

# 論文 骨材水浸式計量による品質保証型コンクリート製造システムの開発

近松 竜一\*1・十河 茂幸\*2・河島 勝也\*3・小谷口 雅義\*4

**要旨**：コンクリート構造物の耐久性を左右する単位水量を合理的に管理できる信頼性の高い製造システムを開発した。本文では、骨材の表面水を効率的かつ適正に把握できる水浸式計量によるコンクリート製造システムの概要および実機プラントに本システムを組み込んだ場合の表面水管理やコンクリートの品質安定性などの検証結果について示す。

**キーワード**：細骨材, 表面水率, 水浸式計量, 製造システム, 品質保証

## 1. はじめに

最近では、コンクリート構造物の耐久性向上の観点から、荷卸し時にフレッシュコンクリートの単位水量を検査する事例が増加している。コンクリートの品質を変動させる材料の要因としては骨材の影響が最も大きく、とりわけ細骨材の表面水管理が重要である<sup>1)</sup>。

著者らは、この骨材の表面水に起因した練混ぜ水管理の課題を解決するために骨材を飽和含水状態で計量する“水浸式計量”を考案した<sup>2)</sup>。これまでに、この骨材水浸式計量の要件や具体的な仕様、水浸式計量を細骨材に適用し製造したコンクリートの品質について報告した<sup>3)</sup>。

本論文では、細・粗骨材ともに表面水を効率良く適正に把握できる製造システムを提案するとともに、実機プラントで細骨材の一部に水浸式計量を適用し製造したコンクリートの品質安定性などの検証結果について示す。

## 2. 骨材水浸式計量を用いた製造システムの提案

### 2.1 水浸式計量による骨材の表面水管理

細骨材を対象とした場合の水浸式計量の概念を図-1に示す。細骨材を水に浸した状態で容積と質量を測定し、細骨材と水の密度差から両者の質量を算出する。計量に併せて表面水率も算出できる。各材料の計算式を以下に示す。

$$M_w + (M_s + M_{sw}) = M \quad (1)$$

$$M_w / \rho_w + (M_s / \rho_s + M_{sw} / \rho_w) = V \quad (2)$$

ここで、 $M_w$ ,  $M_s$ ,  $M_{sw}$ ,  $M$ はそれぞれ、細骨材を水浸させる1次水の質量、表乾状態の細骨材の質量、細骨材表面水の質量、水と細骨材の合計質量、 $\rho_w$ は水の密度、 $\rho_s$ は細骨材の表乾密度、 $V$ は水浸細骨材の容積である。

水と細骨材それぞれの質量は、上記の式から次のように表される。

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

$$M_w + M_{sw} = \rho_w (\rho_s V_f - M_f) / (\rho_s - \rho_w) \quad (4)$$

また、表面水率 $\beta$ は以下の式から計算される。

$$\beta = (M_{sw} / M_s) * 100 \quad (5)$$

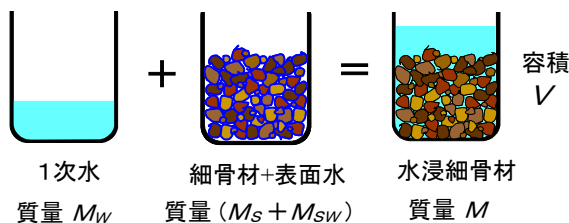


図-1 細骨材水浸式計量の概要

\*1 株式会社大林組技術研究所 土木材料研究室 材料施工グループ長 工修 (正会員)

\*2 株式会社大林組技術研究所 副所長 工博 (正会員)

\*3 水資源機構 徳山ダム建設所 機械課 主幹

\*4 水資源機構 徳山ダム建設所 第二ダム工事 主幹

全ての骨材に水浸式計量を適用すれば表面水の変動に関係なく水量を管理することができる。しかし、実際には配合により水量が決まっているので全量の水浸式で計量するのは難しい。そこで、骨材の一部を水浸式で計量し、残りは併せて計算される表面水率を用いて表面水を補正する方法が実用的である。この方法によれば、細・粗骨材ともバッチ毎に表面水を管理することができる。なお、この水浸式計量と表面水補正を併用した方式（以下、分割型水浸式計量と呼称）では、水浸させる骨材と残りの骨材が同じ含水状態とみなせることが前提条件となる。

