

# 論文 マイクロ波式オフライン水分計のフレッシュコンクリート 単位水量管理への適用

鬼頭昌之\*1・小河洋夫\*2・田代利明\*3・中垣一宏\*4

要旨：コンクリート製造における単位水量管理の一環として、マイクロ波方式センサを用いたオフライン型水分計による細骨材表面水率管理の適用を検討した。同方式のセンサは水分によるマイクロ波の吸収を利用したもので、短時間で比較的高精度の表面水率測定が可能になるものと期待されている。本研究では、種々の表面水率を有する細骨材を用いた試験により、同水分計を用いた単位水量管理がコンクリートの品質安定化に極めて有効な方法になり得ることを確認した。

キーワード：細骨材, 表面水率, 単位水量, 品質管理, マイクロ波

## 1. はじめに

コンクリートの品質管理は、水セメント比および単位水量の管理により強度発現を保証するのが本来の姿である。しかし現実には、骨材の表面水率を連続的かつ正確に把握するのが困難であるため、比較的容易に測定・管理が可能なスランブ値による管理が主流となっている。しかし近年、高性能A E減水剤の普及やコンクリートの高機能化への要求の高まりとともに、高強度コンクリート<sup>1)</sup>、高流動コンクリート<sup>2)</sup>等の単位水量の変動に敏感なコンクリートの需要が高まっており、細骨材の表面水が品質に与える影響は極めて大きくなっている。そのため、細骨材表面水率を迅速・簡便に測定し、生産現場にフィードバックできる表面水率測定法が求められている。

このような要望を満たし得る測定法として、マイクロ波式水分センサを用いたオフライン水分計が開発され、その応答特性についての研究が行われている<sup>3)</sup>。本報告は、同水分計による細骨材表面水率測定、コンクリート単位水量管理への適用を実験により検討したものである。

## 2. 試験概要

### 2.1 配合および使用材料

試験配合は、設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>、スランブ18cmの普通コンクリートを想定して決定した。規準とした配合を表-1に示す。

セメントはJIS R 5210適合の普通ポルトランドセメントを使用した。骨材は岩手県住田町産の碎石2005および千葉県市原市万田野産の山砂を用い、碎石は計量の直前に表面乾燥飽水状態とした。山砂は試験水準に合わせて表面水率を調整し、計量直前にオフライン水分計を用いて表面水率を実測した。試験に用いた粗骨材および細骨材の品質を表-2に示す。また混和剤と

表-1 コンクリートの規準配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
59.1	49.0	172	291	875	950

表-2 骨材の品質

種類	表乾比重	粗粒率	吸水率 (%)	実積率 (%)
粗骨材	2.70	6.57	0.50	60.7
細骨材	2.58	2.61	1.69	-

\*1 (株)クレオ テクノサポート事業部 (正会員)

\*2 晴海小野田レミコン(株) 工場次長

\*3 (株)クレオ テクノサポート事業部 取締役事業部長

\*4 日工電子工業(株) 開発部 (正会員)

してリグニンスルホン酸系 A E 減水剤を用いた。

## 2.2 試験水準

山砂，川砂等がコンクリート製造に用いられる場合，通常は数％程度の表面水を含む状態で使用される<sup>1) 4)</sup>。そこで本試験では，細骨材の表面水率分布範囲を3～8％と設定した。実施した試験の水準を表-3に示す。

試験水準は2つのグループに大別されている。「グループ I」では，規準となる表乾砂を用いた水準のほか，予め表面水率を約3，5，8％に調整した細骨材を用いた水準を設けた。水準記号は目標とした表面水率（0，3，5，8）とし，配合補正の方法により“a”（水分計による測定値どおりに補正），“b”（表面水率を測定値-3％として補正），“c”（表面水率を測定値+2％として補正）の添字を付した。なお，表面水率約5％の水準のみ補正を実施しない水準（水準記号5-d）を追加した。

