

水浸細骨材計量方式を用いた信頼性の高い コンクリート製造システムの実用化に関する研究

近松竜一¹・十河茂幸²

¹正会員 工修 大林組技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

²フェロー会員 工博 大林組技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

品質のばらつきが少ないコンクリートを製造するには、各材料を所定量だけ正確に計量する必要がある。しかし、現行の製造システムでは、細骨材の表面水を正確かつ迅速に把握することが困難な場合も多く、製造技術者を悩ませているのが現状である。そこで、表面水の変動に左右されず、正確な水量と細骨材量を算出する方法として、細骨材を水中に浸して飽和含水状態で計量する水浸計量方法を考案した。本報は、この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に向けた各種の検証結果をまとめたものである。水浸計量の制御や装置の仕様に関して概説するとともに、水浸細骨材の作製方法や水浸方式で製造した場合の品質確認結果について報告する。

Key Words : fine aggregate, surface moisture, batching method immersing sand in water, high reliability, concrete production system

1. はじめに

信頼性の高いコンクリート構造物を構築するためには、コンクリートの品質を的確に保証できるシステムを体系化する必要がある。本報で紹介する細骨材の計量方法は、この品質保証システムの一部を担うことを意図している。

コンクリートの製造に際し、信頼性を判断する尺度となるのは「品質の安定性」である。品質の優劣ではなく、品質のばらつきが少ないコンクリートを製造でき、その製造結果を適正に評価できるシステムが要望されている。

現行の製造システムでは、骨材を湿潤状態で取り扱い、表面水率を計測して水量を補正する方法が一般的である。これまでに、マイクロ波式、静電容量式、中性子式等の各種水分計が開発され¹⁾、表面水率を連続的に計測して表面水を補正する方法が用いられているが、依然として細骨材の表面水管理に苦慮しているのが現状である²⁾。

そこで、著者らは、細骨材の表面水変動に左右されず、正確に細骨材と水を計量する方法として、細骨材を水に浸して飽和含水状態で計量する方法(図-1参照)を考案し、この水浸方式による計量方法の概要ならびに適用範囲や要件などについて紹介した³⁾。

本論文は、この水浸細骨材計量方式によるコンクリート製造システムの実用化に向けた各種検証結果をまとめ

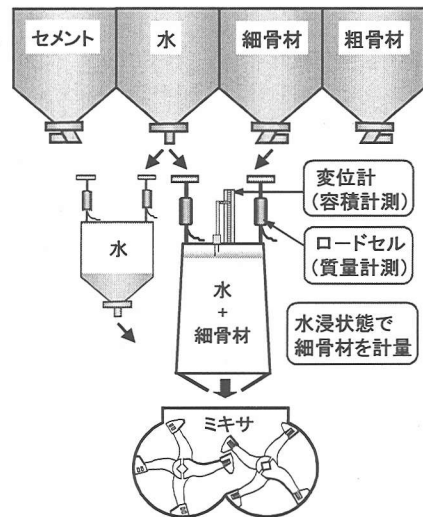
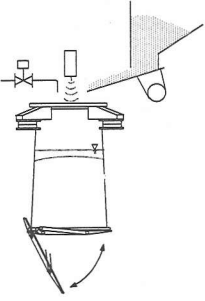
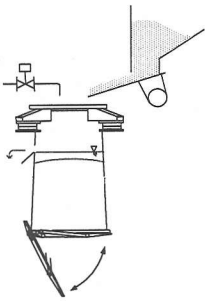
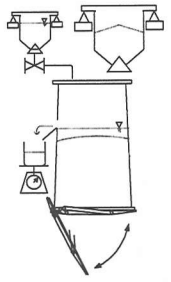


図-1 水浸細骨材計量方法の概念

たものである。水浸細骨材の計量制御方法や計量装置の仕様について概説するとともに、水浸細骨材の作製方法や水浸細骨材方式を用いて製造したコンクリートの品質確認結果について報告する。

表-1 水浸細骨材の計量装置および制御方法のバリエーション

装置の名称		容積計測方式	容積制御方式A	容積制御方式B
概念図				
特徴	計量の量	全量*1	全量*1	
	計量制御方法	質量制御・容積計測	質量制御・容積制御（一定）	
	練混ぜ量の調整	要	不要	
計量	1次水量	-	-	○（越流量で補正）
	湿潤細骨材の質量	-	-	○
	水浸細骨材の質量	○	○	-（計算による）
項目	水浸細骨材の容積	○（計測）	○（一定に制御）	○（一定に制御）
	水量（1次水+表面水）	○	○	○
計算項目	細骨材量（表乾換算）	○	○	○
	細骨材の表面水率	-	-	○

