

高周波加熱乾燥法による単位水量の推定に及ぼす各種要因の検討

A Study of Influencing Factors on Water Content Evaluation of Fresh Concrete using the Microwave Heat Dry Method

松田 拓 TAKU MATSUDA
蓮尾 孝一 KOICHI HASUO
谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO

単位水量推定試験に高周波加熱乾燥法を用いる場合の測定結果の補正方法として、1) 細骨材の吸水率の影響、2) セメントの結合水率の影響、3) ウェットスクリーニングの影響について検討を行った。検討結果から各補正値の評価方法を示し、電子レンジ法によるコンクリートの単位水量の算定方法を提案した。さらに、提案手法を超高強度コンクリートの品質管理に適用し、その有効性を確認した。

キーワード：単位水量、品質管理、高周波加熱乾燥法、骨材吸水率、セメント結合水率、ウェットスクリーニング、超高強度コンクリート

The following factors which influence the water content evaluation using the microwave heat dry method were investigated: 1) Absorption rate of fine aggregate, 2) Combined water rate of cement, 3) Extent of wet screening. The authors propose an evaluation method for water content using a microwave oven, which includes various correction techniques obtained from the above-mentioned results. In addition, the proposed method was applied to the actual quality control of high-strength concrete, and the effectiveness of the method was confirmed.

Key Words: Water Content, Quality Control, Heat dry Method with Microwave, Absorption Rate of fine Aggregate, Combined Water Rate of Cement, Wet screening, High-strength Concrete

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性向上の観点から、フレッシュコンクリートの単位水量を施工現場において管理することが重視されている。単位水量推定試験は、施工中にレディーミクストコンクリート工場や打設現場で実施されるため、簡便かつ迅速に行えることが求められる。また、推定結果により検査・品質管理を実施するためには、実用上支障のない範囲の精度が必要である。

原理がわかりやすく、比較的簡便で迅速に実施できる推定方法の一つとして、高周波加熱乾燥法(以下、電子レンジ法という)が挙げられる¹⁾。ただし、電子レンジ法の実施に際しては、骨材の吸水率やセメントの結合水率、ウェットスクリーニングの影響による推定値の偏り等、確認しなければならない要因がある^{1),2)}。したがって、これらの要因をそれぞれ適切に評価することにより、推定精度が向上し、施工時における単位水量の変動や異常の原因を把握することも容易になると考えられる。

本報では、電子レンジ法による単位水量推定値に影響する各種要因に関して室内試験による検討を実施し、その補正方法の提案を行った。さらに、Fc100N/mm²クラスの超高強度コンクリートの施工時における品質管理に提案した手法を適用し、その有効性を確認した。

2. 使用材料及び調査上の要因

一般に、電子レンジ法によるコンクリートの単位水量は、式(1)によって求められる。³⁾

$$W = \frac{(W_b - W_c)}{(W_b - W_a)} \times (C_0 + W_0 + S_0) + \frac{X}{100} \times C_0 - \frac{P}{100 + P} \times S_0 \quad (1)$$

W_a : 容器の質量(g), W_b : 採取した試料と容器の合計質量(g), W_c : 乾燥後の試料と容器の合計質量(g), C_0, W_0, S_0 : 調査上の水、セメント及び細骨材の単位量(kg/m³) X : セメント質量に対する結合水量の比率($x = 1.4$), 試験法による係数($= 0.02$)), P : 細骨材の吸水率(%)

ここでは、各因子に対する検討を室内試験で実施した結果を報告する。

(1) 細骨材の吸水率

細骨材の吸水率の試験値は、電子レンジで細骨材を加熱して求めたもののほうが、JIS A 1109 に定められた方法によるものよりも大きな値を示すことが指摘されている⁴⁾。そこで、表-1に示す5種類の細骨材を使用し、細骨材の吸水率を確認した。図-1は、それぞれの方法で求めた吸水率の結果を比較したものである。文献⁴⁾と同様に、電

