

高信頼性コンクリート製造システムの開発 (その3)

ダム用バッチャープラントにおける品質安定性の検証

近松 竜一 十河 茂幸

Development of A High Reliability Concrete Production System(Part 3)

Verification for Quality Stability of Concrete Using Immersion Batching of Fine aggregate

Ryuichi Chikamatsu Shigeyuki Sogo

Abstract

The control of concrete quality begins with precise measurement of the specified quantities of materials before production. Production systems currently in use generally assume that aggregate is in a moist condition and require measurement of surface moisture to correct the water content. However, there is no easy way to precisely and quickly measure the surface moisture of fine aggregate in most production systems. To solve this problem, the authors have devised an "immersion batching" method for fine aggregate, in which aggregate is immersed in water before being batched in a wet condition. This enables the precise quantities of water and fine aggregate to be calculated independently of fluctuating levels of surface moisture. This paper describes practical equipment that can be used for this new batching method. This equipment has been applied to a concrete mixing batching plant for dam concrete on site. Results of quality confirmation tests on concrete made using this method are also reported.

概要

品質のばらつきが小さいコンクリートを製造するには、練混ぜ時に水量を正確に計量することが肝要である。これまでは、計量前に骨材の表面水量を設定し、表面水を練混ぜ水から差し引く方法が一般に用いられている。ところが、骨材の含水状態がばらつくとも表面水の設定値に誤差が生じる。とりわけ粒径が小さく保水性が高い細骨材中の表面水の見込み違いがコンクリートの品質を変動させる最大の要因となっている。そこで、細骨材の含水状態によらず水と細骨材を正確に計量するために細骨材を飽和含水状態で計量する「細骨材水浸式計量システム」をダム工事のコンクリート製造プラントに適用した。本論文では、このシステムの構成や各種計量設備の概要を紹介するとともに、現場プラントに設置したシステムの運用状況やその適用効果について示す。

1. はじめに

コンクリートの製造において信頼性の拠りどころとなるのは品質の安定性である。品質の変動が小さいコンクリートを製造し、その結果を適正に評価できる合理的な品質保証システムの構築が必要とされている¹⁾。

配合設計上、骨材の単位量は表面乾燥飽水状態で取り扱う。しかし、実用上は湿潤状態のままに計量し、表面水量を練混ぜ水量から差し引く方法が用いられている。細骨材中の表面水は、積み上げられた上下間で異なり、また供給ロットごとにも変動する。これまでに、マイクロ波方式、静電容量方式など各種水分計を用いて表面水率を計測し、計量工程に迅速にフィードバックする方法も実用されているが、計測精度やセンサ校正などの取扱いに関して課題が残されている²⁾。

そこで、著者らは、細骨材の表面水の変動に左右されず細骨材と水を正確に計量できる方法を新たに考案した。計量概念と算定式をFig. 1に示す。この方法は、細骨

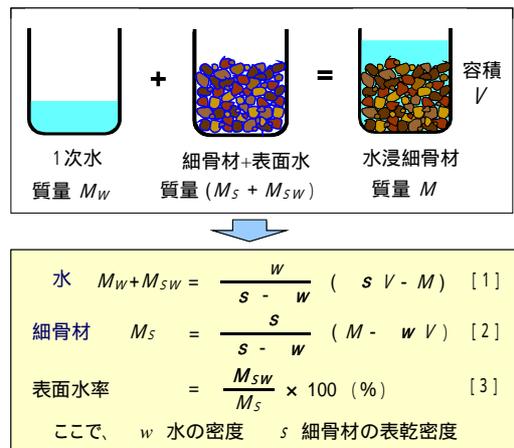


Fig. 1 細骨材水浸式計量概念と算定式
 Concept of Immersion Batching of Fine Aggregate

材を完全に水に浸して飽和含水状態で容積と質量を計量し、両者の密度差を利用してそれぞれの質量を算出する方法である。JIS A 1111-1993「細骨材の表面水率試験方法」と同じ原理にもとづくものであり、併せて表面水率も算出できる。この「細骨材水浸式計量システム」(以下、本システムと呼称)の原理や適用範囲、成立の要件等については、所報No.61³⁾において詳細に紹介している。

細骨材の水浸式計量では、Fig. 2に示すように計量の制御方法として、容積計測方式と容積制御方式の2種類が挙げられる。

容積計測方式は、水と細骨材の質量を制御して計量し、水浸細骨材の容積を計測する方法で、容積は表面水位を計測し、これと容器の断面積から計算する。ロードセルを用いて各材料の計量値を質量で制御するため、既存のシステムと整合させやすい。表面水の多少によって細骨材量が変動するので、この細骨材量の増減に対応して練混ぜ量を変更する必要があるが、一般には空気量の変動を考慮した容積保証の範囲で対処することができる。

一方、容積制御方式は、水浸細骨材の質量と容積を同時に制御して計量する。予め水を設定より多めに投入し、その後細骨材を投入すると、水は細骨材より密度が小さいため容積が所定の値になっても質量は設定値よりも小さい。ここで、容積一定の状態の水を取り除きながら細骨材を投入すると、細骨材の水中質量分だけ試料の質量が増加し、設定どおりの細骨材と水を計量することができる。以上のような水浸式計量の制御や装置の仕様、また、細骨材の水浸方法や水浸式計量を用いて製造したコンクリートの品質に関する検討結果については、既に所報No.63⁴⁾において詳述している。