※ *1 細骨材の表面水率を算出する場合は、細骨材の一部についても計量可能

2. 水浸細骨材計量方法の概要

(1) 基本概念

本計量方法は、細骨材を水に浸した状態で、その質量と容積をもとに、細骨材と水の密度差を利用して両者の質量を算出する。細骨材量と水量の2つの未知量に対し、質量と容積に関する以下の式(1)、(2)が得られ、これらの式から導かれる式(3)、(4)より各材料量を求める。

$$M_s + M_w = M_f \quad (1)$$

$$M_s/\rho_s + M_w/\rho_w = V_f \quad (2)$$

式(1)および式(2)を変形して

$$M_s = \rho_s (M_f - \rho_w V_f) / (\rho_s - \rho_w) \quad (3)$$

$$M_w = \rho_w (\rho_s V_f - M_f) / (\rho_s - \rho_w) \quad (4)$$

ここで、 M_s ；細骨材の質量

M_w ；水の質量

ρ_s ；細骨材の表乾密度

ρ_w ；水の密度

M_f ；水浸細骨材の質量

V_f ；水浸細骨材の容積

(2) 水浸細骨材計量装置の仕様

水浸細骨材計量装置と制御方法の一例を表-1に示す。これらのうち、容積計測方式を用いた装置の例を写真-1に示す。以下、装置の仕様に関して概説する。

a) 細骨材の計量範囲

本計量方法は、原則的にコンクリートに用いる細骨材全量を対象とする。ただし、JIS A 1111-1993「細骨材の表面水率試験方法」と同じ原理を用いているので、計量時に表面水率も算出できる。そこで、細骨材量に対する水量の割合が小さく、細骨材全量を水浸状態で計量できない場合は、細骨材の一部を水浸させ、計量に併せて表面水率を算出し、残りの細骨材を計量することもできる。

b) 計量の制御方法

材料計量の制御は、質量、容積どちらでもよいが、現行の計量方法と同様に質量で計量値を制御の方が実用的といえる。

容積計測方式では、水浸細骨材の質量を制御して計量し、容積を計測する。水浸細骨材の質量を設定どおり計量しても、細骨材の表面水の多少により水浸細骨材の容積が変化するので、表乾状態で計算される細骨材量が増減し、これに応じて練混ぜ量を調整する必要がある。ただし、水浸計量時に併せて表面水率を算出し、細骨材の含水状態の変動を把握することで、練混ぜ量の調整を実用上は無視できる程度に制御することも可能である。

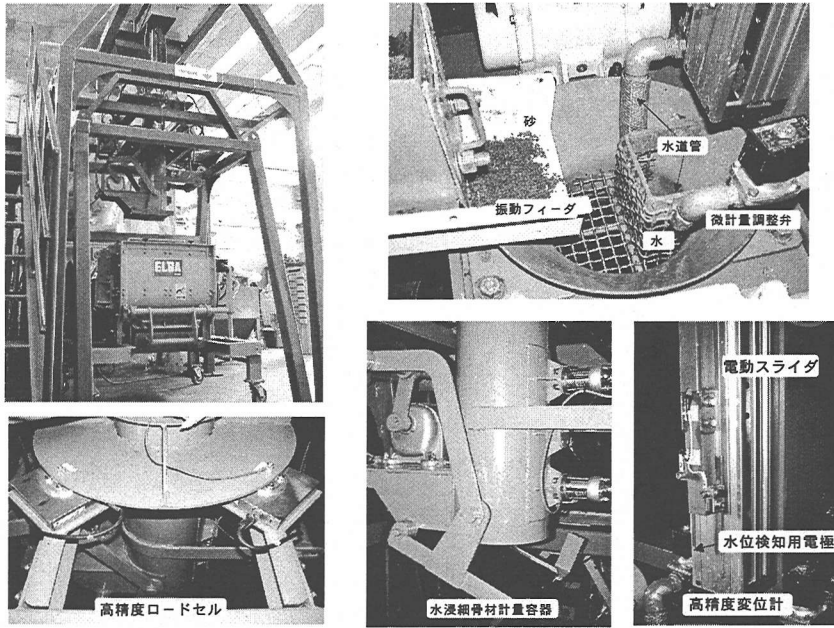


写真-1 水浸細骨材のモデル計量装置（容積計測方式）の概要

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する方法である。計量完了時における水浸細骨材の容積を予め設定しておき、最終的に容積一定の状態では細骨材を水と置換させるので、投入した細骨材の水中質量分だけ計量値が増加し、水浸細骨材の質量が設定値に達した時点で所定量の細骨材と水が計量されることになる。この方式によれば、質・量ともに目標とするコンクリートを迅速かつ効率的に製造できる。この容積制御方式には、計量項目の組合せにより各種バリエーションがある。なお、表-1の容積制御方式Bは、水と湿潤細骨材の質量を予め計量し、これらを容積既知の容器に投入して水浸細骨材を作製する方法である。

