

論文 細骨材の表乾状態判定へのマイクロ波式水分センサの応答特性に関する基礎研究

鬼頭昌之*1・田代利明*2・茂木仁一*3・広中久雄*4

要旨: コンクリート用細骨材の表面乾燥飽水状態（表乾状態）判定へのマイクロ波式水分計の適用を目的として、マイクロ波式水分センサの表乾状態近傍の細骨材に対する応答特性を調査した。その結果、表面水率とセンサ出力の相関は骨材品質により差があるものの、含水率とセンサ出力の相関線は表乾状態近傍で屈曲し、また気乾領域では絶乾状態に近づくほどセンサ出力の変化率が大きくなる、湿潤領域では測定試料中の表面水量とセンサ出力の相関はほとんどの骨材で同等である等の、骨材品質によらない共通点がみとめられた。
キーワード: 細骨材, 表面乾燥飽水状態, マイクロ波, 誘電率, 表面水率, 表面水量

1. はじめに

コンクリートの品質管理には、その製造に用いる骨材の品質を常に把握しておくことが必要である。そのためには骨材の表面乾燥飽水状態（以降「表乾状態」と略す）を正確に判定する必要がある。細骨材の表乾状態判定法としては、フローコーンを用いる方法が日本工業規格（JIS）に規定されているが、同方法は判定者間の個人差が大きいという、角張った粒子形状を持つ砕砂や微粒子を多く含む砂では正確な判定が困難になるという課題があった。そのため過去にも簡便な表乾状態判定法として表面水率の違いによる電気抵抗の差を利用する方法¹⁾、マイクロ波の位相変化を測定する方法²⁾等が考案されているが、まだ実用化には至っていない。

一方、コンクリートプラント用の細骨材表面水率測定装置として、マイクロ波が水分に吸収されて減衰するという特性を利用した「マイクロ波式水分計」が実用化されている。同じ原理を用いて、試験室における表面水率測定用に小型化された「マイクロ波式オフライン型水分計」（以降「簡易水分計」と称する）も市販されており、この装置を用いて比較的容易に正確な表

乾状態判定ができる可能性が示されている³⁾。しかし、マイクロ波式水分計の表乾状態近傍の細骨材に対する応答特性については、まだ十分な検討が実施されたとはいえない。

本報は、湿潤状態から気乾状態に至る細骨材の含水状態の変化と、それに対応するマイクロ波式センサの応答特性変化を複数種の細骨材について測定し、応答特性の骨材品質による相違および共通性について検討したものである。

2. 試験の概要

2.1 簡易水分計の作動原理

マイクロ波式水分計（以降「水分計」と略す）とは、細骨材試料に入射されたマイクロ波の、試料中に含まれる水分による減衰の程度を検出して試料の表面水率を判定する装置である。水分計により表面水率を測定するためには事前に検量線を作成する必要がある、検量線の形態は機種により以下の2系統に大別される⁴⁾。

$$\text{指数関数型: } y = a e^{-bx} \quad (1)$$

$$\text{一次関数型: } y = ax + b \quad (2)$$

ここで x : 水分計のセンサ出力信号

y : 表面水率 (a, b は定数)

*1 ㈱クレオ テクノサポート事業部（正会員）

*2 ㈱クレオ テクノサポート事業部 取締役事業部長

*3 船橋レミコン㈱ 第一工場 取締役工場長

*4 大同建材産業㈱ 取締役統括技術部長（正会員）

媒体（試料）に吸収されたマイクロ波は熱として放出されるが、その放出量すなわちマイクロ波の減衰量 P は、次式により与えられる⁵⁾。

$$P = 2\pi f E^2 \varepsilon_0 \varepsilon \tan \delta \quad (3)$$

ここで P : 加熱電力密度 (W/m^2)

f : マイクロ波の周波数 (Hz)

E : マイクロ波の電界強度 (V/m)

ε_0 : 真空中の誘電率 ($8.85 \times 10^{-12} F/m$)