ダム工事に用いるコンクリートは、単位水量が小さく僅かな水量の変動でコンシステンシーが変化し、強度や耐久性にも影響を及ぼすため、水量管理が重要である。そこで、これらの実用化に向けた研究成果を踏まえ、本システムをダム工事の現場プラントへ導入した。本論文では、プラントにおける本システムの構成や各種設備の概要を紹介するとともに、実際の運用状況やその適用効果に関する検証結果について示すものである。

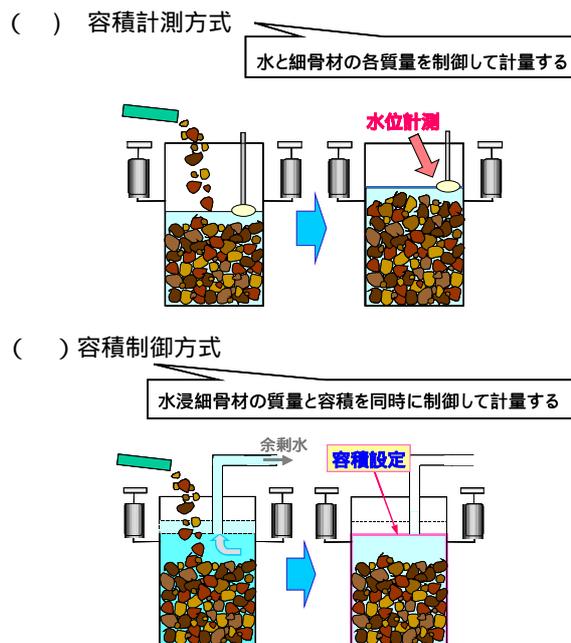


Fig. 2 水浸式計量制御の概要
Outline of Each Immersion Batching Method

Table 1 細骨材水浸式計量のバリエーション
Variety of Immersion Batching of Fine Aggregate

水浸式計量の分類		容積計測方式	容積制御方式	細骨材分割方式
特徴	計量対象	細骨材の全量		細骨材の一部 ^{*1}
	計量制御	質量のみ	質量および容積	質量のみ
計量項目	1次水	W_1	(制御)	(制御)
	湿潤細骨材	$S + W_s$	-	-
	水浸細骨材	M V (容積)	(制御)	(制御) (制御)
算定項目	水浸計量水	$W_1 + W_s$		
	細骨材(表乾)	S		
	表面水率			^{*2}
追加計量	2次水(補正用)			
	湿潤細骨材(表面水補正)	-	-	
特記事項	練混ぜ量の調整	要 ^{*3}	不要	不要

^{*1} 製造に使用する細骨材の貯蔵ロットから分取方式によりサンプリングする。

^{*2} 残りの細骨材の表面水補正に使用する。 ^{*3} 表面水率の変動に伴う細骨材量の増減に応じて調整する。
備考) は計測または算定する項目、 は計量時に制御する項目を示す。

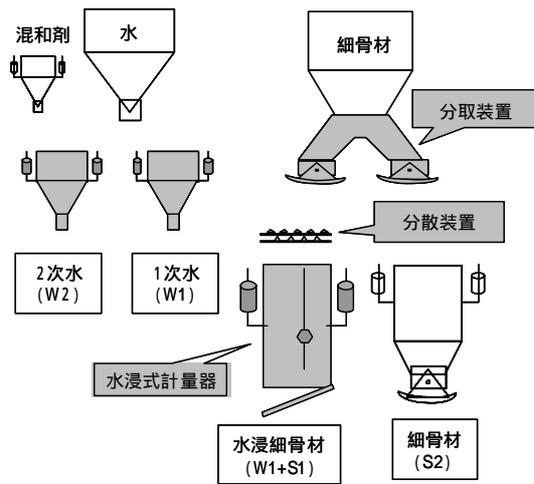


Fig. 3 細骨材分割型水浸式計量の概要
Outline of Immersion Batching with Fine Aggregate

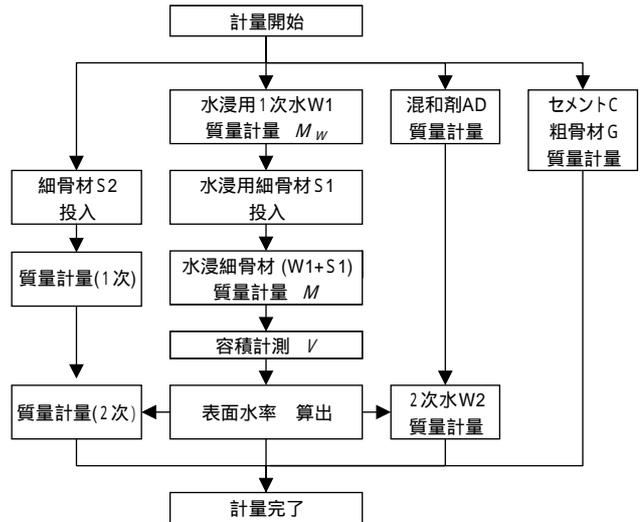


Fig. 4 細骨材分割型水浸式計量のフロー
Batching Steps of Immersion Method with Fine Aggregate

2. ダム現場プラント用細骨材水浸式計量システムの紹介

2.1 細骨材分割型水浸式計量システムの特徴

細骨材水浸式計量システムでは、Table 1 に示すように計量する細骨材の対象と制御方式の組合せにより各種のバリエーションが考えられる。これらのうち、特にダム工事に用いるコンクリートのように単位水量が小さく、細骨材の全量を水浸させることができない場合は、細骨材の一部を水浸式により計量し、残りの細骨材は水浸式計量に併せて求まる表面水率をもとに練混ぜ水を補正計量する「細骨材分割方式」が有用である。また、この分割方式は、水浸させる骨材量を任意に設定できるので、細骨材以外に粗骨材も含めた水量の補正が可能である。