c) 水浸細骨材計量容器

水浸容器の容量は、現行の計量方法で用いる場合と同程度である。これは、細骨材粒子の空隙が水が満たすことで水浸細骨材の容積は細骨材のかさ容積とほぼ一致するためである。また、容器の形状も特別な制約はない。

ただし、水浸細骨材の水位を計測して容積を求める場合には、計測精度を高める観点から、なるべく容器の断面を小さくしてスレンダーな形状とする方が望ましい。また、容器の断面形状も、矩形より円形に近い形とし、鉛直下向きに断面を絞らず、テーパをつけた方が水浸細骨材を容易に容器から排出することができる。これらの諸点を踏まえて、モデル計量装置（容量約40L）は、形状が円錐台で、容器の高さは断面径の約4倍に設定している。

最近では、レディーミクストコンクリートの製造に際して2種類以上の細骨材を用いる場合が多い。水浸計量

方式においても細骨材の累加計量は可能であるが、同じ容器でこれらを計量する場合は速度が低下する。なお、他の材料を計量するタイミングを粗・微計量の設定で調整したり、容積制御方式を採用することにより、材料の計量サイクルタイムに関しても現行の計量方法の場合と遜色ない性能が得られるものと考えられる。

d) 質量、容積の計測方法および精度

質量の計測は、現行の計量方法と同様に、ロードセルを使用する。ただし、容器の揺動を極力低減して、容積計測時の試料液面の変位を精度良く検知する観点から、モデル装置のように圧縮型を採用するのも一策である。

容積の計測は、フロートやメカニカル方式の変位計、非接触方式の超音波変位計を用いる等、各種方法がある。また、容積制御方式では、計量容器に可動式の堰を設け、細骨材と置換した水をオーバーフローさせたり、容器中にホースを上下させ、ポンプで吸引する等の方法がある。

計量器の精度に関して、質量の計測精度を η_w 、容積の計測精度を η_v とすると、水の計量誤差 Δw との関係は、水浸細骨材充填率 f （水浸細骨材中に占める細骨材の体積比）を用いて、以下のように表すことができる。

$$\eta_w \leq \Delta w / (1 + \rho_s f / \rho_w (1 - f)) \quad (5)$$

$$\eta_v \leq \Delta w (1 - f) \quad (6)$$

試算の一例として、水の計量誤差を1%、水浸細骨材充填率を0.60、細骨材の表乾密度を 2.60 g/cm^3 と仮定すると、 $\eta_w \leq 1/500$ 、 $\eta_v \leq 1/400$ となる。これに、実計量に対する秤量の割増し、練混ぜ量に対応した計量範囲の変

動を考慮すると、ロードセルの精度を汎用型(1/1000)より若干高めることで、細骨材よりも計量値が小さい練混ぜ水に関しても所要の計量精度を確保できると考えられる。なお、水浸モデル計量装置では、精度が約1/2000のロードセルを用い、メカニカル式スライダに電極式水位センサを取り付けることで、0.1mmの精度で水位を計測する仕様としている。

3. 水浸細骨材計量方法に関する検討

(1) 水浸細骨材の計量誤差に関する試算

JIS A 5308-1998では、骨材の計量誤差は3%以内、水の計量誤差は1%以内と規定されている。水の計量誤差を骨材より小さく設定しているのは、コンクリートの品質に及ぼす水量の影響を考慮したもので、所要の単位水量を確保するにはできるだけ正確に計量する必要がある。

水浸細骨材計量方法における計量誤差の要因としては、計量器の精度に起因した計測誤差の他に、水浸細骨材中への気泡の巻込み、細骨材密度の変動などが考えられる。

質量計量の誤差を α_w 、容積計量の誤差を α_v とし、水の計量誤差 Δw を求めると以下のとおりとなる。

$$Ms' + Mw' = Mf(1 + \alpha_w) \quad (1')$$

$$Ms'/\rho_s + Mw'/\rho_w = Vf(1 + \alpha_v) \quad (2')$$

$$\begin{aligned} \Delta w &= (Mw' - Mw) / Mw \\ &= (\alpha_v - k \alpha_w) / (1 - k) \quad (7) \\ k &= f + (1 - f) \rho_w / \rho_s \end{aligned}$$

