) 全生工組連新技術開発委員会：単位水量低減対策における高性能AE減水剤の使用実験報告，第5回生コン技術大会研究発表論文集，pp. 225-230，1989. 6
- 7) 清原耕作ほか：簡易水分計の細骨材表面水率測定への適用，第9回生コン技術大会研究発表論文集，pp. 213-218，1997. 6
- 8) 森本雅之ほか：産業用マイクロ波加熱装置，三菱重工技報，Vol. 31-6，pp. 396-399，1994. 11
- 9) Halabe, U. B., Sotoodchnia, A., Maser, K. R. and Kausel, E. A.: Modeling the electromagnetic properties of concrete, ACI Materials Journal, Vol. 90, No. 6, pp. 552-563, 1993