

論文 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研究

近松竜一*1・十河茂幸*2

要旨：信頼性の高いコンクリートを製造するには、骨材の表面水率を正確に計測する必要がある。しかし、材料の貯蔵状態や製造時の管理状態によっては表面水を適正に把握することが難しく、製造技術者を悩ませているのが現状である。そこで、細骨材の表面水管理が要らない水浸細骨材計量方法を考案し、その実用性について検討した。

キーワード：細骨材、表面水、水浸細骨材計量方法、高信頼性コンクリート製造システム

1. はじめに

コンクリートを製造する際、その信頼性を評価する尺度となるのは「品質の安定性」である。そして、一定した品質のコンクリートを製造するには、コンクリートを構成する各材料毎に所定の量を正確に計量することが基本となる。

コンクリートの配合設計に際して、細骨材や粗骨材は、表面乾燥飽水状態で取り扱うことになっている。これは、骨材が乾燥した状態では練混ぜ時に吸水し、フレッシュコンクリートの性質が変化し易いためである。しかし、骨材を常に表面乾燥飽水状態に調整することは困難であり、実用上は湿潤状態で取り扱い、表面水率を測定して骨材表面に含まれる水量を補正し、骨材と水量を計量する方法が用いられている。

ところが、細骨材は通常の貯蔵状態でも含水率が安定しにくく、積み上げた状態では上下で表面水率が異なり、供給ロット毎に変動するのが常である。そして、この細骨材表面水の変動こそが、コンクリート製造時の品質変動の主要因であることは周知のとおりである¹⁾。

この対策として、連続的に表面水率を計量し、迅速に補正する各種の方法が試みられている。これまでに、マイクロ波方式、静電容量方式、赤外線方式、中性子方式などの各種測定機器が

開発され、既に実用化されているが²⁾、測定精度やメンテナンス、補正の迅速対応などの面で検討の余地が残されている³⁾。また、一方では、遠心力装置を用いて細骨材の表面水を一定に制御する方法も実用されているが⁴⁾、装置が大掛かりとなるうえ、処理に際して細粒分が失われる場合があることも指摘されている。

そこで、著者らは、細骨材表面水率の変動によらず常に正確な水量を計量できる方法として、任意の含水状態の細骨材に対し、これらを飽水浸潤状態で計量する方法を新たに考案した。この方法は、細骨材を水中に浸した状態で、その容積と質量をもとに、細骨材と水の密度差を利用して両者の質量を算出する方法である。表乾状態で計算される細骨材の量を表乾状態に調整しないで計量する逆転の発想を持ち込んだもので、この方法によれば、細骨材の表面水を管理する必要がなく、効率的に目的とする品質のコンクリートを製造することができる。

本論文では、この水浸方式による細骨材計量方法の概要を説明するとともに、新計量システムを実用化する上での技術的課題に対する各種検討ならびに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安定性に関する検証結果等について示すものである。

*1：大林組技術研究所 土木材料研究室 副主任研究員 工修

*2：大林組技術研究所 土木材料研究室 室長 工博

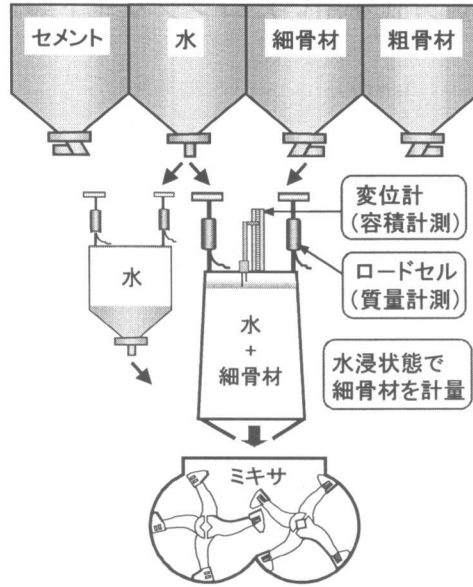


図-1 水浸細骨材計量方式を用いたコンクリート製造の概念

2. 水浸細骨材計量方法の提案

水浸細骨材計量方法は、図-1に示すように、予め水を入れた容器に細骨材を加え、飽和含水状態で混合物の容積と質量を計量し、両者の密度差を利用して水と細骨材の質量を算出する。この考えに基づく計算式を以下に示す。