気泡の巻込みによる計量誤差の試算として、水浸細骨材充填率0.60、細骨材の表乾密度を 2.60g/cm^3 とし、質量計量による誤差はないものと仮定する。式(7)より、水の計量誤差を1%以内とするには、気泡の巻込みによる誤差を約0.3%以内に抑制する必要があると計算される。

次に、細骨材密度が変動した場合の計量誤差に関しては、細骨材の表乾密度の変動量を $\Delta \rho_s$ とすると、

$$\alpha_v = f(1 - 1/(1 + \Delta \rho_s / \rho_s)) \quad (8)$$

細骨材の密度が0.01変動すると、容積計量に約0.2%程度の誤差が生じると計算される。

なお、参考までに、細骨材の表面水率が変動した場合の容積への影響は、表面水率の設定誤差を Δr_{sw} として、

$$\alpha_v = f(\rho_s - 1) \Delta r_{sw} \quad (9)$$

と表される。式(7)による試算結果を踏まえると、表面水率を補正する現行の計量方法を用いた場合には、細骨材の表面水を含めた練混ぜ水としての計量誤差を1%以内とするには、細骨材表面水率の設定誤差を $\pm 0.3\%$ 以内に制御する必要があると計算される。

(2) 水浸細骨材の作製方法が計量誤差に及ぼす影響

含水状態が異なる各種の細骨材を対象とし、細骨材と水の混合割合や細骨材の累加計量の有無、細骨材の投入時間、締固めの有無等の各種条件を変化させて水浸細骨材を作製し、これらの要因が水浸細骨材の計量誤差に及ぼす影響について調べた。

実験には、写真-1に示した水浸計量装置を使用した。予め使用する細骨材の表面水率を測定して細骨材および水(1次水+表面水)の計量値を設定し、水浸細骨材の質量と容積から求まる実測値と比較した。

実験から得られる設定と実測の差は、ロードセルや変位計の計測誤差、細骨材表面水率の設定誤差、気泡の巻込みによる誤差等、各種要因の誤差が包含された結果として表される。そこで、実験結果の表記にあたっては、これらの計量誤差を一律に細骨材の表面水率に換算して整理した。結果の一例を図-2~図-7に示す。

水浸細骨材の試料量が約30Lと少なく、変位が1mmの増減で容積が約0.2%変動するため、実機プラントの場合に比べ誤差が生じやすい条件であるにもかかわらず、細骨材の含水状態や水浸細骨材充填率の相違、締固めの有無によらず、計量誤差は細骨材の表面水率換算で $\pm 0.3\%$ の範囲の中に収まる結果が得られ、実用上十分な精度で水浸状態で細骨材を計量できることが明らかとなった。

(3) 水浸細骨材の高密度充填に関する検討

水浸計量法では、細骨材と一緒に計量する水量が練混ぜ水量より少ないことが前提となる。細骨材の充填率を高め、少量の水で細骨材を水浸させれば、2次計量水が多くなり、混和剤等の添加調整が容易となる。そこで、水浸細骨材の作製に際して棒状パイプレータを試料中に挿入し、振動締固めによる細骨材の高密度充填効果について確認した。

各種水浸細骨材充填率における試料上面の水浸状況を写真-2に示す。陸砂(実積率69%)を用いた場合、充填率が67%で締固め無しでも水浸状態にでき、締固めを行えば充填率が71%でも水浸細骨材を作製することができた。また、この締固め効果は、細骨材の種類によって相違し、図-6、図-7に示したように、実積率の小さい細骨材の方が締固めによる充填率の増大効果が大きいといえる。

計量器からの水浸細骨材の排出状況を写真-3に示す。締固め無しの条件で水浸細骨材を作製した場合は、細骨材粒子が流動状態で排出されるのに対し、振動締固めを行った場合は骨材粒子が圧密され、塊状で容器から排出される状況が確認された。なお、いずれの場合にも試料と容器の間は水膜が形成されるため、試料の排出が滞ることはなく、容器中への試料の残存についても実用上は無視できる程度であることが確認できた。