この細骨材分割型水浸式計量の概要を Fig. 3 に、システムの特徴を以下に列挙する。

1) 直接的に細骨材の表面水率を測定する。

マイクロ波方式等の間接的な手法ではなく、細骨材の表面水率を直接的に測定するため、測定結果に対する信頼性が高い。

2) 練混ぜ水の補正誤差が小さい。

細骨材貯蔵ピンを二股に分岐し、排出口の直下に水浸式計量器と細骨材計量器を配置することで、当該バッチで計量する細骨材の表面水率を測定し、細骨材の含水状態のばらつきによる誤差を低減でき、結果として練混ぜ水の補正誤差を小さくできる。

3) コンクリートの適用範囲が広い。

単位水量が極端に小さい硬練りのコンクリートはもとより、あらゆる種類のコンクリートに適用できる。

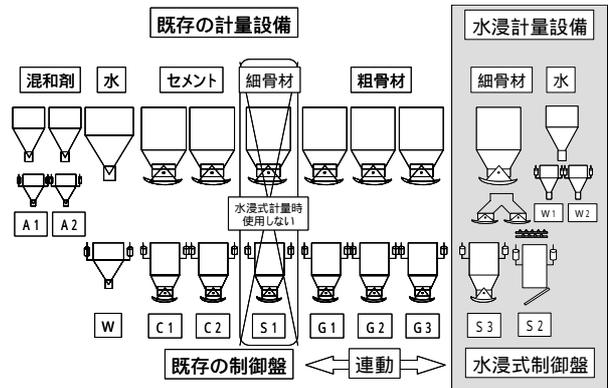


Fig. 5 ダム現場プラントにおける各種計量設備
Batching Equipments of Concrete Plant on Dam Site

2.2 システムの設計

本システムのフローを Fig. 4 に示す。

まず、予想される骨材の表面水の最大量、混和剤量を単位水量から除き、水浸用1次水(W₁)を計量する。この1次水を容器に満たして細骨材(S₁)を投入し、設定質量Mに達した時点で容積Vを計測する。これらの結果から、水浸細骨材中の水と細骨材の質量(M_W + M_{S_W}, M_S)を算定し、併せて表面水率を算出する。

細骨材(S₂)は水浸用細骨材(S₁)の投入に併せて、両者の合計が表乾状態と仮定した場合の必要量となるよう計量し、表面水率算定後に表面水に対応する不足分を追加し2次計量する。練混ぜ水に関しては、あらかじめ混和剤を計量し、想定した表面水の最大量に対する不足分を2次水(W₂)として2次計量する。なお、セメント、粗骨材等の材料に関しては、これらの水浸式計量と同時並行で計量する。