表-1 細骨材種類

A	川砂(鬼怒川産) : 表乾密度2.57g/cm ³
B	山砂(千葉県万田野産) : 表乾密度2.59g/cm ³
C	砕砂(下都賀郡岩舟町産) : 表乾密度2.65g/cm ³
D	砕砂(茨城県岩瀬産) : 表乾密度2.58g/cm ³
E	ガラスビーズ(2mm) : 密度2.50g/cm ³

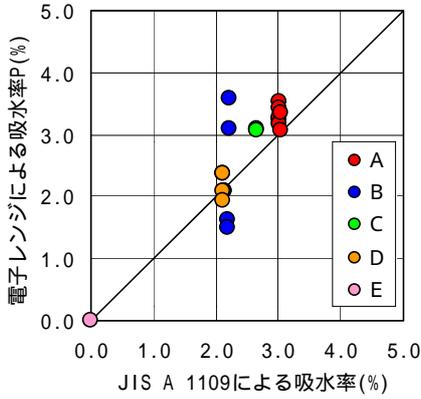


図-1 吸水率測定結果

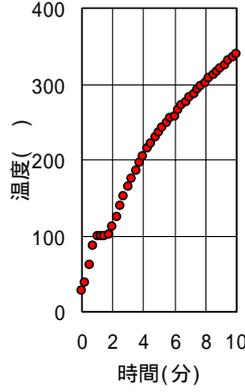


図-2 細骨材温度

電子レンジで求めた吸水率(P)はJIS法で求めた値とは異なり、JIS法よりも大きくなる場合が多い。図-2は、電子レンジ内で加熱中の細骨材温度の測定結果である。細骨材温度は10分間の加熱で約350 程度まで上昇し、JIS法による乾燥温度(105 ± 5)よりも高温となった。これより電子レンジによって加熱乾燥する場合は、JIS法で実施する場合と質量減少が異なると考えられることから、本検討では細骨材の吸水率を電子レンジによって求めた値を用いた。

(2) セメントの結合水率

図-3は普通ポルトランドセメント(N)、シリカヒュームセメント(SFC)および早強セメント(H)のペーストを電子レンジによって加熱乾燥して得られた結合水率(X)試験結果を示す。ここでは、セメント単体を電子レンジで加熱した場合の質量減少率(Y)を考慮している。Xは各セメントともW/Cが小さくなるに比例して小さくなり、式(2)で表された。また、SFCに関して、XはW/C=25%以下ではほぼ0となった。