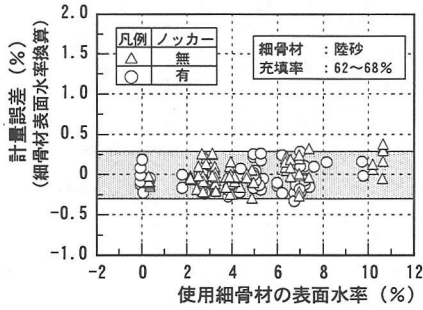


図-2 細骨材の表面水率が計量誤差に及ぼす影響

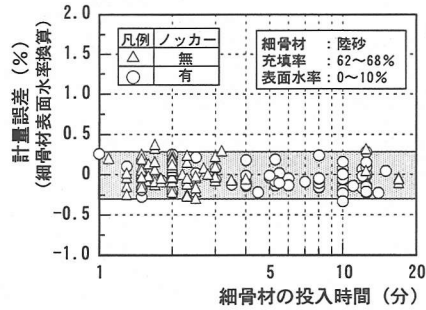


図-3 細骨材投入時間が計量誤差に及ぼす影響

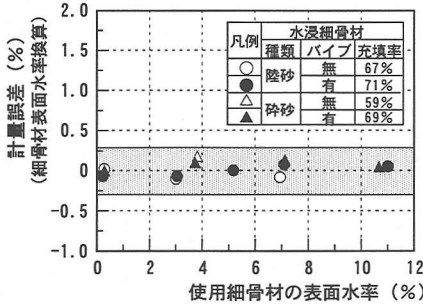


図-4 細骨材の表面水率が計量誤差に及ぼす影響

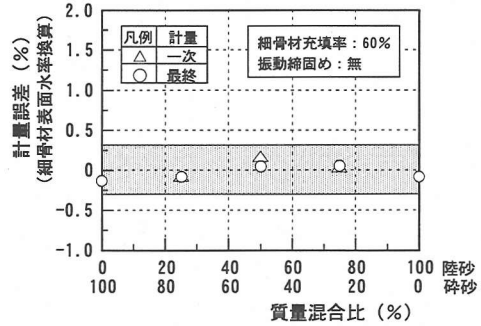


図-5 細骨材の累加計量が計量誤差に及ぼす影響

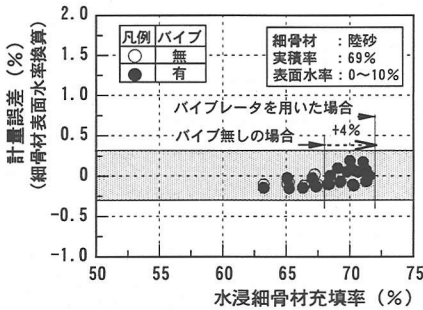


図-6 水浸細骨材充填率が計量誤差に及ぼす影響

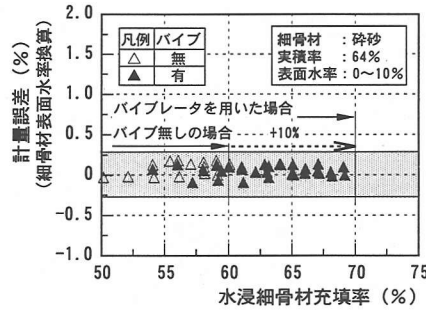
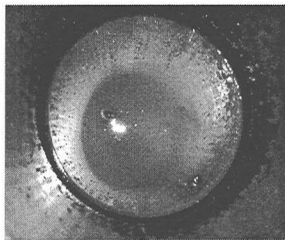
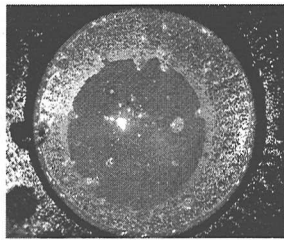


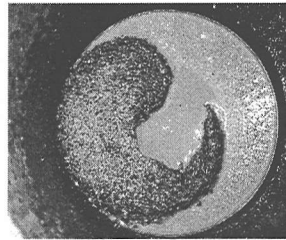
図-7 水浸細骨材充填率が計量誤差に及ぼす影響



水浸細骨材充填率67% (締めめ無)



水浸細骨材充填率71% (締めめ有)



水浸細骨材充填率73% (締めめ有)

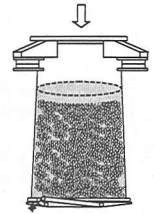
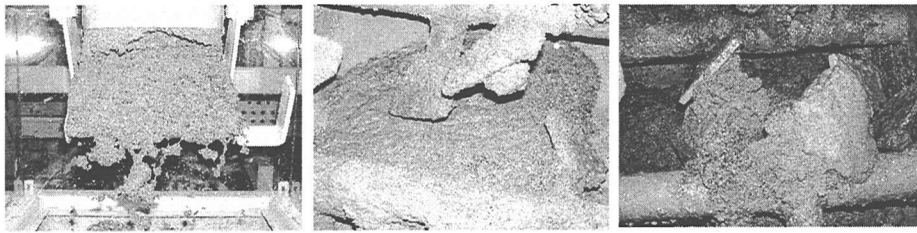