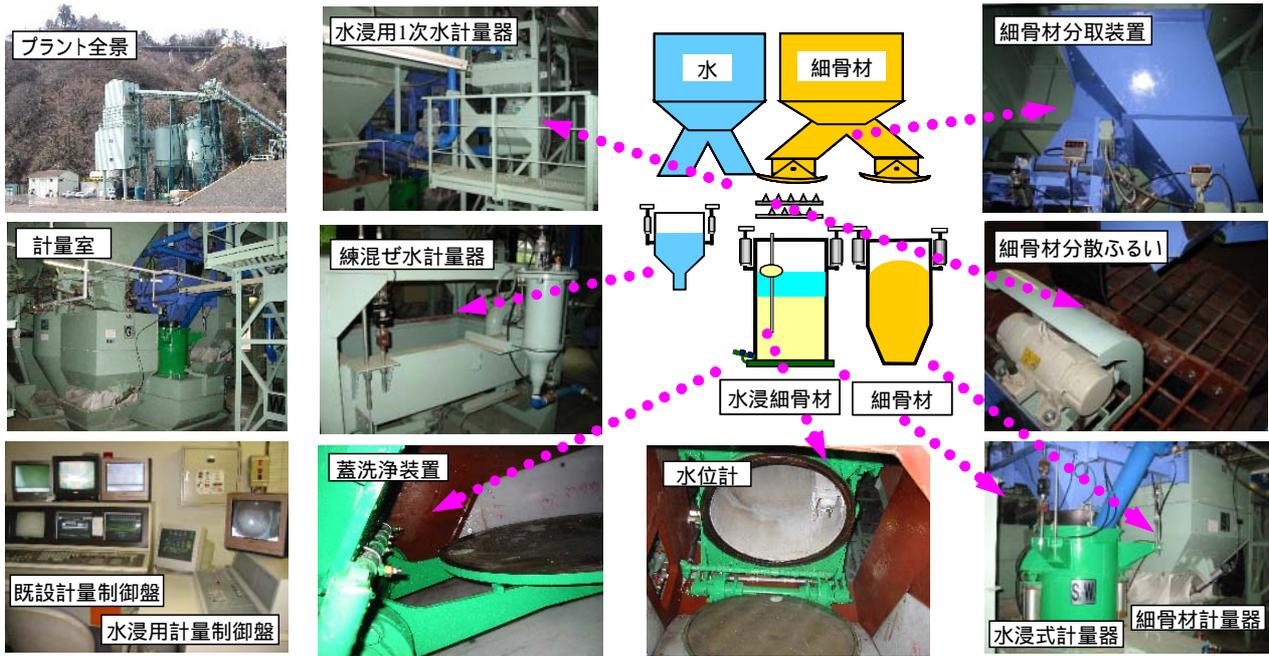


Fig. 6 ダム現場プラント用細骨材分割型水浸式計量設備の概要

Batching Equipments of Immersion Batching with a Part of Fine Aggregate of Concrete Plant on Dam Site

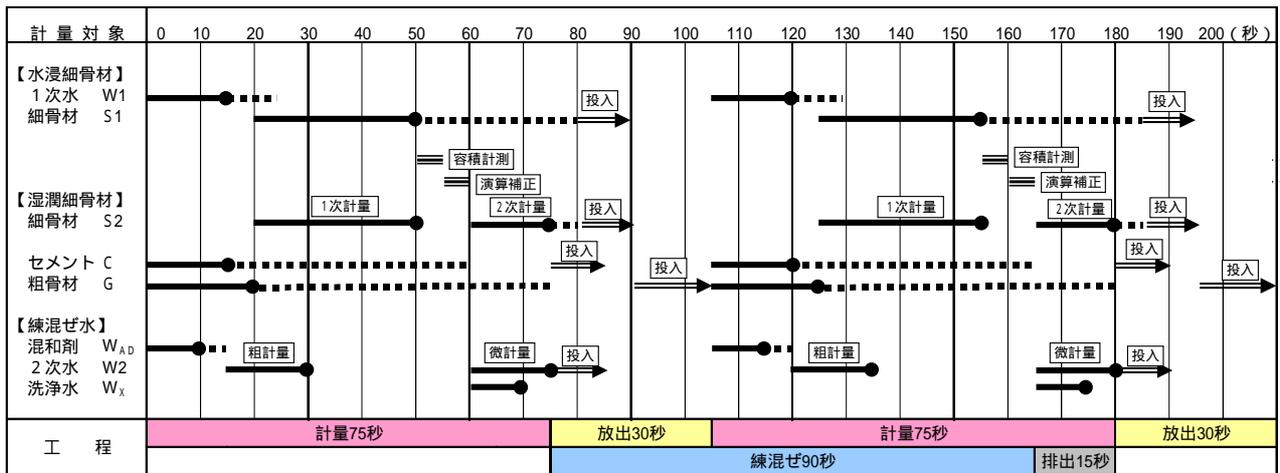


Fig. 7 細骨材分割型水浸式計量を適用した場合の製造サイクル

Batching and Mixing Time on Concrete Production System Using Immersion Batching of Fine Aggregate

2.3 計量設備仕様

細骨材分割型水浸式計量設備の概要を Fig.5 ,6 に示す。細骨材貯蔵ビンを二股に分岐し(Fig.6 -), 各排出口にゲートの直下に水浸式と細骨材計量器を配置した(Fig.6 -)。これにより計量する細骨材から水浸用に細骨材を分取することができる。また、計量器上に鉄筋を格子状に配置した分散ふるいを設けた(Fig.6 -)。これにより、細骨材が粒子毎に分散しながら投入され、水浸させた細骨材中への空気泡の巻込みを抑制することができる。

水浸式計量器にはロードセルと磁歪式水位計(Fig.6 -)を取り付けた。また、計量器本体や底蓋への細骨材の付着を防ぎ水密性を確保する洗浄装置(Fig.6 -)も配備

した。なお、洗浄水は一定量で、当該バッチの練混ぜ水の一部として使用する。本システムの運用に際しては、既存の計量操作盤と水浸式計量用の操作盤を連動させる。既存の計量操作盤では、セメント、粗骨材、混和剤と練混ぜ水の一部(粗骨材表面水の補正用)の計量を制御し、水浸式計量操作盤では細骨材と既存の操作盤で計量する水を除いた練混ぜ水の計量を制御する。

本システムを適用した場合の製造サイクルを Fig.7 に示す。ミキサの練混ぜ時間を90秒とした場合、連続運転時にコンクリートの製造能力を確保するには、バッチ当たりの計量時間を最長でも75秒以内に制御する必要があり、これを目標に各機器の計量速度を制御した。

Table 2 検証に用いたコンクリートの配合
Mix Proportions of Concrete for Verification of Immersion Batching System on Concrete Site Plant

配合	配合条件			水結材比 W/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)							
	骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)			水 W	セメント C+F	細骨材 S	粗骨材			混和剤	
				G1	G2				G3	A1	A2		
A	80	3.0±1.0	3.5±1.0	55.5	26.0	119	214	538	816	323	393	2.36	1.61
B	80	5.0±1.0	3.5±1.0	55.0	26.0	126	229	529	803	318	387	2.53	1.15
C	40	12.0±2.5	5.0±1.0	51.0	40.0	162	317	715	-	602	472	3.50	1.27
R	40	8.0±2.5	4.5±1.0	61.0	38.0	158	260	709	-	639	532	2.87	0.86