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

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

式(1)、式(2)より

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

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

ここで、

M_s ；細骨材の質量、 ρ_s ；細骨材の表乾密度

M_w ；水の質量、 ρ_w ；水の密度

M_f ；細骨材と水の質量の和

V_f ；細骨材と水の容積の和

これらの計算式は、以下の条件が前提となる。

- 1) 細骨材と水の密度が既知である。
- 2) 細骨材の投入時に気泡を巻き込まない。

また、この方法をコンクリートの製造に適用するには、次の条件を満たす必要がある。

- 3) 細骨材とともに計量する水は、練混ぜに必要な全水量と同量かそれより少ないこと。

これらの要件については次章で詳述する。また、本水浸計量方法では、粗骨材の取扱いに関して、細骨材より表面水の変動が小さいものとして、従来どおり表面水率を設定して補正することを前提としている。

水浸細骨材計量方法を用いた場合のメリットとしては、以下の諸点が挙げられる。

- 1) 水および細骨材の計量誤差が小さくなることから、コンクリートの品質変動が低減される。その結果、配合の割増し係数を小さくすることが可能となり、より経済的で耐久的なコンクリートを製造できる。
- 2) 各材料の計量値を用いて製造したコンクリートの配合を確認できる。この結果、印字記録により配合を保証することが可能となり、コンクリートの品質検査の合理化が図れる。
- 3) 細骨材の表面水率管理が不要になる。また、コンクリートの各種品質試験をより簡略化できるので、品質管理の省力化につながる。

3. 水浸細骨材計量方法の実用性の検討

3.1 各種要因が計量精度に及ぼす影響

(1) 材料密度の影響

水の密度は概ね一定で、スラッジ水を用いる場合には濃度に応じた値を設定すればよい。

細骨材の表乾密度は、従来の計量法でも一定として取り扱われている。同一産地で採取される骨材では顕著な変動はなく、ロット毎に確認すれば大きな誤差を生じないと考えられる。

(2) 水浸細骨材中への気泡混入の影響

細骨材投入時に気泡が混入すると容積に誤差が生じる。そこで、ローリング式のエアメータを計量容器とし、JIS A 1118-1977「フレッシュコンクリートの空気量の容積による試験方法(容積方法)」に準拠して水浸細骨材中の気泡量を測定した。その結果、材料の投入順序として、水を先に入れ、細骨材を分散投入することで、気泡の混入を抑制できることを確認した⁵⁾。

(3) 計量器の精度、計測誤差の影響

JIS A 5308によれば、骨材の計量誤差は3%以内、練混ぜ水の計量誤差は1%以内と規定されている。練混ぜ水の計量誤差を小さく設定しているのは、コンクリートの品質に及ぼす単位水量の影響を考慮してのことであり、目標とする水セメント比や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。本計量方法は、その原理から考えても計算上は正確であるが、細骨材と水の合計容積と質量を計量するため、所要の許容誤差の範囲内で計量するのに必要な計量器と計算上の精度について試算してみる。

まず、計量器の精度に関して、ロードセルの測定精度を η_w 、容積計量の測定精度を η_v とすると、水の計量誤差 Δw との関係は、以下のよう表すことができる。

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

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

ここで、

f ; 水浸細骨材中の細骨材の充填率

ρ_s ; 細骨材の表乾密度、 ρ_w ; 水の密度

一例として、水の計量誤差を1%、水浸細骨材充填率を0.60、細骨材表乾密度を 2.60g/cm^3 と仮定すると、 $\eta_w \leq 1/500$ 、 $\eta_v \leq 1/400$ と試算される。これに、ロードセルの割増し、練混ぜ量に対応した計量値の変動を考慮すると、汎用型ロードセル(最小精度:1/1000)より若干精度の良いものを用いることで、細骨材より計量値が小さい練混ぜ水に対しても実用上は所要の計量精度を確保することができる。

次に、水浸細骨材の質量と容積から、細骨材、水の計量値を計算する場合の誤差に関しては、水浸細骨材の質量と容積の計測誤差をそれぞれ α_w 、 α_v とすると、

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

$$M_s' / \rho_s + M_w' / \rho_w = V_f(1 + \alpha_v) \quad (2')$$

水の計量誤差を Δw とすると、

$$\Delta w = (\alpha_v - k \alpha_w) / (1 - k) \quad (7)$$

$$k : f + (1 - f) \rho_w / \rho_s$$

気泡の巻込みの影響に関する試算例として、水浸細骨材充填率 f を0.60、細骨材の表乾密度を 2.60g/cm^3 とし、水浸細骨材の質量の計量誤差がないものと仮定すると、水の計量誤差を1%以内とするには、水浸細骨材容積の誤差を約0.3%以内に抑制する必要があると試算される。