写真-2 水浸細骨材上面部の充填状況



水浸細骨材の排出状況 締め無しで作製した場合 締め固めて作製した場合

写真-3 各種条件で作製した水浸細骨材の容器からの排出状況

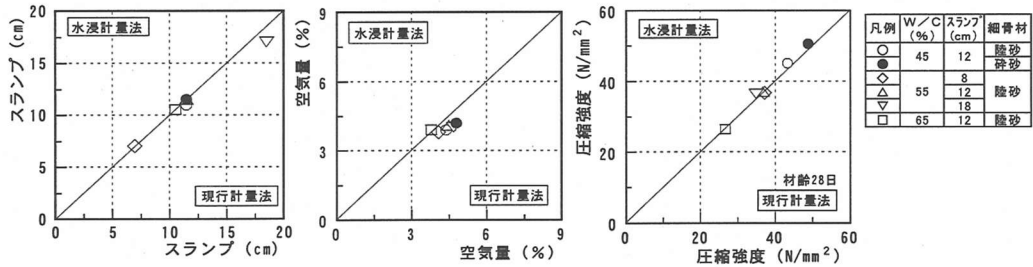


図-8 水浸計量方式と現行計量方式を用いて製造したコンクリートの品質の相違

4. 水浸細骨材計量方式を用いて製造したコンクリートの品質検証

(1) 水浸計量時の各種要因がコンクリートの品質に及ぼす影響

水浸計量方式を用いて製造した各種配合のコンクリートの品質を現行の方法を用いた場合と比較した。また、水浸細骨材の作製条件として、細骨材の表面水率、水浸細骨材充填率、締め固めの有無等の各種要因がコンクリートの品質に及ぼす影響を実験により検証した。

試験配合を表-2、水浸細骨材作製条件の組合せを表-3に示す。使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は木更津産陸砂(表乾密度2.60g/cm³、粗粒率2.72、実積率69%)、熊谷産砕砂(表乾密度2.66g/cm³、粗粒率2.55、実積率64%)、粗骨材には青梅産碎石(表乾密度2.66g/cm³、粗粒率6.72)、混和剤としてAE減水剤、高性能AE減水剤を用いた。練混ぜは、パグミル型二軸強制練りミキサ(容量100L)を用い、全ての材料を一括で投入し、120秒間練り混ぜた。

水浸計量と現行計量の両方式を用いて製造したコンクリートの品質を比較した結果を図-8に示す。水セメント比やスランプの水準が相違するいずれの配合についても細骨材の計量方法によらずほぼ同等の品質のコンクリートが得られることが確認された。

含水状態が異なる細骨材を用い、水浸細骨材充填率や締め固め条件を変えて水浸細骨材を作製し、製造したコン

表-2 コンクリートの試験配合

配合種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					WR	SPA
			W	C	S	G	SPA		
普通	45.0	40.0	169	376	697	1066	0.94	—	
高流動	33.0	45.6	175	530	726	887	—	7.69	

※WR: AE減水剤, SPA: 高性能AE減水剤

表-3 水浸細骨材の作製条件の組合せ

配合種類	細骨材の表面水率	水浸細骨材充填率					現行計量
		62%	63%	65%	67%	70%	
普通	3%	—	○	○●	○	●	○
	7%	○	○	○	—	—	○
高流動	3%	—	○	○●	○	●	○
	7%	—	○	○	○	—	○

※水浸細骨材を締め固めて作製した場合: ●

クリートの品質を図-9に示す。水浸計量の場合、用いる細骨材の含水状態や充填割合により水浸細骨材中の水量が増減し、練混ぜ水量に対する不足分を2次計量水(混和剤を含む)として別途添加することになる。そこで、これらの図では、全練混ぜ水に対して別途添加する水の割合を各ケース毎に整理して示している。

水浸計量方法では、2次計量水の割合は混和剤の希釈濃度を左右する。特に高性能AE減水剤を多量に用いる高流動コンクリートはその影響が大きいと考えられるが、いずれの配合も各種品質への影響は認められない。また、水浸計量時の締め固め条件の影響に関しても、前述した水浸細骨材の排出状況の相違に関係なくほぼ同等の品質が得られることが明らかとなった。