セメント：フライアッシュセメントB種(密度2.88g/cm³)，混和剤：AE減水剤(A1)，AE剤(A2)

細骨材：砕砂(表乾密度2.67g/cm³)，粗骨材：砕石(表乾密度2.68g/cm³)，G1 80-40mm，G2 40-20mm，G3 20-5mm

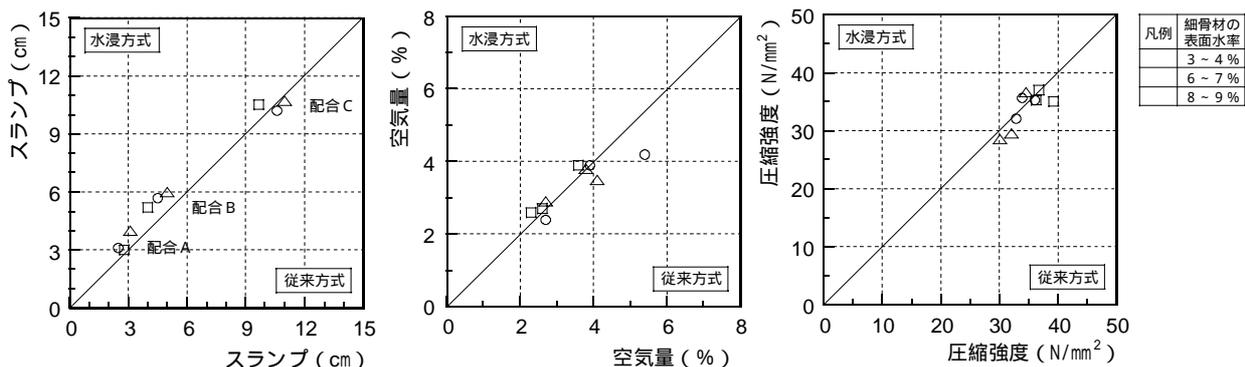


Fig. 9 水浸方式と従来方式で製造したコンクリートの品質の比較
Comparison of Concrete Qualities Using Each Batching Method

3. 細骨材分割型水浸式計量システムの性能確認

現場プラントにおいて、細骨材の貯蔵ビンから試料を一部採取し JIS A 1111 に準拠して表面水率を測定し、水浸式計量による算定値と比較した結果を Fig. 8 に示す。表面水率が約 6%以下の範囲では、両者の相違は最大で 0.5%程度で概ね一致する結果が得られた。一方、表面水率が 8%を超える場合には、水浸式計量による算定値に比較し貯蔵ビンから採取した試料による測定値の変動が大きくなった。

含水率が高い細骨材を貯蔵した場合、表面水が下方に移動し不均一となることから、後者の場合は、試料量が約 0.5kg と少なく、サンプル量による誤差の影響でばらつきが大きくなったものと考えられる。なお、今回設置した水浸式計量装置は、細骨材の計量値が最小でも 150kg 程度あり、バッチごとの細骨材の含水状態をより正確に把握できるものと考えられる。

水浸式計量システムを適用した場合と現行どおり予め表面水率を設定して計量した場合のコンクリートの品質を比較した。コンクリートの配合を Table 2 に、スランブ、空気量および圧縮強度の試験結果を Fig. 9 に示す。材料の投入順序や練混ぜ時間が同一条件であれば、いずれの配合についても計量方式による品質の相違は認められず、細骨材の一部を水浸式で計量しても従来方式と同等のコンクリートが製造できることが確認された。

次に、本システムを適用して製造したコンクリートの品質の安定性について確認した。2バッチ分を積載した

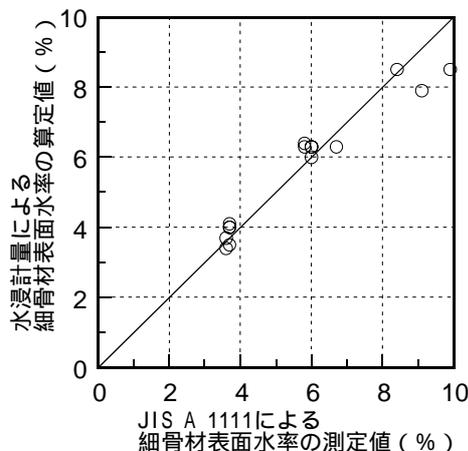


Fig.8 水浸計量による表面水率算定結果の検証
Surface Moisture of Sand by Immersion Batching

アジテータ車毎に、出荷時のスランブと空気量を測定し、強度供試体採取した。フレッシュコンクリートの品質を細骨材表面水率の時系列推移と併せて Fig. 10 に示す。細骨材の表面水率は約 2~5%の範囲で不規則に変動しているのに対し、スランブ値の変動は±1.5cm、空気量は±0.4%程度と安定した結果が得られた。また、圧縮強度に関しても、Fig. 11 に示すように、変動係数は僅かに 4%程度で、ばらつきが小さくことが確認された。これらの結果は、本システムによって表面水を含む細骨材を適正に計量することができ、品質の安定したコンクリートが製造できることを裏付けるものと考えられる。