「グループ II」では，細骨材の表面水率を約3～8％の範囲に収まるように概略調整し，計量直前に水分計により表面水率測定を行った。水準記号は試験実施順に A，B，C，D，E とし，水分計測定値により補正を行った水準にはグループ I と同様に添字“a”を付した。また細骨材の表面水率を一律5％として配合を補正した水準を設定し，こちらには添字“x”を付した。

## 2.3 試験方法および測定項目

1水準（バッチ）あたりの練混ぜ量は35ℓとし，練混ぜ試験には最大練混ぜ容量60ℓの横型二軸強制練りミキサを使用した。計量された材料はミキサ内に全量投入し，その後ミキサを起動して90秒間の混練を実施した。

フレッシュコンクリートの性質としては空気量を JIS A 1128，スランプ値を JIS A 1101 により測定した。スランプ測定の際にはスランプフロー値の測定も実施した。また，圧縮強度試験用としてφ10×20cmの円柱形供試体を各水準9本づつ作製した。強度試験の実施材齢は3日，7日および28日とし，作製した供試体は作製翌日に脱型して試験実施材齢まで標準養生した。

表-3 試験水準

記号	細骨材表面水率 (%)	
	実測値	配合補正值
0-a	(表乾砂)	0.0
3-a	3.0	3.0
3-b	3.0	0.0
3-c	3.0	5.0
5-a	5.6	5.6
5-b	5.6	2.6
5-c	5.6	7.6
5-d	5.6	0.0
8-a	8.0	8.0
8-b	8.0	5.0
8-c	8.0	10.0
A-a	6.2	6.2
A-x	6.2	5.0
B-a	7.2	7.2
B-x	7.2	5.0
C-a	4.3	4.3
C-x	4.3	5.0
D-a	3.4	3.4
D-x	3.4	5.0
E-a	5.3	5.3
E-x	5.3	5.0

表-4 試験細骨材の検量線データ

表面水率 (%)	マイクロ波センサ出力 (mV)	
	分布範囲	平均値
1.6	480～508	493
3.7	563～590	579
5.6	634～672	647
7.7	722～763	741

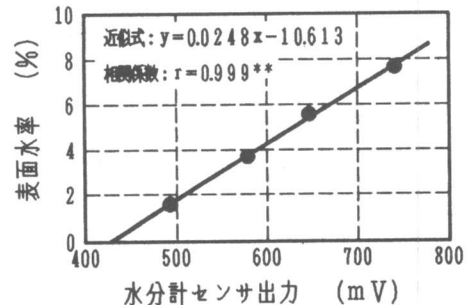


図-1 試験用細骨材の水分センサ検量線

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 検量線の作成

試験に用いたマイクロ波式水分計は水分によるマイクロ波の吸収を利用しており，同方式の水分センサは予め測定する細骨材についての検量線を作成しておく必要がある<sup>5)</sup>。そこで，練

混ぜ試験の前にまず試験に用いる細骨材に対するマイクロ波式水分センサの出力特性を調べた。

マイクロ波式水分センサの出力特性調査には、表面水率既知の数種の試料に対するセンサの出力を調べて検量線を作成するという方法を用いる。試験に用いた水分計には検量線の自動作成機能が付与されているが、今回はセンサの出力値を直読して算出した。測定は1水準あたり10回実施し、検量線の作成には平均値を用いた。

ほとんどの細骨材に対し、試験に用いた水分計のマイクロ波センサの出力は試料の表面水率と一次関数的相関が成り立つことが確かめられている<sup>3)</sup>ため、検量線の算出は最小二乗法により行った。測定結果および検量線算出結果を表-4および図-1に示す。

### 3.2 フレッシュコンクリートの性質

#### (1) 表面水補正によるスランプ安定化

配合補正に用いた細骨材表面水率の値が実際の値と異なっていた場合、単位水量および単位細骨材量が所定の配合から外れ、その結果フレッシュコンクリートの性質、特にスランプ値に変化を与える。表-5に、各水準のフレッシュコンクリートの性質の測定結果を示す。