## 2.2 材料の計量フローおよび計量設備の構成

分割型水浸式計量のフローを図-2に示す。細・粗骨材ともに分割型水浸式計量を適用し、計量に併せてバッチ毎に表面水量を補正する。まず、水浸用1次水を計量器に投入し、骨材を加えて水浸骨材を計量する。次に、水浸骨材が所要の質量に達した時点で容積を計測し、水と骨材の質量、表面水率を算出する。残りの骨材やセメントについては、水浸式計量と併行して計量し、表面水率が確定した後で骨材、練混ぜ水それぞれの不足分を追加計量する。

分割型水浸式計量設備の構成例を図-3に示す。貯蔵ロットの代表サンプルとして水浸用骨材を採取するために骨材貯蔵ビン排出部を二股に分岐した分取装置を設置し、それぞれの排出ゲート直下に水浸用骨材と骨材の計量器を配置する。また、骨材を投入する際に水浸骨材中に気泡が巻き込むのを防ぐため、計量器の上に鉄筋を格子状に配置した振動ふるいを設け、骨材粒子を分散させながら計量器に投入する。

水浸骨材計量器には質量計用のロードセルと水浸骨材の水面を計測するセンサを設ける。また、計量した水浸骨材の付着を防止し計量器の水密性を確保するため、計量器の底蓋や投入シュートの洗浄装置を配備する。なお、洗浄水は一定量で、練混ぜ水の一部として取り扱う。