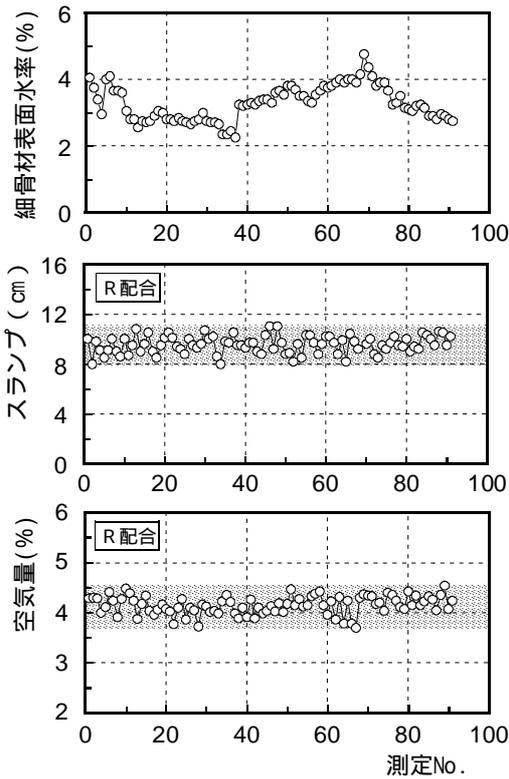


Fig. 10 コンクリートの品質安定性検証結果
Verification Result of Concrete Qualities

4. 細骨材水浸式計量システムの適用結果

4.1 水浸式計量の運用状況

本システムは、2002年6月より運用を開始し、12月時点で約13,000m³のコンクリートを製造した。

水浸式計量における水および細骨材の動荷重計量値について整理した結果を Fig. 12 に示す。本システムでは、細骨材を水浸式と従来式の2つの計量器で分割して計量している。また、練混ぜ水に関しても計量時間を短縮するために水浸用1次水と練混ぜ水補正用2次水に分け、さらに2次水は既存の計量設備を転用する制約上、細骨材と粗骨材の表面水補正用の2つに分割し、合計で3つの計量器を用いて計量している。練混ぜ水の動荷重計量値の誤差は、概ね±0.5%以下、細骨材についても±2.0%の範囲内で、いずれも JIS A 5308-1998 に規定されている誤差の許容範囲内であり、分割計量した場合でも動荷重の計量は十分な精度が確保できることが確認された。

水浸式計量を適用した場合のバッチごとの計量水量とその内訳について計量印字記録をもとに整理した結果を Fig. 13 に示す。骨材表面水の変動に対応して2次水量が増減する結果が示されている。水浸式計量では、バッチごとに表面水率を算出し練混ぜ水の補正にフィードバックするので、計量印字記録により配合を検査することが可能である。また、その計量印字記録は、コンクリートの品質を保証するための合理的な指標としても有用であると考えられる。