ε : 媒体の比誘電率

$\tan \delta$: 媒体の誘電正接

誘電正接 $\tan \delta$ は、媒体の誘電率を複素誘電率

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (4)$$

で表した場合の虚数項と実数項の比であり、次式のように表せる。

$$\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (5)$$

媒体に入射したマイクロ波は、媒体内部を通過するにつれて次第に減衰する。媒体内部を距離 d だけ通過したマイクロ波の強度 E は、距離の指数関数として次式で求められる。

$$E = E_0 e^{-kd} \quad (6)$$

ここで E_0 : マイクロ波の初期強度 (V/m)

d : マイクロ波の通過距離 (m)

k は減衰係数 (attenuation coefficient) と呼ばれ、入射マイクロ波の周波数、媒体の誘電率および透磁率により定まる係数である。数%程度の表面水を持つ細骨材など誘電正接 $\tan \delta$ の値が十分小さい媒体では、減衰係数 k の値は以下の式で求められる⁶⁾。

$$k = \{(\omega \varepsilon_0 \varepsilon'')/2\} \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0 \varepsilon'} \quad (7)$$

ここで ω : マイクロ波の角周波数 (rad/s)

μ_0 : 真空中の透磁率 ($4\pi \times 10^{-7} H/m$)

Halabe⁶⁾ は、硬化コンクリートの空隙率 ϕ および空隙の水による充填率 S (全空隙に対する空隙中の水の容積比。以降「水充填率」と略す) と誘電特性の相関をモデリングにより解析し、減衰係数 k の値と水充填率 S の間に一次関数的相関が成り立ち、さらに実際のコンクリート、湿った砂および砂と砂利の混合物について、実測値が計算値とよく一致することを確認している。プラントに設置された水分計においては

通過距離 d は一定と考えられるため、試料の充填状態が一定であれば減衰係数 k と表面水率の間には一次関数的相関が成り立つ。したがって減衰後のマイクロ波の強度 E は表面水率の指数関数と考えることができる。この関係をそのまま検量線として用いるのが指数関数型の近似式 (式(1)) を用いる方式、 k について解いた式により検量線を作成するのが一次関数型近似式 (式(2)) を用いる方式と考えることができる。簡易水分計は後者の方式を採用している。

2.2 試験材料

試験材料は、粒度および吸水率により以下の3グループに区分した。

- ①粗粒率(FM)が大きく、吸水率は比較的小さい (グループA)
- ②粗粒率・吸水率とも中庸 (グループB)
- ③粗粒率は小さく、吸水率が比較的大きい (グループC)
- ④吸水率が極端に大きい (グループD)

グループA～Cについては各2種ずつ、グループDについては1種類の材料を用いた。試験に用いた材料の品質を表-1に示す。

2.3 試験手順

試験材料は、十分に吸水していることが確実なものを除き、一昼夜水中に沈めて吸水させた後、表面水率が数%の領域となるよう調整した。試料総量は試験1回あたり5kgとし、この試料を気温 $20 \pm 2^\circ C$ 、相対湿度 $50 \pm 10\%$ に調整した室内に広げ、小型扇風機で送風しつつ乾燥させた。試料は所定時間毎に攪拌し、一部を採取して簡易水分計によりマイクロ波センサの出力信

表-1. 試験材料の品質

記号	種別	粗粒率	吸水率 (%)	表乾密度
A1	チャート砕砂	3.05	1.68	2.62
A2	石灰砕砂	3.01	1.10	2.69
B1	中目山砂	2.30	2.34	2.55
B2	中目山砂	2.46	1.80	2.62
C1	細目山砂	1.53	3.66	2.53
C2	細目陸砂	1.82	3.95	2.62
D1	大谷石粉	2.46*	21.1*	1.93*

*大谷石粉の値は暫定値 (後述)

号値を測定後、JIS A 1111「細骨材の表面水率試験方法」の質量法により表面水率を測定した。

簡易水分計による測定時の試料採取は、予め定めた質量により採取した試料の容積を、専用治具を用いて約 229cm^3 （ $\phi 90 \times H 36\text{mm}$ ）に加圧して一定化する方法⁷⁾によった。最適採取量は密度や粒度分布、粒子形状等により異なり、また一般に気乾状態の砂は濡れた砂に比べて密に充填し易いため、事前に 110°C の乾燥炉中で絶乾状態とした後放冷した試料が加圧前の状態でほぼ所定容積となる量を基準に採取量を定めた。