$$X = a \cdot W/C + b \tag{2}$$

ただし、

$$X = W' / C_0 \times 100(\%) \tag{3}$$

$$Y = C' / C_0 \times 100(\%) \tag{4}$$

ここに、a、bは実験定数、W' : 結合水量(g)、C' : セメント単体を電子レンジで加熱乾燥した際の減少質量(g)、

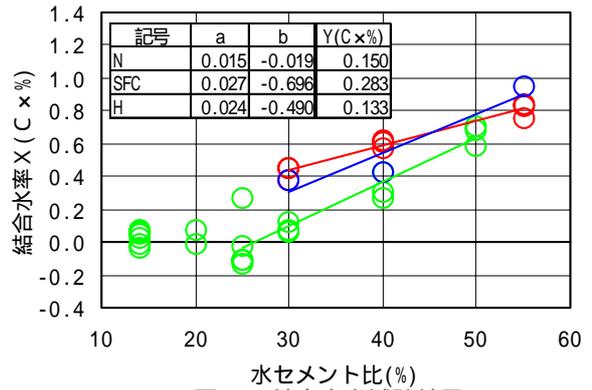


図-3 結合水率試験結果

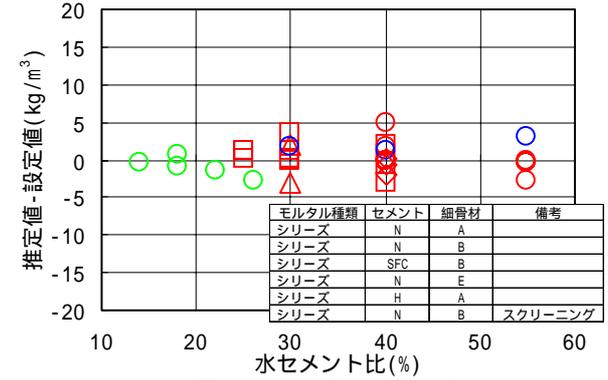


図-4 モルタル試験結果

(3) モルタルによる単位水量の推定精度の確認

以上の検討結果を検証するために、図-4中に示す実際のコンクリートの調合より粗骨材を除いたモルタルを用いて、単位水量推定試験を実施した。試料の製造にはモルタルミキサを使用し、各モルタルの練りあがり量を1Lとした。また、シリーズ に関しては5mmふるいによりウェットスクリーニング(以下、スクリーニングという)を実施後に単位水量推定試験を行った。

推定値の算出は、日本建築学会式³⁾に準じて各補正值P、X、Y、を考慮した式(5)により行った。

$$W = \frac{(W_b - W_c)}{(W_b - W_a)} \times (C_0 + W_0 + S_0) + \frac{X}{100} \times C_0 - \frac{Y}{100} \times C_0 - \frac{P}{100 + P} \times S_0 \tag{5}$$

何れのシリーズにおいても、W/C=14 ~ 55%の範囲で推定値と設定値はほぼ一致し、各補正值P、X、Yを考慮することでモルタルの単位水量を推定することができた。シリーズ の試験結果からは、スクリーニングによる推定値への影響は確認できなかった。

3. スクリーニングの影響

以降の検討は、コンクリート試料で実施したものである。

(1) モルタル採取率の影響

スクリーニングが単位水量の測定結果に影響を及ぼすこ

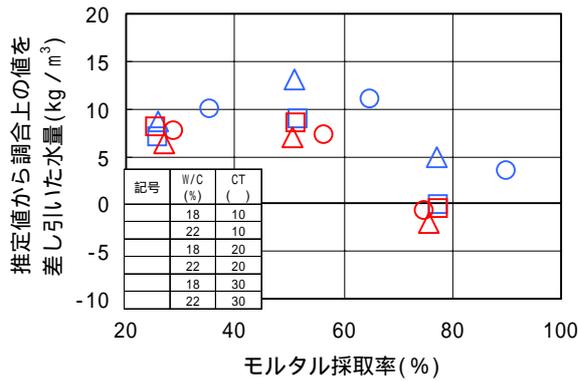


図-5 モルタル採取率の影響

とが指摘されている⁵⁾。図-5は、SFCを使用したW/C=22%および18%のコンクリートに対して、モルタルの採取率と式(5)による単位水量推定結果との関連を調べた結果である。各コンクリートの練り上がり温度は10、20、30の3種類に設定した。ここでモルタル採取率は式(6)によって求めた。

$$\begin{aligned} \text{モルタル採取率} &= (\text{スクリーニングによって得た} \\ &\quad \text{モルタル量} / \text{調合設計上のモルタル量}) \\ &\quad \times 100(\%) \end{aligned} \quad (6)$$

文献⁵⁾と同様に、モルタル採取率が大きくなるにしたがい、推定結果は小さくなる傾向がある。よって、本検討でのスクリーニングは、誤差を小さくするために、振動機を併用した手ぶるいをモルタルが落ちなくなるまで実施する方法に統一した。

(2) 水セメント比(W/C)の影響

表-2に示したW/C=22~55%のコンクリートに関して、単位水量推定試験を実施した。細骨材は表-1中のA、セメントは普通ポルトランドセメント(N)を使用した。練り混ぜには容量50Lのパン型ミキサを使用し、1バッチの練り上がり量を30Lとした。この実験では、モルタルを練り、その一部を採取したもの()と、その後粗骨材を投入して練り上がったコンクリートをスクリーニングして得られたモルタル()に対して、それぞれ式(5)により単位水量を算出した。このとき、試料とともに、5mmふるいによるスクリーニングを実施した。推定結果を図-6に示す。による結果は、前章2.で示したモルタル試験と同様に、おおむね調合上の値と一致した。しかしによる結果は、同一単位水量であっても、W/Cが大きいほど単位水量の推定値の偏り(Z)が大きくなる傾向が認められる。これらのことから、コンクリートの単位水量を推定する上ではスクリーニングの影響を考慮する必要があり、特に今回のケースのように、材料および調合の条件が限定された場合、推定値の偏り(Z)はW/Cと比例関係にあると考えられ、式(7)で表された。