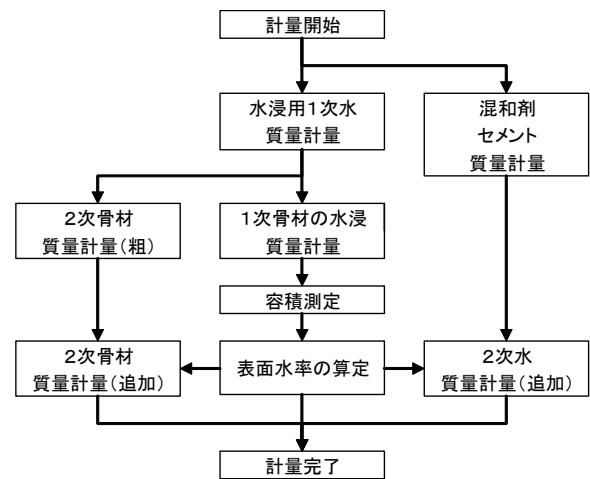


図-2 分割型水浸式計量における計量フロー

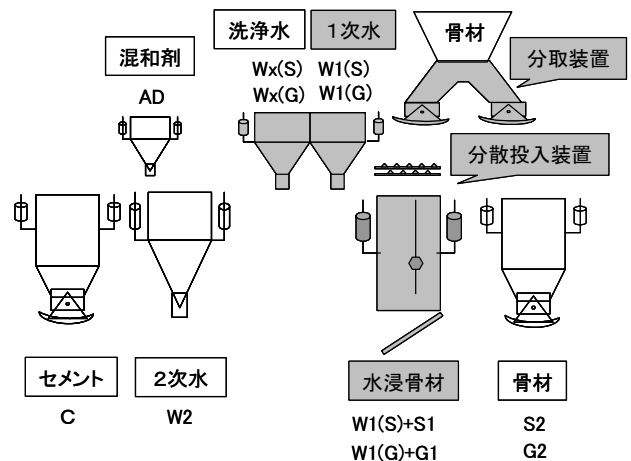


図-3 分割型水浸計量設備の構成

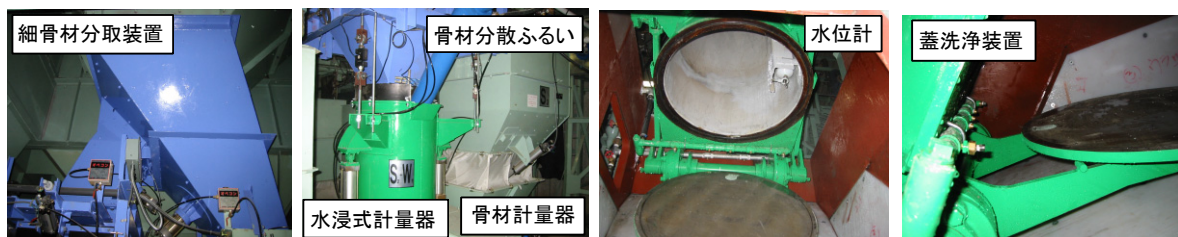


写真-1 分割型水浸式計量設備の実施例

表-1 分割型水浸式計量を用いたコンクリートの製造サイクル例

| 計量対象                         | 0                              | 10 | 20 | 30 | 40     | 50 | 60 | 70 | 80    | 90 | 100 | 110 | 120    | 130 | 140 | 150 | 160   | 170 | 180 | 190 | 200    | 210 | 220 | 秒  |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------------------|--------------------------------|----|----|----|--------|----|----|----|-------|----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|--------|-----|-----|----|-------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1次水 W1(S,G)<br>1次骨材 S1, G1   |                                |    |    |    | 投入     |    |    |    |       |    | 投入  |     |        |     |     |     |       |     |     |     |        |     |     | 投入 |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 洗浄水 Wx(S,G)                  |                                |    |    |    |        |    |    |    |       |    |     |     |        |     |     |     |       |     |     |     |        |     |     |    | 投入                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2次骨材 S2, G2<br>補正骨材 ΔS2, ΔG2 |                                |    |    |    |        | 投入 |    |    |       |    | 投入  |     |        |     |     |     |       |     |     |     |        |     |     |    | 投入                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 混和剤 AD<br>2次水 W2<br>補正水 ΔW2  |                                |    |    |    |        |    |    |    |       |    |     |     |        |     |     |     |       |     |     |     |        |     |     |    | 投入                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| セメント C                       |                                |    |    |    |        |    |    |    |       |    |     |     |        |     |     |     |       |     |     |     |        |     |     |    | 投入                      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 計量工程                         | 計量40秒                          |    |    |    | 投入15秒  |    |    |    | 計量40秒 |    |     |     | 投入15秒  |     |     |     | 計量40秒 |     |     |     | 投入15秒  |     |     |    |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 練混ぜ工程                        |                                |    |    |    | 練混ぜ30秒 |    |    |    | 排出15秒 |    |     |     | 練混ぜ30秒 |     |     |     | 排出15秒 |     |     |     | 練混ぜ30秒 |     |     |    | 排出15秒                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 製造サイクル                       | 1バッチ毎の単独運転時 36バッチ/h (100秒/バッチ) |    |    |    |        |    |    |    |       |    |     |     |        |     |     |     |       |     |     |     |        |     |     |    | 連続運転時 60バッチ/h (60秒/バッチ) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 連続運転時 60バッチ/h (60秒/バッチ) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