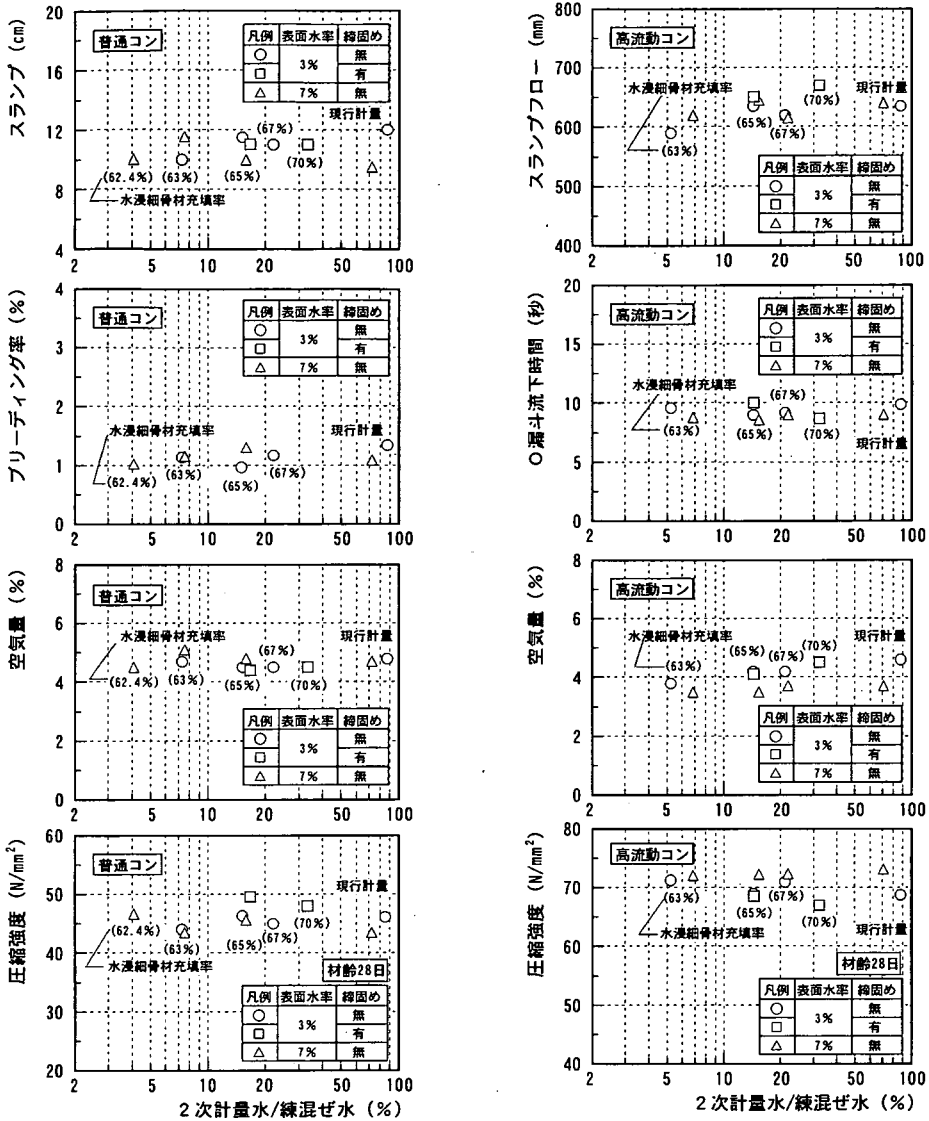


図-9 水浸細骨材を用いて製造した各種コンクリートの品質

(2) 水浸計量方法を用いた場合の品質安定性の検証

水浸細骨材計量方式を用いることで、予め表面水率を測定しないで、所定の配合どおりのコンクリートが製造できることを実験により検証した⁴⁾。

実験に用いたコンクリートの試験配合を表-4に示す。細骨材は事前に表面水率を調整しないで使用した。なお、確認のために、実験後に表面水率を測定した結果、3.5～8.5%の範囲であった。

水浸方式による材料計量結果および水浸細骨材を用いて製造したコンクリートの各種品質確認結果を表-5に示す。細骨材を水浸状態で計量し、その結果をもとに現

場配合を修正することで、スランプフローが600～650mm、○漏斗流下時間が約8～9秒とほぼ同等の流動特性を有し、硬化後のコンクリートの強度特性も同様で細骨材の含水状態に左右されず、一定した品質のコンクリートが製造できることが確認された。

各製造バッチ毎の圧縮強度試験結果を図-10に示した。バッチ間の強度平均値の変動は、同一のバッチから採取した供試体間の偏差より小さい。この結果は、水浸方式によって各材料が正確に計量されていることを裏付けるものであり、しかも細骨材の表面水率を測定しない結果であることは評価に値すると思われる。