3.2 水浸細骨材の高密度充填に関する検討

水浸細骨材の計量方法では、細骨材とともに計量する水量の総和が練混ぜに必要な水量より少ないことが前提となる。また、試料中の細骨材充填率を大きく設定すれば2次計量水が多くなり、混和剤の添加調整が容易となる。そこで、水浸細骨材の高密度充填方法について検討した。

細骨材は木更津産陸砂(表乾密度 2.64g/cm^3 、吸水率1.58%、実積率64.4%)を用い、容積が約10Lの円筒容器($\phi 240 \times 220\text{mm}$)を使用した。

細骨材のみを試料とした場合、締固めを行わない場合の充填率は約57%、骨材の実積率試験

(JIS A 1104)に準じた場合は約 64%，パイプレータにより振動締固めを行った場合でも約 66%の充填率であった。

これに対して、容器内に予め水を投入し、後から細骨材を投入すると、締固め無しの場合でも約 67%程度の充填率となり、さらにパイプレータによる締固めを併用した場合には最大で約 74%まで充填率が增大する結果となった。水浸状態で細骨材を計量した場合には充填率が增大すること、この”水締めによる充填効果”は、振動締固め作用によってさらに高められることを確認した⁵⁾。

3.3 レディーミクストコンクリートへの適用性について

大阪地区におけるレディーミクストコンクリートの標準配合を対象に、各配合中の水と細骨材の単位量を用い、水浸細骨材充填率の最小設定値(F min)を試算した。調査結果の一例として、普通コンクリート配合でのF min を呼び強度とスランプの関係で整理し、図-2に示す。

水浸細骨材充填率の最小設定値は、約 45～66%の範囲で、呼び強度が大きい(水セメント比が小さい)配合ほど、また、スランプが大きい(単位水量が多い)配合ほど設定値が小さくなる傾向が認められる。

また、日本建築学会が平成2年度に全国426の生コン工場を対象に実施した呼び強度21、スランプ18cmの配合調査結果を用いてF minを試算した結果を表-4に示す。

単位水量と細骨材量から算定した充填率は、いずれも約65%以下で、使用細骨材の実積率とほぼ同等以下であった。つまり、水浸細骨材計量方法を用いる場合には、水面を細骨材の上面とほぼ同一にすると、所定のコンクリートを製造するには水量をさらに追加する必要があり、混和剤を含む二次水として計量することになる。

JIS A 5308のレディーミクストコンクリートのその他の配合についても試算した結果、ほぼ全ての配合に適用できることが確認された。

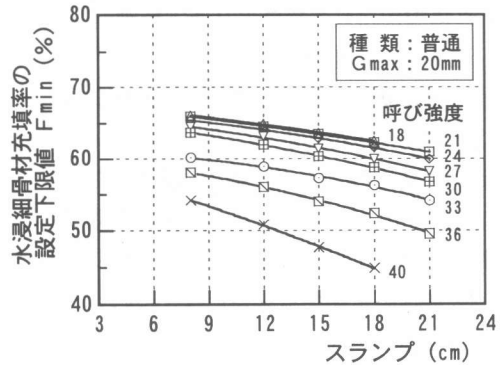


図-2 スランプと水浸細骨材充填率の関係

表-4 水浸細骨材充填率下限値の試算結果

地区	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (m ³ /m ³)		Fmin (%)	使用細骨材実積率 (%)
			水	細骨材		
北海道	56.5	44.5	0.167	0.309	64.9	64.8
東北	57.0	46.0	0.175	0.314	64.2	63.0
関東	61.0	47.0	0.174	0.324	65.1	64.2
中部	58.5	46.0	0.174	0.316	64.5	63.5
近畿	58.5	46.5	0.184	0.312	62.9	62.3
中国	58.5	48.0	0.189	0.319	62.8	61.7
四国	58.0	47.0	0.185	0.315	63.0	61.0
九州	58.0	47.0	0.184	0.316	63.2	62.4
全国	58.5	46.5	0.180	0.315	63.7	63.0