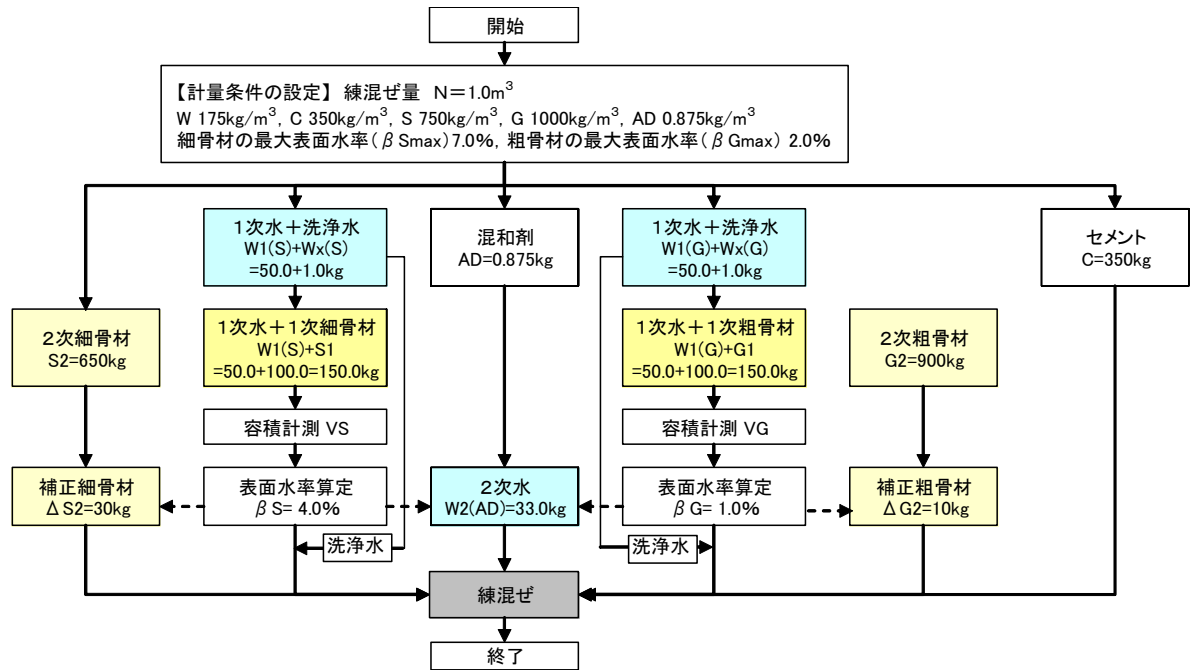


図-4 分割型水浸式計量を用いたコンクリート材料の計量試算例

### 2.3 分割型水浸式計量の試算例

計量の試算例を図-4に示す。水セメント比50%、単位水量  $175\text{kg/m}^3$  のコンクリート  $1\text{m}^3$  を計量する場合、細・粗骨材の表面水率の上限をそれぞれ7%、2%と仮定すると、約  $100\text{kg/m}^3$  を水浸用1次水に使用し、約  $200\text{kg}$  の骨材を水浸式で計量することができる。なお、この水浸骨材量は骨材量全体の約10%強に相当し、各骨材の管理状況に応じて細・粗骨材の水浸計量の割合を設定することで表面水管理の精度を高め、より信頼性が高い製造システムを実現できるも

のと考えられる。

分割型水浸式計量を適用した場合の製造サイクルの試算例を表-1に示す。現状の生コンプラントにおける一般的な製造サイクルとして60バッチ/時間を確保するには水浸式計量に要する時間を約30秒/バッチ以内とし、表面水の補正による追加計量を含めて約40秒で全ての計量を完了させる必要がある。水浸式計量を定量式とし、微計量の工程を省略し計量時間を短縮することにより、現状のシステムにおける製造能力に見合う計量サイクルを設定できると考えられる。

### 3. 骨材水浸式計量システムの検証結果

#### 3.1 水浸式計量による細骨材表面水率の算定<sup>4)</sup>

細骨材の一部に水浸式計量を適用し表面水率の算定精度を検証するため、3水準の含水状態の砕砂を使用し、水浸計量による算定値と貯蔵ゲートから試料を採取し JIS A 1111 により測定した値を比較した。結果を図-5 に示す。

表面水率が6%以下の範囲では、両者の相違は最大 0.5%程度とほぼ一致する結果が得られた。一方、表面水率が8%を超える範囲では、水浸計量による算定値は概ね一定であるのに対し JIS による測定値は数%のレンジで変動する結果となった。細骨材の含水率が高い場合には表面水が下方に移動し不均一となりやすく、サンプル量が約 500g と少ない後者の場合は試料量に起因した誤差の影響でばらつきが生じたものと考えられる。

実機プラントでのコンクリート製造に際して細骨材の一部に水浸式計量を適用して算定した表面水率の時系列推移の例を図-6 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。貯蔵中に表面水が下方へ移動するため製造開始直後は表面水率が大きく、徐々に低下して安定化する状況が示されている。

ケースBは、表面水率が急変した事例である。約 200 バッチまでは2~4%の範囲を推移しているが、その後一時的に7%近くまで急増し、再び約4%まで低下している。この急激な変化は骨材ロットの切替えに伴い一時的に含水率の高い細骨材が混入したことによるものと推測され、バッチ毎に表面水率を算定することで急激な変動にも追従できることを示すものと考えられる。

#### 3.2 水浸式計量による粗骨材表面水管理の検討

実機プラントでのコンクリート製造において粗骨材計量時に設定した表面水率の変動状況を図-7 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、一般に粗骨材の表面水量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平均1.5%程度あり、最大で3%近い結果も示されている。