センサ出力および表面水率の測定は、表面水率の計算値が負の値すなわち試料が気乾状態となった後も継続し、常温乾燥で試料の含水状態が変化しなくなった時点で終了とした。試験は1材料あたり2回実施した。なお、試料を広げる面積は新聞紙2枚大（約 $75 \times 100\text{cm}$ ）、測定間隔は30分を標準としたが、試料の初期表面水率、乾燥速度および残量により適宜調整した。

3. 試験結果および考察

3.1 表面水率／センサ出力相関線の形状

試験結果の一例として、試験材料C1（細目山砂）の相関線を図-1に示す。同図から、相関線は表乾状態を境にして異なった形状を示していることが判る。

表面水を持つ領域（以降「湿潤領域」と称する）では、表面水率とセンサ出力はほぼ一次関数的な相関を示す。しかし厳密には、近似線は僅かながら上に凸の曲線状となっている（この理由は次節で述べる）。近似線はほぼ表乾状態の点で屈曲し、表乾状態よりも乾いた領域（以降「気乾領域」と称する）では、傾きがやや小さくなる。そしてさらに乾燥が進むと、相関線の傾きは次第に大きくなる傾向を示す。

図-2に、試験材料A1、B1およびC1の相関線を併せて示す。同図より、湿潤領域における傾き、気乾領域における傾き変化の程度等は材料により多少異なるが、いずれの材料の相関線もみな似通った形状を示していることが判る。

3.2 湿潤領域の相関線の解析

(1) 空隙の水による充填率との相関

Halabeらの解析⁶⁾によれば、試料の空隙率 ϕ が一定であれば、減衰係数 k と水充填率 S の間には一次関数的相関が成り立つ。しかし簡易水分計の測定では採取する砂の質量を表面水率に関係なく一定としているため、表面水率の高い試料ほど砂（表乾状態換算）の絶対容積は小さくなり、空隙率 ϕ が大きくなる。したがって今回の試験結果とHalabeらの解析との整合性を確認するためには、試料の表面水率を水充填率 S に換算して比較する必要がある。

簡易水分計の測定試料は採取質量が既知であるため、表面水率の測定値から表乾状態に換算した質量が得られ、この値と表乾密度から表乾砂の絶対容積が求められる。よって試料の総容

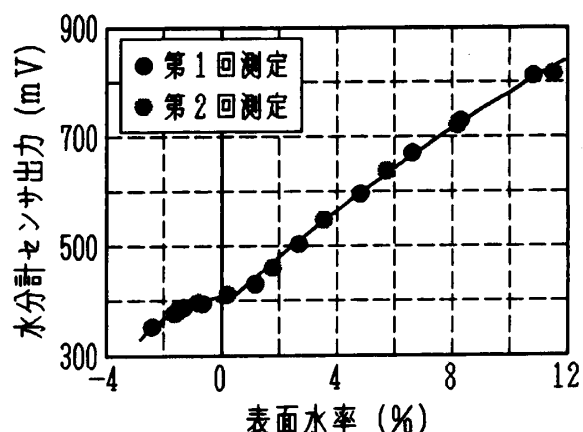


図-1. 材料C1の表面水率／センサ出力相関線

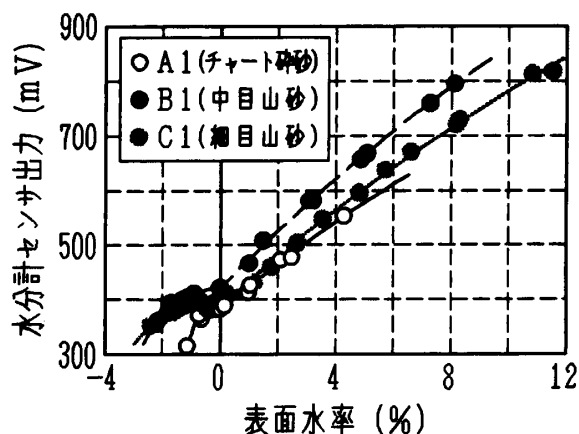


図-2. 各種材料の相関線比較

積（約229cm³）から空隙容積が、さらに表面水率から試料中の表面水量が求められるため水充填率Sの算出が可能となる。試験材料C1の湿潤領域について、表面水率を水充填率Sに換算して実施した一次近似計算結果を図-3に示す。同図から、水充填率Sと水分計センサ出力の間には明らかに一次関数的相関が成り立っていることが判る。試験材料D1（大谷石粉末）を除く全材料について同様の解析を実施した結果を表-2に示す。いずれの材料についても近似式の相関係数rは0.99を超える値を示しており、極めて強い相関の成り立っていることが判る。