$$Z = c \cdot W/C + d \quad (7)$$

ここに、c、dは実験定数、

表-2 コンクリート調合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m³)			
		セメント	水	細骨材	粗骨材
22	39.2	750	165	575	922
25	42.0	660	165	649	922
30	38.3	550	165	605	1007
40	42.3	413	165	717	1007
45	43.6	367	165	755	1007
50	44.5	330	165	784	1007
55	45.3	300	165	809	1007

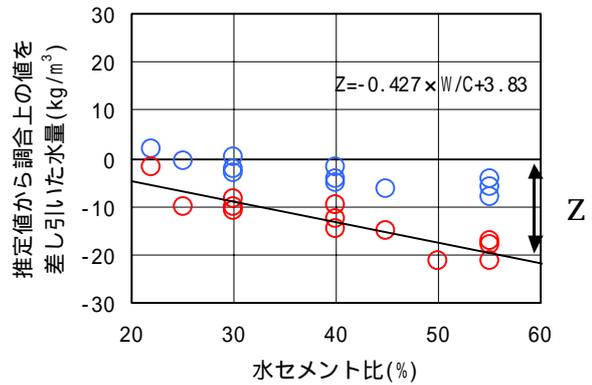


図-6 W/Cの影響

表-3 コンクリート種類

記号	単位水量 (kg/m³)	水セメント比 W/C (%)	単位粗骨材 かさ容積 (m³/m³)	練り混ぜ量 (L)
○	165	50	0.64	30
○	165	50	0.55	30
○	185	50	0.64	30
○	165	50	0.64	50
○	165	30	0.64	30
○	165	30	0.55	30
○	150	30	0.55	30

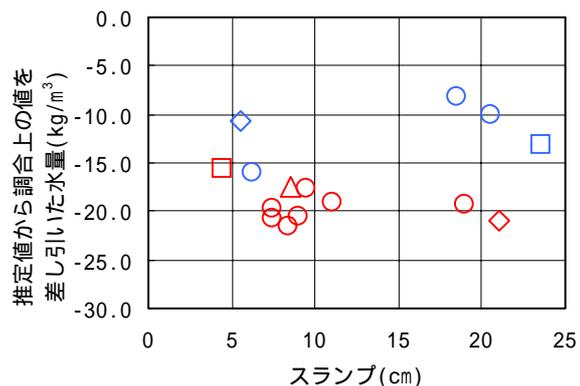


図-7 調合の相違の影響

(3) 調合の相違による推定値への影響

a) 使用材料が同一の場合

図-7は、前章(2)で使用したコンクリートに関して、表-3に示すように、スランプ、単位水量、単位粗骨材かさ容積、練り混ぜ量の異なるものに関して式(5)による単位水量推定試験を実施した結果である。今回実施した範囲では、各要因が推定値の偏り(Z)へ及ぼす影響はなかった。

表-4 コンクリート種類

コンクリート種類	セメント	細骨材-1	細骨材-2	粗骨材
シリーズ	普通ポルトランドセメント(N)	鬼怒川産川砂	-	葛生町産砕石
シリーズ	普通ポルトランドセメント(N)	万田野産山砂	-	両神産砕石
シリーズ	普通ポルトランドセメント(N)	岩舟町産砕砂	-	葛生町産砕石
シリーズ	3成分系特殊セメント(VKC)	岩瀬産砕砂	-	岩瀬産砕石
シリーズ	中熟ポルトランドセメント(M)	岩瀬産砕砂	-	岩瀬産砕石
シリーズ	普通ポルトランドセメント(N)	霞ヶ浦産川砂	尻内町産砕砂	田沼産砕石
シリーズ	シリカヒュームセメント(SFC)	万田野産山砂	-	両神産砕石
シリーズ	高ビーライト系セメント(HF)	万田野産山砂	-	両神産砕石

b) 使用材料の違いによる影響

図-8は、表-4に示した使用材料の異なる各コンクリートに関して実施した試験練り時に、式(5)により単位水量推定試験を実施した結果である。各コンクリートの推定値の偏り(Z)は、使用材料による差が確認されるが、何れもW/Cが小さくなると小さくなった。