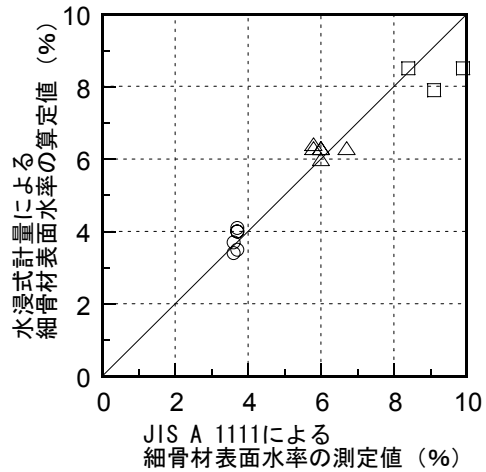


図-5 水浸計量による表面水率算定結果

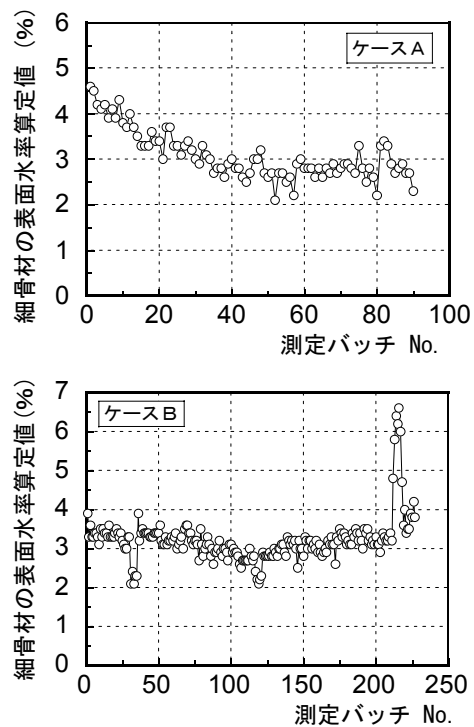


図-6 細骨材の表面水率算定値の時系列推移

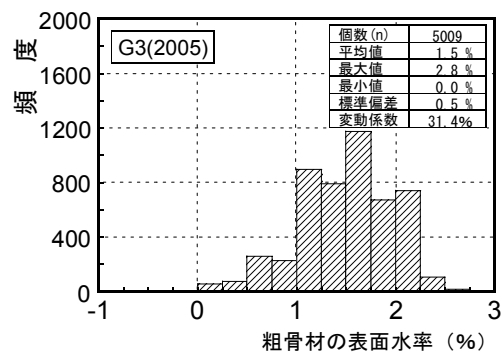


図-7 粗骨材の表面水率設定値の変動状況

粗骨材を一旦飽水状態にした後、気中に晒した場合の表面水率の経時変化を図-8に示す。粒径が大きい骨材ほど保水性は小さく、10-20mmの表面水率は数時間後には1%を下回っている。一方、5~10mmの細粒分は約2%、5mm以下の過小粒は3%台で、細粒分が多い場合には細骨材と同様に表面水率は高い水準となっている。

通常、粗骨材の表面水に関しては、絶対量が小さく変動幅も小さいことから定期的に測定し補正しているが、変動幅が数%に及ぶとすれば粗骨材も細骨材と同様に頻度を高めて表面水を管理する必要があると考えられる。そこで、粗骨材の表面水管理への水浸式計量の適用性に関して実験的に検証した。含水率を変化させた各種粗骨材を対象として、水浸式計量を適用し表面水率を算定した結果を図-9に示す。粗骨材

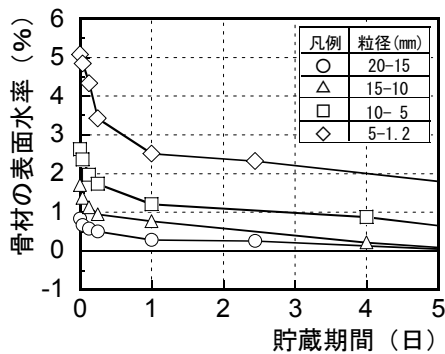


図-8 粗骨材の表面水率の経時変化

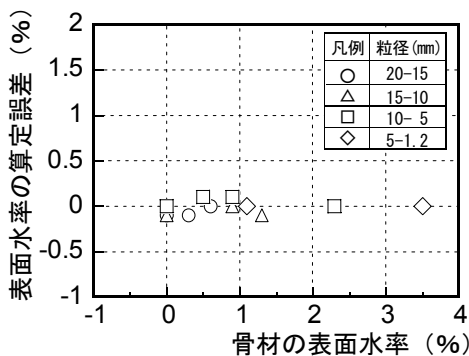


図-9 粗骨材の表面水率算定結果(粒度別)