(2) 各材料近似線の類似性

湿潤領域にある測定試料は、表乾状態の砂、表面水および空隙（空気）の3成分により構成されている。式(7)より、試料に照射されるマイクロ波の周波数が一定の場合、減衰係数kは試料の比誘電率 ϵ' および ϵ'' により決まる。簡易水分計で用いるUHF帯域（約0.3～3GHz）の電磁波に対する常温の水の複素比誘電率の実数部 ϵ' の値は約81（20℃）であり、この値は乾燥岩石（約4～8）および空気（約1）に比べてかなり大きい⁶⁾。また岩石や空気の複素比誘電率の虚数部 ϵ'' は実数部に比べて極めて小さい。したがって湿潤領域にある砂の減衰係数kの値は、実質的にほぼ試料内の表面水の存在量により決まるものと予測することができる。

図-4は、材料D1を除く全材料について採取試料中の表面水量とセンサ出力との相関を示したものである。同図から、全材料について表面水量とセンサ出力の間にはほぼ同一の相関関係が成り立つことが判る。相関係数rも約0.98と高い値を示している。

3.3 気乾領域の相関線の形状

前節で示したとおり、材料D1を除く全試験材料の湿潤領域におけるセンサ出力は測定試料中の表面水量に依存する傾向がある。気乾領域においてもセンサ出力は含水量の変化により変動するが、湿潤領域のような細骨材の品質によらない共通の特性はみられない。たとえば表-2

に示した近似式の切片bは表乾状態におけるセンサ出力に対応するが、この値と各材料の吸水率の間には明確な相関はみられない。

誘電体の減衰係数kは、導電率と密接な関係がある。誘電導電率(dielectric conductivity) σ は、電磁波の周波数および誘電率を用いて以下の式で表される⁶⁾。

$$\sigma = \omega \epsilon'' \epsilon_0 \quad (8)$$

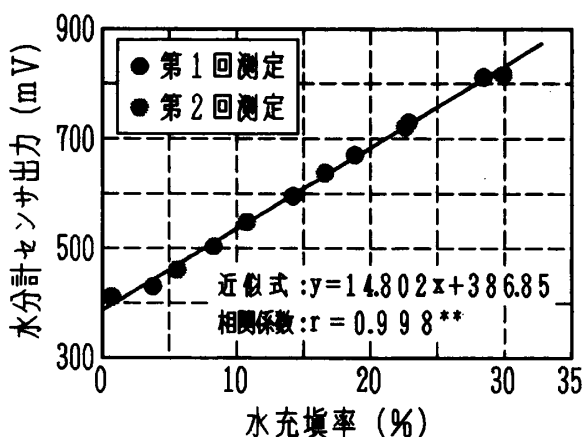


図-3. 材料C1の水充填率とセンサ出力の相関

表-2. 各材料の水充填率とセンサ出力の相関

記号	種別	近似式 $y=ax+b$		相関係数
		a	b	
A1	チャート砕砂	1314.9	382.34	0.993**
A2	石灰砕砂	1168.9	425.57	0.992**
B1	中目山砂	1481.6	420.56	0.999**
B2	中目山砂	1376.1	435.35	0.995**
C1	細目山砂	1480.2	386.85	0.998**
C2	細目陸砂	1833.1	412.66	0.998**

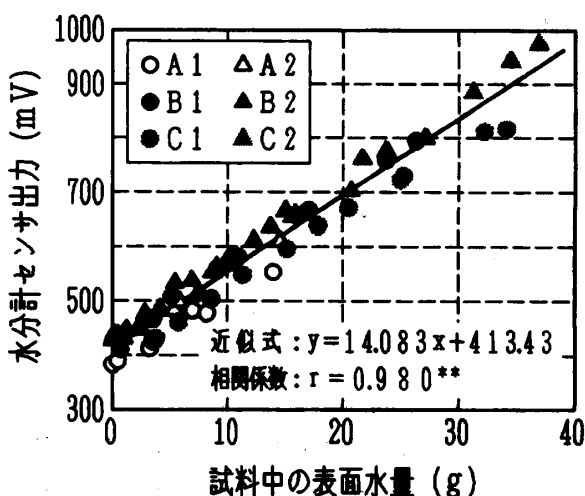


図-4. 試料中の表面水量とセンサ出力の相関

式(7)および式(8)より、減衰係数 k は以下の式で表すことができる。

$$k = (\sigma/2) \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0 \varepsilon'} \quad (9)$$