4. 単位水量の測定式の提案

以上の検討結果より、フレッシュコンクリートの単位水量測定の数値方法として、式(5)に推定値の偏りの補正值(Z)を考慮した、式(8)を提案する。

$$W = \frac{(W_b - W_c)}{(W_b - W_a)} \times (C_0 + W_b + S_0) + \frac{X}{100} \times C_0 - \frac{Y}{100} \times C_0 - \frac{P}{100+P} \times S_0 + Z \quad (8)$$

推定値の偏りの補正值(Z)は、式(7)もしくは5.で後述する確認試験によって求める。図-9は図-6に示すの方法で採取したコンクリートの単位水量を式(8)により推定した結果である。単位水量の推定値は調合上の値にほぼ一致した。

5. 実施工への適用

(1) はじめに

Fc100N/mm²の超高強度コンクリートの実施工時の品質管理に、本提案手法による単位水量推定試験を適用した。各補正值は事前に予備試験により求めた。全てのアジテータ車よりコンクリートを採取して、単位水量と圧縮強度を測定し、本提案手法の有効性を検討した。

(2) 確認試験

a) 試験概要

確認試験として、実施調合のコンクリートによる試験練りを実施して、提案手法による推定値の追従性²⁾および補正值(Z)の確認を行った。使用材料および調合を表-5および表-6に示す。混和剤には、NewRC基準「高強度コンクリート用高性能AE減水剤の品質基準(案)」⁶⁾に適合する減水剤

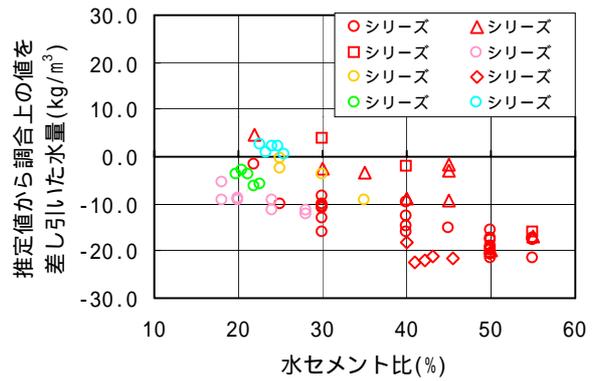


図-8 材料の相違の影響

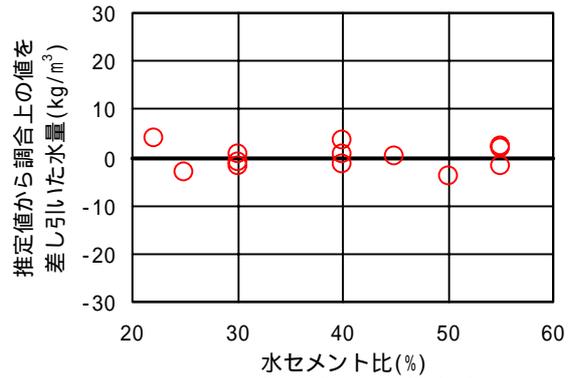


図-9 提案式による推定結果

表-5 使用材料

材料	種類	仕様	産地、他
細骨材	山砂	表乾密度：2.59(g/cm ³) 吸水率：2.28% 粗粒率：2.60	千葉県市川市 万田野
粗骨材	硬質砂岩 砕石2005	表乾密度：2.71(g/cm ³) 吸水率：0.56% 粗粒率：6.61	埼玉県秩父郡 両神
混和剤	減水剤	ポリカルボン酸系	-

表-6 コンクリート調合

調合名	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
SFC100	19.8	45.5	732	145	707	875	14.64
SFC100+05	20.5	45.3	732	150	694	875	14.64
SFC100+10	21.2	44.8	732	155	681	875	14.64
SFC100+15	21.9	44.3	732	160	668	875	14.64
SFC100+20	22.5	43.8	732	165	655	875	13.91