コンクリート製造の現場においては、単位水量のずれ以外にも多くの要因がスランプ値の変動に関与する<sup>6)</sup>。しかし本研究では規準配合、使用材料、練混ぜ条件などを一定としているため、スランプ値変動の要因は表面水率補正値ずれに起因する単位水量変動が主であり、その他に連行空気量やコンクリートの練上がり温度等の影響を受ける。図-2は、配合補正に用いた細骨材表面水率値を水分計測定値に一致させた水準、すなわち水準記号の添字が“a”である水準について、スランプ値および空気量を比較したものである。水準E-aを除き、スランプ値は規準(水準0-a)の値である19cmに対し±1cmの範囲にある。多くの水準ではスランプ値が水準0-aに比べて小さくなったが、これは連行空気量が0-aに比較して少ないことに起因する可能性が大きい。

表-5 フレッシュコンクリートの性質

記号	スランプ° (cm)	スランプ°フロー (cm×cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
0-a	19.0	29.0×30.0	5.8	16.0
3-a	19.0	31.0×30.5	5.9	17.0
3-b	22.0	39.0×38.0	3.0	16.0
3-c	8.5	23.0×23.0	6.3	17.0
5-a	18.0	30.5×30.5	4.4	17.0
5-b	21.5	44.0×33.5	2.9	17.0
5-c	6.5	20.5×20.5	5.7	17.0
5-d	25.5	53.0×51.0	1.5	17.0
8-a	18.5	28.5×27.5	5.1	17.0
8-b	22.5	42.0×40.5	2.3	17.0
8-c	9.0	22.0×21.0	5.4	17.0
A-a	18.0	30.5×30.5	4.2	17.0
A-x	20.0	33.0×32.5	3.9	18.0
B-a	18.0	27.5×27.5	4.9	17.5
B-x	22.5	40.0×39.5	3.2	17.5
C-a	20.0	34.0×33.5	4.8	16.0
C-x	16.5	29.0×28.5	5.8	16.0
D-a	19.0	34.0×33.5	5.2	16.0
D-x	14.0	26.0×26.0	6.0	16.0
E-a	17.0	28.5×28.0	5.7	16.0
E-x	18.5	31.0×30.5	4.9	17.0

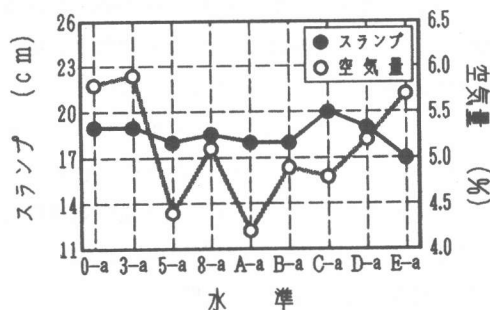


図-2 水分計測定値により水量補正した水準のスランプ値と空気量の比較

#### (2) 補正方法によるスランプ値変動の相違

レディーミクストコンクリート製造プラントやコンクリート製品工場においては、全バッチの細骨材表面水率が計量ビン等に設置された計測装置により計測されている例が多い。しかし、同一配合で大量に混練を行う大規模工事の例<sup>4)</sup>やコンクリート製品工場における管理の例<sup>7)</sup>を別にすれば、表面水率のオンライン計測値は参考データとしてのみ用いられ、実際の配合補正は練上がりコンクリートの目視管理<sup>1)</sup>やミキサ消費電力の解析等によるスランプ値やスランプ

フロー値の管理<sup>2)</sup>で行われている場合が少なくない。その場合、表面水率の計測値に大きな変動がない限り、水量補正值は変更されない。

図-3は、オフライン水分計の表面水率測定結果により単位水量を補正した水準と、同一表面水率の細骨材を用い、表面水率を5%と仮定して水量を補正した水準のスランブ値の変動を比較したものである。生産現場においては前者が全バッチの細骨材表面水率を測定し水量補正する管理方法、後者が平均的な値あるいは始業時の表面水率測定値に固定して管理する手法<sup>1)</sup>に対応する。同図から、水分計測定値により補正した水準では補正值を固定した水準に比べてスランブ値の変動がはるかに小さいことが判る。