は表面水の絶対量が小さく測定誤差が生じやすい条件にあるが、表面水率の水準によらずほとんど誤差がない結果が得られた。水浸式計量を適用すれば、細骨材に併せて粗骨材に対しても表面水を精度良く管理できると考えられる。

### 3.3 骨材水浸式計量を用いて製造した コンクリートの品質安定性

粗骨材または細骨材の一部に水浸式計量を適用したコンクリートの配合および品質を表-2および表-3に示す。

いずれのコンクリートも一定した品質が得られており、水浸式計量により水量が適正に補正されていると判断される。

次に、実機プラントで細骨材の一部(約15%)に水浸式計量を適用してコンクリートを製造し、それらの品質安定性について検証した<sup>4)</sup>。

表-2 検証に用いたコンクリートの配合

| 種類  | W/C (%) | s/a (%) | 単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |     |      |      |
|-----|---------|---------|----------------------------|-----|----|-----|------|------|
|     |         |         | W                          | C   | LF | S   | G    | AD   |
| 普通  | 55.0    | 40.0    | 173                        | 315 | —  | 712 | 1077 | 0.79 |
| 高流動 | 36.0    | 47.0    | 180                        | 500 | 50 | 734 | 834  | 8.25 |

普通ポルト(C):密度3.15g/cm<sup>3</sup>, 石灰石粉(LF):密度2.70g/cm<sup>3</sup>  
陸砂(S):表乾密度2.60g/cm<sup>3</sup>, 砕石(G):表乾密度2.64g/cm<sup>3</sup>  
AE減水剤(普通コン), 高性能AE減水剤(高流動コン)

表-3 水浸式計量および品質検証結果一覧

| 種類  | 骨材の表面水率*1 (%) |        |       |       | スランブ<br>(フロー)<br>(cm) | 空気量<br>(%) | 圧縮強度<br>f <sub>c28</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----|---------------|--------|-------|-------|-----------------------|------------|--|
|     | 細骨材<br>(S)    | 粗骨材(G) |       |       |                       |            |  |
| 普通  | (2.1)         | (0.0)  | (0.1) | (0.1) | 12.5                  | 4.0        | 38.5   |
|     | (2.7)         | 0.0    | 0.0   | 0.2   | 12.0                  | 4.1        | 38.4   |
|     | (2.9)         | 0.2    | 0.4   | 0.4   | 12.0                  | 4.3        | 37.9   |
|     | (2.7)         | 0.3    | 0.4   | 0.5   | 12.5                  | 4.2        | 38.4   |
|     | (2.9)         | 0.4    | 0.6   | 0.9   | 12.5                  | 4.1        | 38.3   |
| 高流動 | 3.3           | 0.3    | 0.4   | 0.5   | 11.5                  | 4.0        | 37.8   |
|     | (2.1)         | (0.0)  | (0.1) | (0.0) | 60.5                  | 4.8        | 63.8   |
|     | 2.0           | (0.0)  | (0.1) | (0.0) | 61.5                  | 4.9        | 64.1   |
|     | (2.1)         | 0.1    | 0.1   | 0.0   | 60.5                  | 4.8        | 64.1   |
|     | (2.1)         | 0.3    | 0.5   | 0.5   | 61.0                  | 4.7        | 63.8   |

\*1 水浸式計量での算定値。( )は表面水率を予め設定。

表-4 実機プラントでの水浸式計量の検証に用いたコンクリートの配合

| 粗骨材の<br>最大寸法<br>(mm) | プラント出荷時        |              | 水セメント比<br>W/C<br>(%) | 細骨材率<br>s/a<br>(%) | 単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> ) |           |          |                 |                 |           |
|----------------------|----------------|--------------|----------------------|--------------------|----------------------------|-----------|----------|-----------------|-----------------|-----------|
|                      | 目標スランブ<br>(cm) | 目標空気量<br>(%) |                      |                    | 水<br>W                     | セメント<br>C | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>4020(G2) | 粗骨材<br>2005(G3) | 混和剤<br>AD |
| 40                   | 9.0            | 4.5          | 61.0                 | 38.0               | 158                        | 260       | 709      | 639             | 532             | 2.87      |

フライアッシュセメントB種(密度2.88g/cm<sup>3</sup>), 砕砂(表乾密度2.67g/cm<sup>3</sup>), 砕石(表乾密度2.68g/cm<sup>3</sup>), AE減水剤