表-4 コンクリートの試験配合

配合 種類	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
			W	C	石粉	S	G	SPA
高流動	33.0	47.0	175	530	50	720	828	6.67

表-5 細骨材の水浸計量およびコンクリートの試験結果

NO.	実測値		計算値 (kg)		練混ぜ 量 (L)	スラン プ フ ロー (cm)	O漏斗 流下時間 (秒)	空気量 (%)	圧縮強度 28日 (N/cm ²)
	質量 (kg)	容積 (L)	水 W _i	細骨材 S					
1	60.93	29.86	10.57	50.36	69.9	600	8.7	5.1	59.9
2	60.95	29.91	10.63	50.32	69.9	610	8.1	5.1	59.1
3	60.85	29.77	10.46	50.39	70.0	590	9.1	5.1	60.0
4	60.84	29.95	10.76	50.08	69.5	600	8.8	5.2	59.1
5	67.01	33.37	12.48	54.53	75.7	600	8.9	4.6	61.9
6	60.94	29.75	10.38	50.56	70.2	635	7.6	4.7	60.8

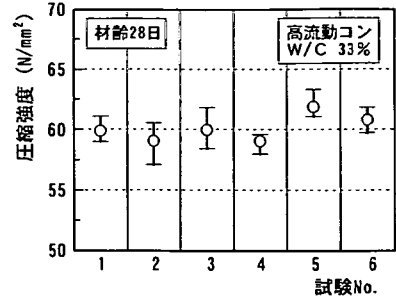


図-10 パッチ間の圧縮強度のばらつき

5. まとめ

細骨材の表面水変動に左右されず、細骨材と水を正確に計量できる水浸細骨材計量方式によるコンクリート製造システムの実用性に関して検証した。本論文の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 水浸計量方法のうち、容積計測方式では、水浸細骨材の質量を設定どおり計量しても表面水の変動に伴い容積が変化するので、細骨材量の増減に応じて練混ぜ量を補正する必要がある。一方、容積制御方式の場合には、容積一定で細骨材を水浸させるので、質量が設定値に達した時点で各材料とも所定量を計量することができる。
- (2) 水浸計量方式において、水の計量誤差を1%以下とするには容積の計量誤差を約0.3%以内に抑制する必要がある。各種条件下で水浸細骨材を作製した結果、計量誤差は、細骨材の含水状態や水浸細骨材充填率、締固めの有無によらず表面水率換算で±0.3%以内に収まり、実用上十分な精度で計量できることが確認された。
- (3) 細骨材を水浸させる場合、実積率が小さい細骨材を用いた場合ほど、締固めによる充填効果が大きい。
- (4) 細骨材の水浸状態や2次計量水の混和剤濃度によ

らず、同等の品質を有するコンクリートを製造できる。
(5) 水浸計量方式によれば、購入者が各材料の計量結果を適正に評価でき、品質保証の観点からも合理的で信頼性の高い製造システムになり得ると期待される。

今後は、この水浸計量方式を実機プラントに適用し、品質変動に関する各種データを収集する予定である。

参考文献

- 1) 阿部淳一, 小山 明: 使いこなし技術 I, 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.
- 2) 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.
- 3) 近松竜一, 十河茂幸: 水浸細骨材計量方式による信頼性の高いコンクリートの製造システムに関する基礎研究, 土木学会論文集, No. 676/V-51, pp. 19-26, 2001. 5.
- 4) 近松竜一, 十河茂幸: 細骨材の表面水に左右されないコンクリートの製造方法に関する研究, 第55回セメント技術大会講演要旨集, pp. 286-287, 2001. 5.

(2001. 8. 1受付)

PRACTICAL STUDY ON HIGH RELIABILITY CONCRETE PRODUCTION SYSTEM WITH NEW BATCHING METHOD BY IMMERSING SAND IN WATER

Ryuichi CHIKAMATSU and Shigeyuki SOGO

In order to regulate the quality of concrete, the production should be begun with accurate measurement of the specified quantities of materials. However, the accurate and quick measurement of the surface moisture of fine aggregate is difficult for most production systems currently in operation in ready-mixed concrete plants. To solve this problem, the authors devised "the immersed fine aggregate batching method," in which fine aggregate is immersed in water and batched in a saturated condition, to calculate accurate quantities of water and fine aggregate independent of fluctuating surface water. This paper reports on the verification tests for putting this concrete production system, in which immersed fine aggregate is batched, into practical use. Batching control of immersed fine aggregate and specifications of the equipment are also described, while reporting the quality confirmation test results made using this method.