細骨材粒子の微細気孔の形状は骨材の品質により異なり、吸水量が同一であっても骨材の導電性は必ずしも同等とはならないと考えられる。また気乾領域では試料の含水量がごく少ないため、骨材の岩質による誘電率の違いが大きく寄与する可能性も考えられる。絶乾状態に近づくにつれてセンサ出力の変化率が次第に大きくなるという各材料に共通の現象については、含水率がある程度以下になると細骨材粒子の導電性が急激に低下することによって考えられる。

3.4 相関線屈曲位置の比較

試験材料D1を除く材料について、表面水率／センサ出力相関線はいずれも表乾状態近傍で屈曲している。これは砂の含水率と誘電率の相関関係が湿潤領域と気乾領域では異なるためと考えられ、副素比誘電率の実数項 ε' の関数として表される誘電体中のマイクロ波伝播速度について、同様の関係の存在が報告されている²⁾。すなわち含水率と比誘電率の相関は表乾状態の点で変化しており、この結果比誘電率 ε' および ε'' の関数として表される減衰係数 k との相関にも「屈曲」が生ずるものと考えられる。

水充填率とセンサ出力の相関から推定した湿潤領域の近似線と、気乾領域のうち表乾状態に近い測定点による一次回帰線の、交点から推定した屈曲点の座標を表-3に示す。同表より以下のような点が見て取れる。

- ①グループAおよびBの材料では、屈曲点の座標はほぼ表乾状態の点にある。
- ②グループCの材料では、屈曲点が約0.4～0.5%だけ湿潤領域にずれている。そのため屈曲点のセンサ出力も表-2に示した切片の値よりやや大きくなっている。

グループCで屈曲点が湿潤領域にずれた原因については今後の検討を要するが、これらの材料は粒径が小さく微細粒子の比率も他の材料に比較して多いため、フローコーンを用いた表乾

状態判定法(JIS法)の誤差が大きくなった可能性も考えられる。すなわち、本試験のような方法で湿潤領域から気乾領域にわたるセンサ出力の変化を測定することにより、JIS法による表乾状態の判定が困難な試料についても正確な表乾状態の判定ができる可能性がある。この場合、水分計による判定結果から表乾密度を算出することで、JIS法による表乾状態判定を実施していない試料についても簡易水分計で用いる検量線を作成することも可能となる。

3.5 大谷石粉末のセンサ応答特性

試験材料D1(大谷石粉末)については、他の材料とマイクロ波式センサの応答特性がかなり異なるため、ここで別途解析結果を述べる。材料D1の表面水率とセンサ出力の相関を図-5に示す。同図から以下のような点が見て取れる。

- ①相関線の全体的な形状は他の材料に類似する。すなわち表面水率の高い領域では表面水の減少に伴いセンサ出力は直線的に低下するが、相関線が屈曲して傾きが急に小さくなる点が存在する。また絶乾状態に近い領域ではセンサ出力の低下率が大きくなる。

表-3. 各材料近似線の「屈曲点」座標

記号	種別	表面水率 x	センサ出力 y
A1	チャート砕砂	0.051	383.9
A2	石灰砕砂	-0.014	424.9
B1	中目山砂	0.048	424.4
B2	中目山砂	0.019	436.4
C1	細目山砂	0.515	411.3
C2	細目陸砂	0.446	436.4