本試験では細骨材の表面水率を3~8%の範囲で変動させているが、実際の現場でこれほど大きな変化が短時間で発生するとは考えにくい。しかし複数種の配合、多種多様な混和剤を用いる現場ではスランブ値を変動させる要因が非常に多く、スランブ値により品質を管理する場合、細骨材表面水率の1~2%程度の違いは無視されてしまう恐れがある。そして水量補正值のずれは水セメント比の計画配合からのずれの発生を意味するため、コンクリートの強度発現に影響が発生するのは避けられないものと思われる。

### 3.3 硬化コンクリートの性質

#### (1) 表乾砂使用コンクリートとの比較

各水準の硬化コンクリートの品質を比較するため、標準養生した供試体の圧縮強度を測定した。その結果を表-6に示す。なお、同表中の「補正」値は、フレッシュコンクリート空気量の±1%の変動により圧縮強度は±5%変化するものとし、空気量5.8%を基準として算出した。

本試験では細骨材表面水率を除く骨材の品質、配合、セメントの銘柄・ロット等の条件をすべて統一している。したがって表面水率の測定値が正確であれば、水分計の測定値により水量補正を実施した水準の強度発現特性は同等のはずである。しかし実際には、特に28日材齢において圧縮強度が表乾砂を用いた水準0-aに比べて

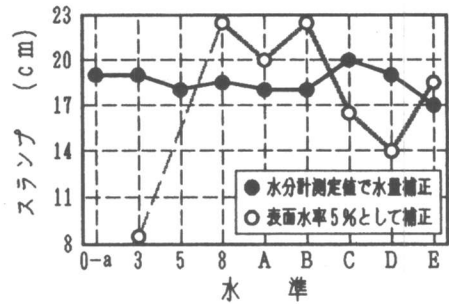


図-3 水量補正方法とスランブ値変動量

表-6 硬化コンクリートの圧縮強度

材齢 記号	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			空気量補正 後の28日 比強度 (%)	
	3日	7日	28日 実測 補正		
0-a	12.2	21.4	29.4	29.4	100
3-a	12.5	22.5	31.4	31.6	107.5
3-b	10.0	18.2	27.6	24.2	82.3
3-c	16.5	26.3	34.3	35.2	119.7
5-a	11.7	20.7	29.3	27.4	93.2
5-b	9.6	18.0	27.6	24.1	82.0
5-c	15.4	26.0	35.1	34.9	118.7
5-d	8.8	16.6	26.6	21.9	74.5
8-a	11.9	22.0	30.2	29.2	99.3
8-b	9.5	19.1	26.5	22.6	76.9
8-c	15.6	27.7	36.5	35.8	121.8
A-a	12.2	21.7	31.3	29.0	98.6
A-x	10.7	21.0	30.0	27.4	93.2
B-a	12.0	21.1	30.5	29.2	99.3
B-x	9.8	18.7	27.4	24.2	82.3
C-a	12.2	21.9	31.5	30.0	102.0
C-x	13.6	23.7	32.8	32.8	111.6
D-a	11.9	22.0	30.7	29.8	101.4
D-x	15.0	24.7	33.4	33.7	114.6
E-a	12.9	23.0	31.6	31.4	106.8
E-x	12.8	22.7	30.0	28.7	97.6

大きくなる傾向を示し、概ね水準0-aに対し圧縮強度比100~110%の範囲に分布している。圧縮強度比の経時変化を詳細に見ると、図-4に示したように、ほぼ全ての水準で材齢が進むにしたがって強度比が大きくなる傾向が現れた。