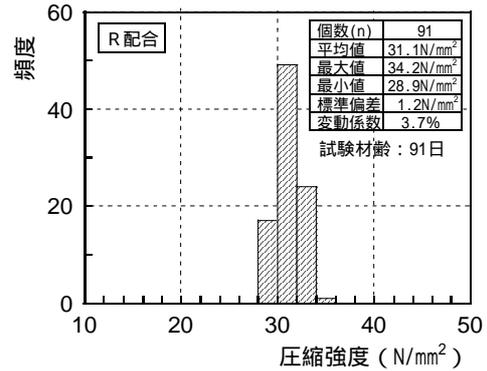


Fig. 11 硬化コンクリートの強度管理結果
Compressive Strength Results of Concrete

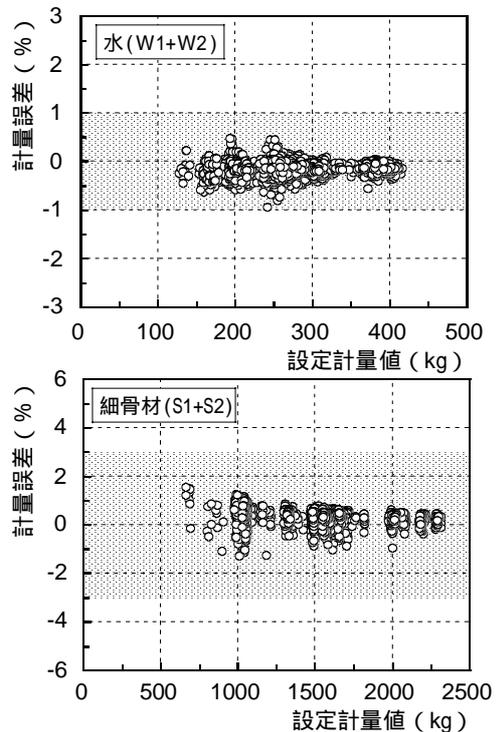


Fig. 12 水および細骨材の動荷重計量値の誤差
Dynamic Batching Errors of Water and Fine Aggregate

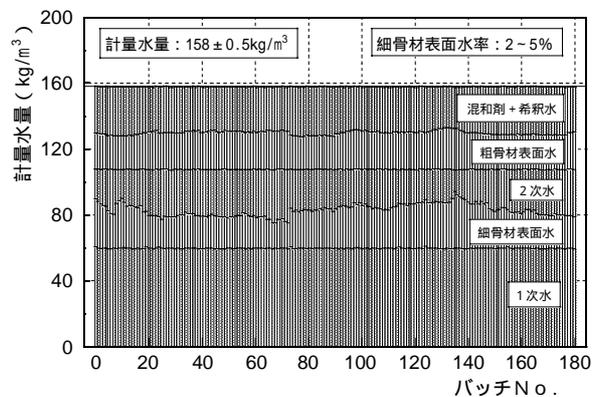


Fig. 13 バッチ毎の計量水量とその内訳
Water Content and Breakdown on Each Batching

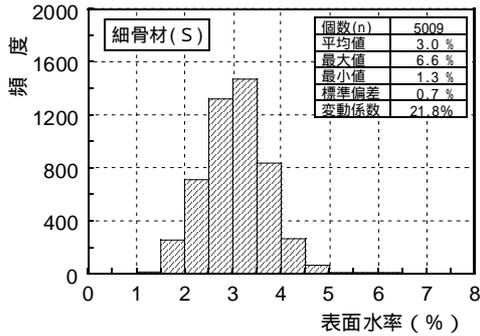


Fig. 14 水浸式計量における細骨材表面水率算定値
Surface Moisture of Fine Aggregate by Immersing Batching

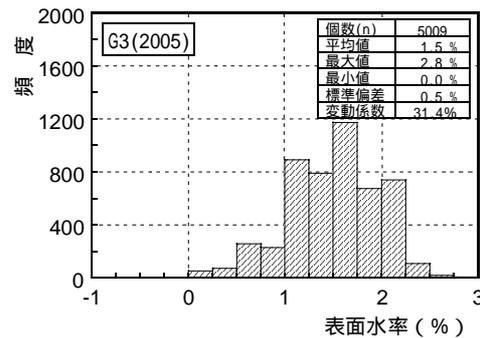
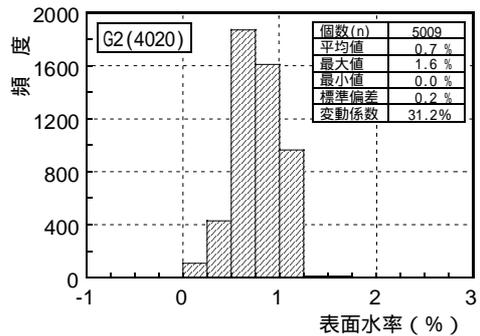


Fig. 15 粗骨材の表面水率設定値の変動状況
Variation of Surface Moisture of Coarse Aggregate

4.2 骨材表面水率の変動状況

水浸計量に併せて算定した細骨材表面水率の統計結果を Fig. 14 に示す。表面水率はおおむね 2~5% の範囲で変動しているが、一時的には 7% 近くに達する場合も認められる。通常は最短で 5 日間は細骨材をストックパイルで貯蔵しており、この間に余剰水が下方へ移動し表面水率が減少しているものと考えられる。

参考までに、コンクリートの製造において粗骨材の計量時に設定した表面水の変動状況を Fig. 15 に示す。

骨材の比表面積は、粒径の二乗に反比例して小さくなるので、一般には粗骨材の表面水は細骨材より少ない。しかし、粒径が 20~5mm の場合でも表面水率は 1~2% と比較的大きく、最大 3% 近い結果も示されている。粗骨材の表面水は、定期的な測定結果をもとに補正計量しているのが実状である。この場合、あくまで表面水率の変動が少ないことが前提であり、日間で 1% を超える変

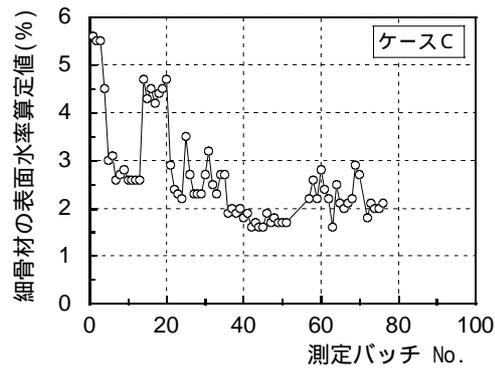
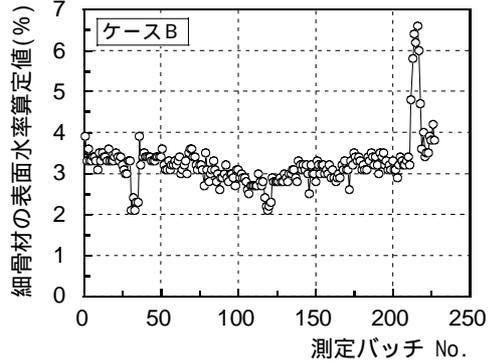
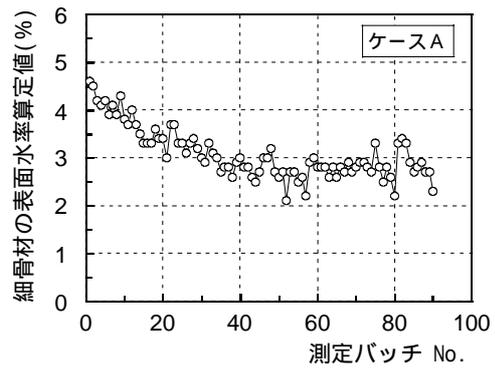


Fig. 16 細骨材の表面水率算定値の時系列推移
Elapsed Transition of Surface Moisture of Fine Aggregate

動があるとなれば管理を強化する必要がある。

細骨材表面水率の時系列推移の例を Fig. 16 に示す。ケース A は、日常の典型的な表面水率の推移例である。細骨材貯蔵ビン中で表面水が下方へ移動するため、コンクリートの製造を開始した直後は細骨材の表面水率が大きく、徐々に低下する状況が示されている。