を使用した。調合記号SFC100は基本調合を示し、SFC100+05～SFC100+20は基本調合に対して細骨材表面水率が0～2.8%程度変動し、単位水量が増加したケースを想定した調合を示す。混和剤の添加量は一定とした。練り混ぜは強制二軸型ミキサー(60L)を用い、練りあがり量は1バッチ30Lとした。単位水量推定結果は式(5)により算出した。

表-7にフレッシュ試験結果を示す。スランプフロー値は単位水量の増加に伴い大きくなり、50cmフロー時間は単位水量の増加に伴い短くなったが、フロー停止時間に明確な違いは見られなかった。SFC100+15までは目視ではフレッシュ性状の変状は確認できなかった。SFC100+20に関しては若干の分離傾向が認められ、これ以上の単位水量の増加は目視で十分確認できるものと考えられる。

表-7 フレッシュ試験結果

No	スラフ厚 (cm)		加圧時間 (sec)		空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	気温 (°C)	
	×	○	50cm	停止				
SFC100	57.5	×	57.5	11.6	44.4	2.0	24.0	24.0
SFC100+05	58.5	×	57.5	8.8	33.8	1.9	24.0	25.0
SFC100+10	62.0	×	61.5	5.8	40.6	1.8	24.0	25.0
SFC100+15	65.0	×	64.0	4.6	40.2	1.5	24.0	24.0
SFC100+20	75.0	×	72.5	4.3	64.9	1.4	24.0	24.0

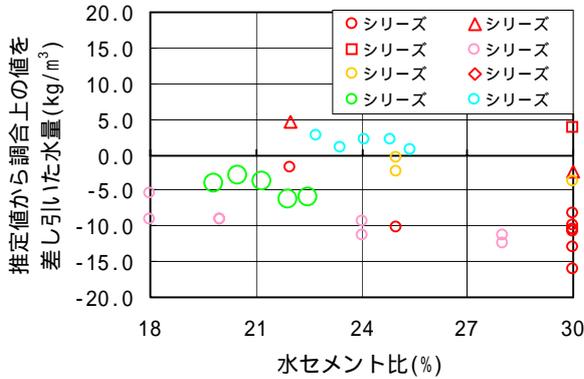


図-10 W/Cと推定値の偏り

表-9 コンクリート実施調査

調査名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)			
			セメント	水	細骨材	粗骨材
標準期	19.8	45.5	732	145	707	875
冬期	18.2	43.5	797	145	653	875

表-10 単位水量推定に用いた各補正值

X (C×%)	Y (C×%)	P (%)	Z (kg/m³)
0.00	0.28	3.00~3.72	3.7

b) 推定結果の追従性および補正值(Z)の確認

図-10は、3.7で示した図-8をW/Cが18~30%の範囲で表示したものであり、シリーズが今回の推定結果である。推定値の算出は、実際に計量した調査データを用いた式(5)により行った。他の試験結果と同様にW/Cの小さい範囲では推定値の偏りは小さくなる傾向を示す。

図-11および表-8は、調査上の値と推定結果の関係を示している。ここでは、実際の単位水量が不明の状況を想定して、推定値の算出を基本調査SFC100を用いた式(5)により行った。各コンクリートの推定値には一定の偏りが見られるが、単位水量の+20kg/m³までの増加に追従して増加した。この結果より、補正值(Z)は5回の試験結果の平均値(3.7kg/m³)とした。

(3) 品質管理

a) 品質管理の概要

コンクリートの打設は、標準期(10~11月)から冬期(12~2月)にかけて行われ、標準期では延べ3日で66m³、冬期では1日で36m³であった。標準期と冬期の実施調査を表-9に示す。