総量約 500m<sup>3</sup>のコンクリートを製造し、アジテータ車毎に出荷時のスランプおよび空気量を測定し、圧縮強度用供試体を採取した。試験に用いたコンクリート配合を表-4に示す。また、スランプおよび空気量の試験結果を細骨材表面水率の時系列推移とともに図-10に示す。

コンクリートの製造に用いた約 400 t の細骨材は、表面水率が約 2~5%の範囲内で不規則に変動する結果が示されている。これに対して、スランプは 9.5±1.5cm、空気量は 4.0±0.4%の範囲内で変動が低減される結果が得られた。また、圧縮強度については、図-11に示したように変動係数が 4%を下回り、ばらつきが小さいことが確認された。これらの結果は、細骨材の一部に水浸式計量を適用し表面水を適正に管理することで、品質の安定したコンクリートを製造できることを裏付けるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本論文の範囲内で得られた知見を以下に示す。

(1) 骨材の一部に水浸式計量を用いることでバッチ毎の表面水の変動に応じて練混ぜ水量を精度良く補正できる。表面水率が約 2~3%変動した場合でもスランプや空気量を許容範囲内に制御し、圧縮強度も変動係数が約 4%以下と安定した品質のコンクリートを製造できる。

(2) 10mm 以下の粗骨材は、一旦飽水させた後数時間気中に晒した場合でも表面水率が 2%以上と保水性が高く、過小粒を含め表面水を適正に管理する必要がある。水浸式計量を用いれば細骨材に比べて表面水の絶対量が小さい粗骨材に対しても表面水率を精度良く算定することができる。

(3) 細骨材、粗骨材の両者に水浸式計量を適用することで練混ぜ水の計量精度を向上させ、印字記録による単位水量の保証が可能となる。また、骨材総量の約 10%に水浸式計量を適用することで、時間当たり 60 バッチの製造サイクルを確保するとともに品質が安定したコンクリートを効率的に製造することができる。

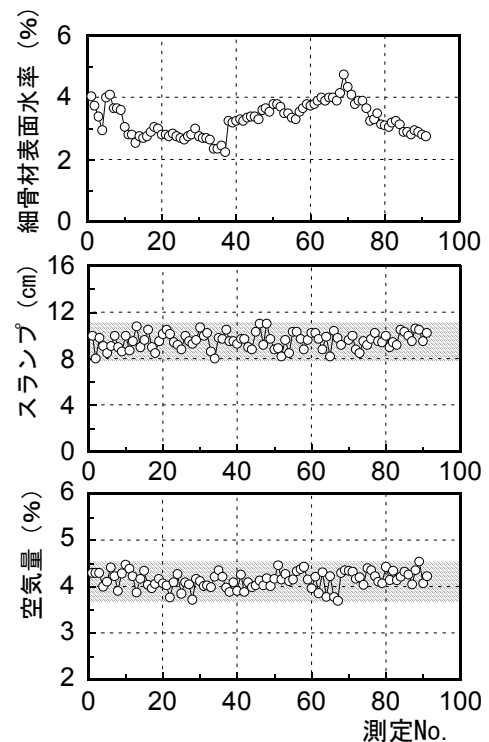


図-10 フレッシュコンクリートの品質管理結果

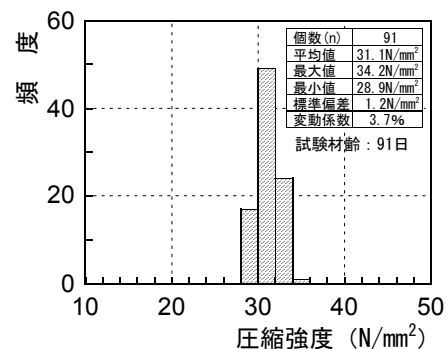


図-11 コンクリートの圧縮強度管理結果

#### 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, 1992.3
- 2) 近松竜一, 十河茂幸: 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, コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.2, pp.1159-1164, 2001.7
- 3) 近松竜一, 十河茂幸: 細骨材水浸式計量システムを用いたコンクリートの品質安定性, コンクリート工学年次論文集 Vol.25, No.1, pp.1085-1090, 2003.7
- 4) 三好哲也他: 細骨材水浸式計量による信頼性の高いダムコンクリート製造システムの開発, ダム工学 Vol.13, No.2, pp.70-78, 2003