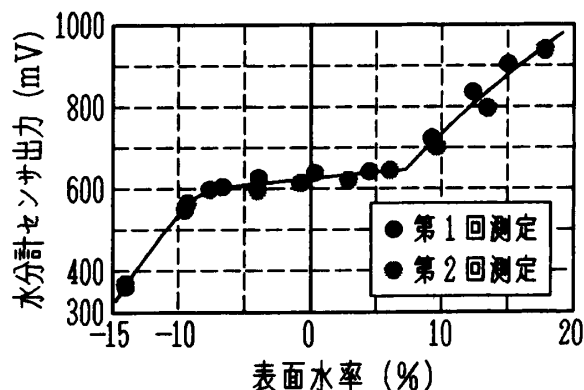


図-5. 材料D1の表面水率／センサ出力相関線

②相関線の屈曲点がほぼ表乾状態にある他の材料とは異なり、表面水率のかなり高い領域（約7%）にある。

③表乾状態のセンサ出力は約630mVあり、他の材料に比べ約1.5倍と大きい。

材料D1はコンクリート用細骨材として粒度調整されておらず、微細粒子を多量に含んでいる。微細粒子はひじょうに凝集しやすく、湿潤領域では水の表面張力により、気乾領域では静電氣的な力により凝集して顆粒状となる。また乾燥炉中で絶乾状態とした試料では凝集粒子が軽く焼き固められた状態となるため、正確な粒度分布の測定も困難である。このような特性から、相関線の屈曲点が湿潤領域に大きくシフトした理由は以下のいずれかであると想像される。

①水の表面張力により凝集した微細粒子の塊が、空隙率の大きい単独粒子と同様の挙動を示した。すなわち、表面水率が約7%の点で疑似「表乾状態」となった。

②気乾状態の微細粒子が静電気力で凝集するため、表乾状態を過ぎても試料がスランプせず、事前にJIS法により判定した「表乾状態」が気乾領域に大きくずれていた。

また、表乾状態におけるセンサ出力が他の材料に比べて大きいのは、吸水率が約20%と極めて大きいため、水分による誘電率の増大が他の材料に比べて大きいためと考えられる。

4. まとめ

簡易水分計の細骨材表乾状態判定への適用性を確認するため、湿潤領域から気乾領域に至る表面水率とマイクロ波式センサ出力の相関を各種細骨材について比較検討した。その結果、以下のような知見が得られた。

①表面水率とセンサ出力の相関線は1本の滑らかな線とはならず、表乾状態近傍で屈曲する。したがって湿潤領域から気乾領域にかけての相関の調査により屈曲点から表乾状態を判定し、細骨材の表乾密度も算出できる可能性がある。その結果、誤差が出や

すいと言われるフローコーンによる方法を用いずに、細骨材の表乾判定および密度測定が簡便・正確に実施できる可能性がある。

②コンクリート用普通細骨材の品質規格に適合する砂においては、測定試料中の表面水量とセンサ出力の相関に試料の品質によらない一定の規則性がみられる。このことは、マイクロ波式水分計により、コンクリートの生産現場で現在実施されている以上に簡便・迅速な細骨材表面水率判定が実施できる可能性があることを示している。

③軽量骨材等の吸水率の大きな細骨材についてはなお検討の余地があるが、粒度構成が適切であれば、普通骨材と同様に表乾状態を正確に判定できる可能性がある。

〔謝辞〕 本試験を実施するにあたり、船橋レミコン(株)の伊藤技術課長ならびに技術課の各位、(株)クレオ・テクノサポート事業部の斎藤主管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) 上野 敦・永田 亘・国府勝郎：細骨材の表乾判定方法に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.423-428，1996.6
- 2) 鈴木一雄・伊藤康司・篠崎幸彦：高周波位相式簡易水分計の開発，第7回生コン技術大会研究発表論文集，pp.247-250，1993.6
- 3) 茂木仁一・田代利明・鬼頭昌之：細骨材の表乾状態判定への簡易水分計の適用，第10回生コン技術大会研究発表論文集，1999.4
- 4) 小河洋夫・田代利明・中垣一宏：オンライン型水分計の生コン工場品質管理への適用，第10回生コン技術大会研究発表論文集，1999.4
- 5) 森本雅之・大沼 均・新屋謙治：産業用マイクロ波加熱装置，三菱重工技報，Vol.31，No.6，1994.11
- 6) Halabe, U. B. et al. : Modeling the Electromagnetic Properties of Concrete, ACI Materials Journal, Vol.90, No.6, pp.552-563, Nov./Dec. 1993
- 7) 中垣一宏・田代利明・小河洋夫・鬼頭昌之：マイクロ波式水分センサの特性に対する塩分の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，1998.6