※対象配合;呼び強度21,スランプ18,AE減水剤使用

4. 水浸細骨材計量方法により製造したコンクリートの品質検証

4.1 水浸計量方法による品質安定性の確認

細骨材の表面水が変動した場合を想定し、水浸細骨材計量方法を用いて製造したコンクリートの品質安定性について調べた。

試験配合は、水セメント比55%、スランプ8cmの普通コンクリートとした。細骨材は木更津産陸砂(表乾密度2.59g/cm³)を用いた。予め、表面水率を5%に調整し、実測値に対して設定値を故意に0, ±1, ±2%に変化させた。水浸細骨材は、細骨材充填率を65%とし、締固めを行わないで作製した。なお、比較のため、現行方法で表面水の設定誤差を補正しない場合についても試験した。これらの試験結果を図-3に示す。

現行の計量方法では、細骨材表面水率を一旦

設定すると、そのバッチは表面水が補正されず、表面水率の設定誤差に対応してコンクリートの品質が大きく変動することになる。本実験結果では、表面水率 $\pm 2\%$ の増減に伴い8cmのスランプ値が4~15cmの範囲で変動し、圧縮強度も大きく影響する結果となった。

これに対し、水浸細骨材計量方法では、水浸細骨材の質量と容積の測定値をもとに正味の細骨材量と水量が算出できるので、自動的に表面水率の変動がチェックされ、各材料の計量設定に反映される。そのため、当然のことであるが、いずれの特性値も品質の変動がほとんどなく、ほぼ一定の結果が得られている。

4.2 水浸細骨材を用いたコンクリートの製造

水浸細骨材の計量装置(写真-1)を作製し、表面水率を測定しないで各材料を計量し、配合通りに正確にコンクリートが製造できることを検証することとした。

試験に供したコンクリートの配合を表-2に示す。使用した細骨材は、木更津産陸砂(表乾密度 2.59g/cm^3 、粗粒率2.70)で、表面水率については事前に調整を行わなかった。ただし、検証実験の都合上、確認のため表面水率を測定した結果、 $3.5\% \sim 8.5\%$ の範囲であった。

細骨材の表面水率を設定しないで、水浸細骨材計量方法で計量して製造したコンクリートの試験結果を表-3に示す。

この結果、細骨材を水浸状態で計量して水量と細骨材量を算出して配合を調整することで、ほぼ同等のフレッシュコンクリートが得られ、硬化後のコンクリートの強度特性も同様で、細骨材の表面水率の変動に左右されず、一定した品質のコンクリートが製造できることが明らかになった。強度試験の個々のデータを図-4に示す。同一バッチから採取した供試体間の偏差よりもバッチが異なる供試体における平均値の変動の方が小さい。しかも、これらの試験結果が細骨材の表面水率を測定しない場合の結果であることは評価に値すると考えられる。