ケース B は、表面水が急激に変化した事例である。3% 前後で比較的安定しているが、一時的に 7% 近くまで急増し、その後再び 4% 程度に低下している。

一方、ケース C は、A、B の両ケースが複合された例である。製造開始初期は表面水率が大きく、次第に低下するが、一時的に不規則に変動している。

これらの結果は、本システムによって貯蔵ビン中での表面水の移動や新たに細骨材が供給された場合の表面水率の変化を的確に捉えることができ、正確に補正計量にフィードバックできることを示すものと考えられる。

Table 3 細骨材水浸式計量システムを用いて製造したコンクリートの配合
Mix proportions of Concrete for Verification of Immersion Batching System on Concrete Site Plant

配合	配合条件			水結合材比 W/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
	骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)			水 W	セメント C+F	細骨材 S	粗骨材		混和剤	
				G2	G3				A1	A2		
C	40	12.0±2.5	5.0±1.0	51.0	40.0	162	317	715	602	472	3.50	1.27

セメント：フライアッシュセメントB種(密度 2.88g/cm³)，混和剤：AE減水剤(A1)，AE剤(A2)
細骨材：砕砂(表乾密度 2.67g/cm³)，粗骨材：砕石(表乾密度 2.68g/cm³，G2 40-20mm，G3 20-5mm)

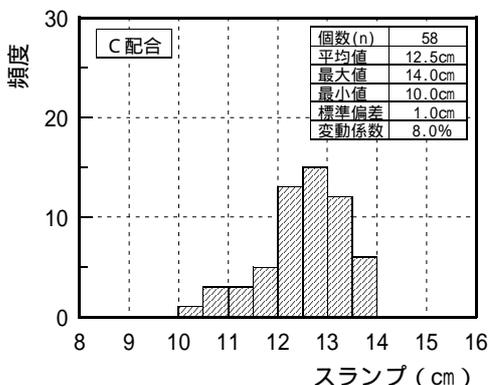


Fig. 17 スランプ管理結果の一例
An Example of Slump Control Results

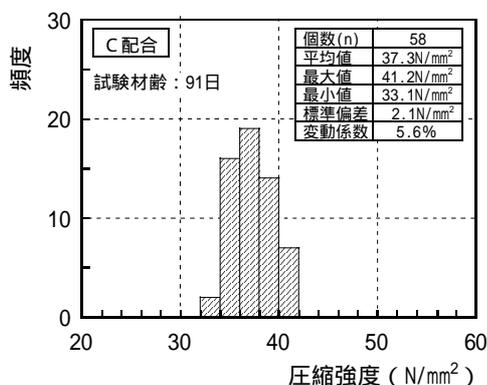


Fig. 18 圧縮強度管理結果の一例
An Example of Compressive Strength Control Results

4.3 コンクリートの品質管理状況

細骨材水浸式計量システムを適用して製造したコンクリートの品質管理結果の一例として、Table 3 に示す配合のコンクリートのスランプおよび圧縮強度の管理結果をそれぞれ Fig. 17, Fig. 18 に示す。

製造量が約 4,600m³のコンクリートに対して、現場荷卸し時のスランプは平均値 12.5cm で、ばらつきは ±2cm の範囲内であった。また、圧縮強度に関しても、材齢 91 日における変動係数は約 5.6% と比較的小さい結果が得られている。

コンクリートの品質は、細骨材の表面水だけでなく上述した粗骨材中の表面水の変動や粒度のばらつきによっても影響を受けるが、少なくとも水浸式計量を適用して細骨材の表面水率による補正をより正確に行うことにより、品質のばらつきが小さいコンクリートを製造できるものと考えられる。

5. まとめ

本論文の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 細骨材水浸式計量時に算定される表面水率は、細骨材貯蔵ビン中の表面水の移動や新たに供給された細骨材の含水状態の変化を的確に捉えている。
- 2) 細骨材水浸式計量を適用することで、当該バッチごとに細骨材の表面水の変動に対応して練混ぜ水を精度良く補正することができ、計量印字記録を用いて単位水量を直接的に評価することができる。
- 3) 細骨材水浸式計量システムによれば、水浸させた細

骨材の質量と容積から算出した表面水率を用いることにより、練混ぜ水と細骨材の計量値にフィードバックされ、バッチごとの細骨材表面水の変動に左右されず、安定した品質のコンクリートを製造できる実用的なシステムといえる。

謝辞

本システムの導入に際して、水資源開発公団徳山ダム建設所、徳山ダム洪水吐きJV工事事務所、東京本社土木技術本部技術第三部の皆様には多大なるご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) コンクリートの製造システム研究委員会報告書，(社)日本コンクリート工学協会，pp.1-21，1992.3
- 2) 阿部淳一，小山 明：使いこなし技術，骨材の現状と展望，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
- 3) 近松竜一，十河茂幸：高信頼性コンクリート製造システムの開発(その1) - 水浸方式による細骨材の新計量方法の提案 - ，大林組技術研究所報，No.61，pp.57-64，2000.7
- 4) 近松竜一，十河茂幸：高信頼性コンクリート製造システムの開発(その2) - 水浸細骨材計量方式を用いたコンクリート製造システムの実用化検証 - ，大林組技術研究所報，No.63，pp.19-26，2001.7