単位水量の推定には細骨材の吸水率を適切に評価する必

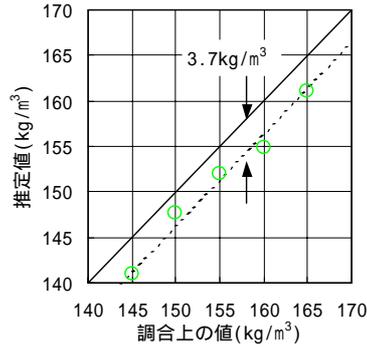


図-11 推定値の偏り

表-8 推定値の偏り

調査上の値 (kg/m³)	推定値 (kg/m³)	推定値-調査上の値 (kg/m³)
145	141	-4
150	148	-2
155	152	-3
160	155	-5
165	161	-4
平均値		-3.7

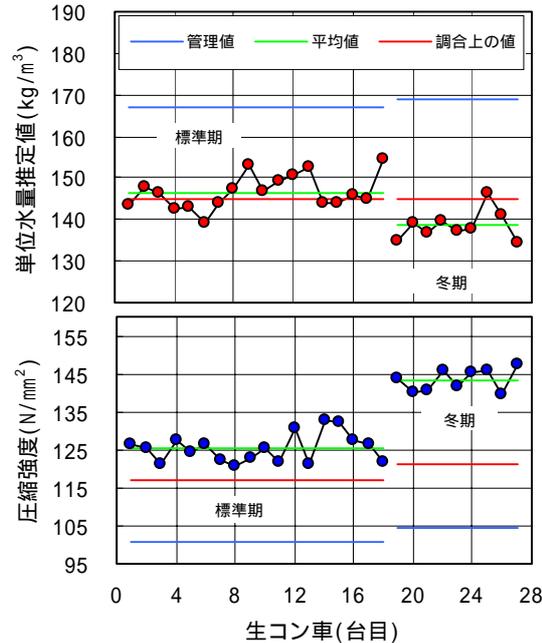


図-12 単位水量及び圧縮強度試験結果

表-11 単位水量管理結果

打設時期	単位水量 (kg/m³)				標準偏差 (kg/m³)	変動係数 (%)
	平均値	最大値	最小値	調査上の値		
標準期	147	154	139	145	4.13	2.81
冬期	139	146	134	145	3.61	2.61

表-12 圧縮強度管理結果

打設時期	標準養生材齢28日圧縮強度 (N/mm²)				標準偏差 (N/mm²)	変動係数 (%)
	平均値	最大値	最小値	調査強度		
標準期	125	133	120	117	3.78	3.02
冬期	143	148	140	121	2.94	2.05

要がある。このため、細骨材の表面水および電子レンジによる吸水率(P)を出荷日毎に午前・午後1回ずつ測定した。表-10に単位水量の算出に用いた各補正值を示す。

全てのアジテータ車に対して出荷時に工場試験室にて単位水量推定試験を実施すると同時に、10×20cmの圧縮強度供試体採取して標準養生材齢24日の圧縮強度を確認した。

b) 品質管理結果

出荷時に確認した各アジテータ車の単位水量推定結果と標準養生材齢 28 日圧縮強度測定結果を図-12 に示し、単位水量管理結果、強度管理結果を表-11 および表-12 に示す。

標準期では単位水量はほぼ調合上の値であり、圧縮強度は調合強度より若干大きくなっている。冬期においては単位水量は調合上の値より小さく、圧縮強度は調合強度より大きい結果となっている。また、各施工時の圧縮強度の変動係数は 2 ~ 3 % の範囲であり、調合設計に用いた変動係数の 1 / 2 以下となっている。

「強度試験結果と調合強度との差」と「単位水量の推定値と調合上の値の差」との関係を図-13 に示す。単位水量の増減と圧縮強度の増減には若干の負の相関が見られ、また測定結果には打設日別の傾向が見られる。図-14 は図-13 の圧縮強度を、NewRC の方法⁶⁾により空気量補正したものである。この結果、測定結果の打設日別の傾向は小さくなり、相関の傾きは、図中に示した調合に用いた圧縮強度 - 結合材水比の関係線に近いものとなった。