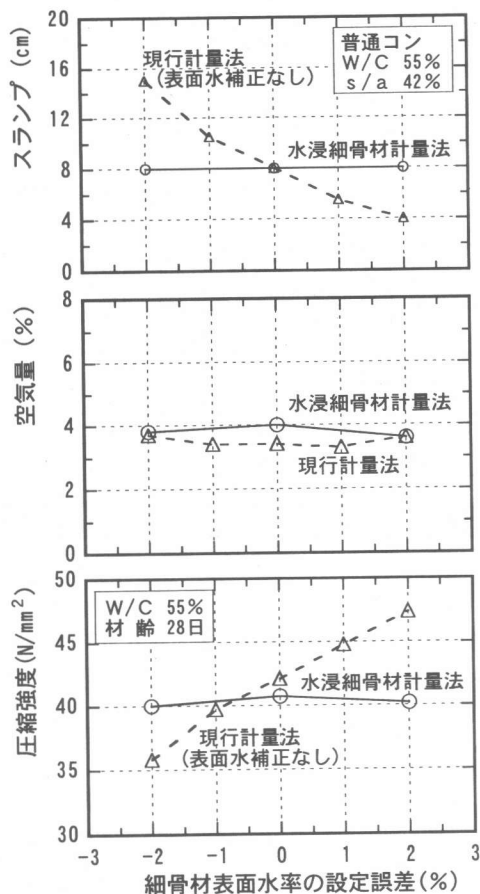


図-3 表面水設定誤差による品質の変動

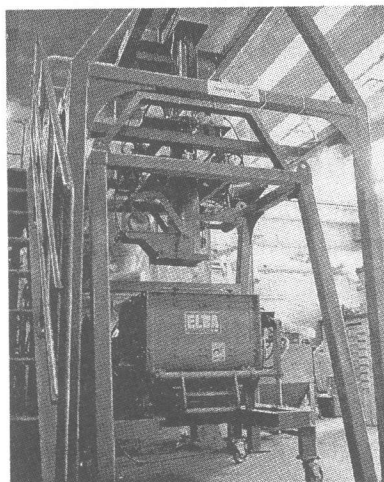


写真-1 水浸細骨材計量装置

表-2 水浸式細骨材計量方式による試験に供した配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ フロー (mm)	空気量 (%)	W/C	s/a	単 位 量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	石粉 LF	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE減水剤
20	600±50	4.5±1.5	33.0	47.0	175	530	50	720	828	6.67

表-3 水浸細骨材計量方式によるコンクリートの製造結果

NO.	STEP-1(水浸細骨材の作製)				STEP-2(その他材料の計量)				コンクリートの各種品質			
	実測値		計算値 (kg)		練混 ぜ量 (L)	計量値 (kg)			スランブ フロー (mm)	O漏斗 流下時間 (秒)	空気量 (%)	圧縮強度 28日 (N/mm ²)
	質量 (kg)	容積 (L)	水 W1	細骨材 S		2次水 W2	セメント C	粗骨材 G				
1	60.93	29.86	10.57	50.36	69.9	1.67	37.08	57.93	600	8.7	5.1	59.9
2	60.95	29.91	10.63	50.32	69.9	1.59	37.05	57.87	610	8.1	5.1	59.1
3	60.85	29.77	10.46	50.39	70.0	1.78	37.10	57.96	590	9.1	5.1	60.0
4	60.84	29.95	10.76	50.08	69.5	1.41	36.87	57.59	600	8.8	5.2	59.1
5	67.01	33.37	12.48	54.53	75.7	0.78	40.15	62.73	600	8.9	4.6	61.9
6	60.94	29.75	10.38	50.56	70.2	1.91	37.23	58.15	635	7.6	4.7	60.8

5. まとめ

細骨材の表面水の変動によらず正確な水量を計量できる水浸細骨材計量方式を提案し、その有用性を実験的に検証した。本論文の範囲内で得られた知見を以下に示す。

(1)レディーミクストコンクリートの標準配合から求めた水浸細骨材充填率の設定下限値は、富配合の場合ほど小さく、使用細骨材の実積率と同等以下であり、ほぼ全ての配合に水浸細骨材計量方法が適用できるものと考えられる。

(2)細骨材は水浸状態で容器に詰めると充填率が高まり、振動作用により相乗的に増大する。一方、水浸細骨材中への気泡の混入を防ぐには、水を先行して入れ、細骨材をなるべく分散させて投入するのが効果的である。

(3)水浸細骨材計量方法は、水浸細骨材の質量と容積の測定値から各材料の計量値を算出する過程で自動的に水量誤差が補正され、各材料の計量補正にフィードバックされる。したがって、バッチ間の細骨材表面水の変動に左右されることなく常に品質が一定したコンクリートを製造できる信頼性の高いシステムといえる。

今後は、さらに計量精度、計量速度等の実験的検証を行い、水浸細骨材計量方法による高信頼性製造システムの実用化を図る予定である。

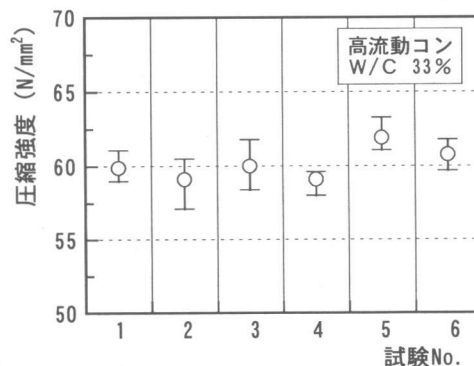


図-4 コンクリートの圧縮強度試験結果

【参考文献】

- 1)コンクリート工学協会編：コンクリートの製造システム研究委員会報告書，1992.3
- 2)阿部淳一ほか：特集骨材の現状と展望，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)佐藤 健；生コン工場での骨材使用の現状と問題点，セメントコンクリート No.618, pp.84-92, 1998.8
- 4)生コン工場の自動化・省力化の現状と方向，月刊生コンクリート，Vol.15, 1996.11
- 5)十河茂幸，近松竜一：高信頼性コンクリートの製造システムの開発（その1），大林組技術研究所報，No.61, pp.57-64, 2000.7