水分計の測定値により水量補正した水準で圧縮強度が増大したのは、水分計による表面水率測定値の、真の値からの「ずれ」が原因となった可能性もある。しかしこれらの水準は図-2に見られるとおり水準0-aに比べて空気量の少ないものが多く、一般に同一水セメント比の

場合、空気量が1%減る毎に強度は5%前後増すと言われている。この比率に従って補正を行うと、これらの水準の28日材齢における比強度の平均は101.0%となり、空気量補正後の圧縮強度は水準0-aとほぼ同等であることが判る。

### (2) 水量補正方法による相違

スランプ値の場合と同様に、水量補正方法の相違による強度発現特性の差を調査した。28日材齢における、空気量の相違による強度補正実施後の結果を図-5に示す。同図から、水分計の測定値により水量補正した場合の強度が水準0-aに比べて93~108%の範囲にあるのに対し、表面水率を5%固定とした水準では77~120%の範囲に大きくばらついていることが判る。

一般に、コンクリート製造プラントでは強度の変動係数が10%以内であれば、よく管理された現場であるとされている<sup>8)</sup>。本試験では測定点数が少ないため統計的解析手法を用いるにはやや無理があるが、水量補正值5%固定の場合の変動係数16.6%に対し、水分計測定値により補正した水準では4.57%と極めて小さくなった。

### (3) 水量補正值ずれと圧縮強度比の相関

(1)項で示したとおり、本試験の供試体強度特性には空気量の変動が関与していると思われる。そこで空気量の相違による強度補正を実施したうえで、水量補正值ずれ0%の水準を基準として、補正值ずれ量と強度変動量の相関を推定した。3日および28日材齢における結果を図-6に示す。同図から、水量補正值のずれ-3%に対して3日材齢で約25~30%(2.5~3.8N/mm<sup>2</sup>)、28日材齢では約12~23%(3.3~7.4N/mm<sup>2</sup>)の強度低下が発生していることが判る。若材齢で低下率が大きいのは、水セメント比が小さいほど初期強度発現が速くなるためと考えられる。

本試験の配合はセメント水比1.7の普通コンクリートであるが、高強度コンクリートでは平均2.9%の補正值のずれにより28日強度が65~85 kgf/cm<sup>2</sup>(6.4~8.3N/mm<sup>2</sup>)低下した例<sup>1)</sup>があり、普通コンクリートと比べて水量補正值ずれの影響は同等かやや大きいものと思われる。

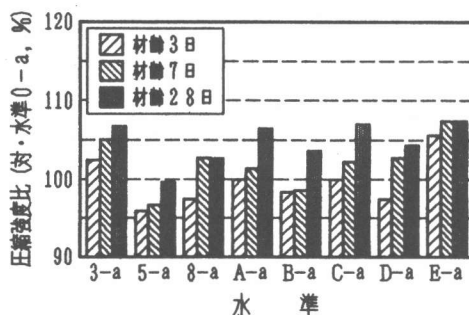


図-4 材齢による圧縮強度比の変化

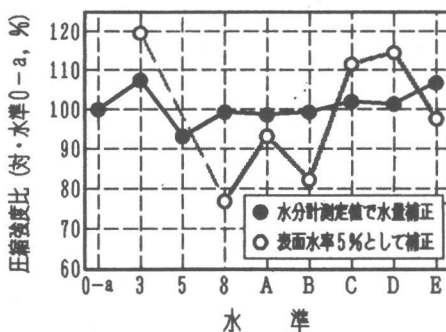


図-5 水量補正方法による圧縮強度の相違

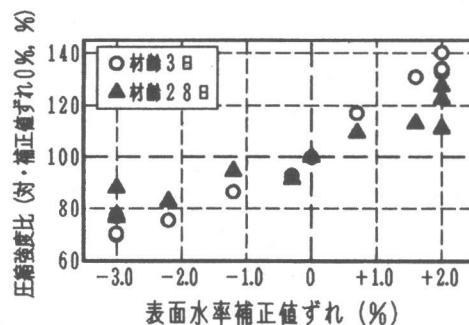


図-6 水量補正值ずれと圧縮強度比の相関

### 3.4 単位水量管理方法への提言

本研究により、マイクロ波センサ式オフライン水分計を用いた細骨材の表面水率管理は、フレッシュコンクリートの単位水量管理手法として有効である可能性が示された。現時点では同水分計による測定はJIS化されていないため、JIS A 1111等に規定された試験室における表面水率測定を省略することはできないが、同水分計を用いた測定は簡便で応答も速いため補助的

な方法として活用が可能と考えられる。

図-7に、オフライン型水分計を用いた管理手法の一例を示す。同手法例は、午前・午後の始業時にJIS法および水分計による計測を行い、水分計の補正を実施しておく(①)。その後は水分計のみによる測定を所定時間毎に行い(②)、その測定結果が水量補正の設定値から大きく、たとえば0.5%以上外れた場合に非定時のJIS法測定を実施し、その結果に基づいて水量補正の設定値を変更する(③)というものである。この手法例により、煩雑なJIS法による表面水率測定の頻度を最小限に抑えたいうえ、細骨材表面水率の変動による単位水量の誤差発生を抑制できるものと考えられる。

#### 4. まとめ

マイクロ波式オフライン型水分計は応答が迅速であり、測定試料の充填状態を容易に一定化できるため、細骨材表面水率の簡便で正確な測定器として期待し得るものである。同水分計をフレッシュコンクリートの単位水量管理に組み込むことにより、比較的簡便でより精度の高い品質管理が可能となる。

同水分計による細骨材表面水率の管理は、現時点ではレディーミクストコンクリートのJIS規格(JIS A 5308)の管理方法としては認知されていないため、試験室におけるJIS A 1111, JIS A 1125等による細骨材表面水率測定を省略することはできない。したがって、JIS法による管理の補助的手段としてオフライン水分計による測定を管理手法に組み込み、試験室における表面水率測定頻度を上げることにより従来以上にきめ細かな管理を実施し、コンクリートの品質安定化を図るべきと考えられる。

【謝辞】本研究を行うにあたり、晴海小野田レミコン(株)の清原取締役工場長ならびに品質管理課の各位、(株)クレオの山根課長、菊池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。

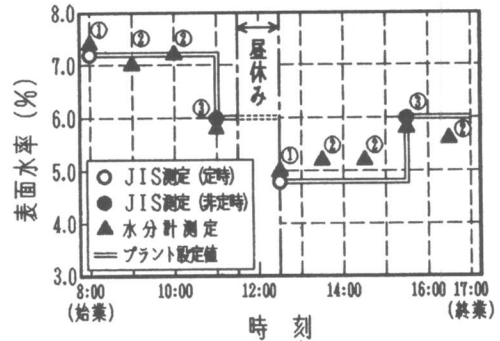


図-7 オフライン水分計を用いた細骨材表面水率の管理手法例

#### 参考文献

- 1)阿部 修ほか：高強度コンクリート製造における細骨材表面水の変動と圧縮強度の関係，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13, No. 1, pp. 215-218, 1991. 6
- 2)若松 岳ほか：ミキサ負荷電流を利用した高流動コンクリートの製造管理の一考察，第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集，pp. 25-32, 1994. 5
- 3)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
- 4)秋葉泰男ほか：増粘剤を用いた高流動コンクリートによるケーソン底版部の施工，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No. 1, pp. 185-190, 1995. 6
- 5)Lawrence, D. J. : Cement and water content of fresh concrete, ASTM special technical publication, 169 C, pp. 112-120, 1994
- 6)山下政嗣：レデーミクストコンクリートの管理 — スランプ —, セメント・コンクリート, No. 283, pp. 92-96, 1970. 9
- 7)Takagi, T. et al. : A Quality control method for self-compactable high performance concrete at precast concrete plants, 4th. International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete, Paris, 1996
- 8)秩父小野田(株)：図表で見るコンクリートの基礎知識(第10版)，pp. 113, 1997