このことより、本工事で用いたフレッシュコンクリートの単位水量の推定方法が圧縮強度の管理に有効であると判断された。

5 . まとめ

電子レンジ法によるフレッシュコンクリートの単位水量推定試験に関して、本検討の範囲で以下の知見を得た。

- (1) 細骨材の吸水率は、JIS 法と電子レンジによる方法とでは異なり、電子レンジによる吸水率の方が大きい場合が多い。
- (2) セメントの結合水率は、W/C 及びセメント種類により異なり、W/C が大きくなるに従い大きくなる。
- (3) スクリーニングによる単位水量推定結果の偏りはコンクリートごとに異なるが、今回実施した範囲のように材料や調合の条件が限定された場合、W/C が大きくなるに従い大きくなり、W/C の一次式で表現できた。
- (4) 以上を考慮することにより、単位水量を精度良く推定することができた。
- (5) 提案式による単位水量の推定方法は、単位水量の 20kg/m³ までの増加に対するの追従性を有する。
- (6) 提案手法による単位水量の測定の実施は、超高強度コンクリートの圧縮強度の管理に有効であった。

今後は、セメントや骨材の種類および配合の範囲等を広げた検討に加え、いわゆる普通強度クラスのコンクリートの品質管理への本提案手法の適用性を検討していく必要がある。

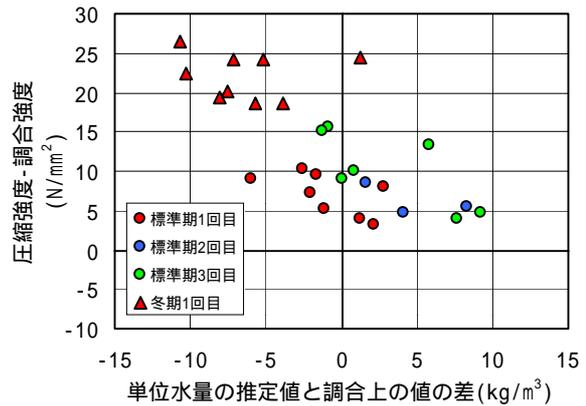


図-13 単位水量と圧縮強度の増減

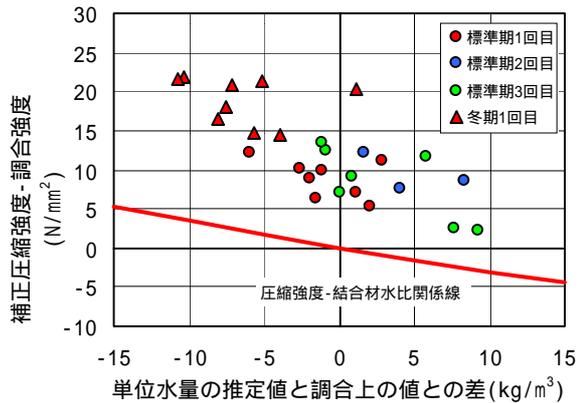


図-14 単位水量と補正圧縮強度の増減

謝辞: 本検討を行うに当たり、ご協力をいただきました晴海小野田レミコン(株)、三井プレコン(株)、(株)内山アドバンス柏工場、住友大阪セメント(株)、太平洋セメント(株)、宇部三菱セメント(株)、花王(株)、(株)NMB、(株)フローリックの関係諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば「フレッシュコンクリートの単位水量迅速測定および管理システム調査研究委員会報告書」、(社)日本コンクリート工学協会、pp33. - 34, 2004.6
- 2) 例えば「コンクリートの試験方法に関するシンポジウム報告集」、(社)日本建築学会、pp1-168. -1-183, 2003.11
- 3) 「高性能AE減水剤コンクリートの調合・製造および施工指針」、(社)日本建築学会、pp.130-136, 1999.2
- 4) 辻本・ほか: 高周波加熱法における試験条件の相違が単位水量の推定値に及ぼす影響、フレッシュコンクリートの単位水量迅速測定および管理システムに関するシンポジウム、pp.39-46, 2002.12
- 5) 加藤・ほか: 高周波加熱乾燥法による単位水量推定値に及ぼすウェットスクリーニング手法の影響、フレッシュコンクリートの単位水量迅速測定および管理システムに関するシンポジウム、pp.63-66, 2002.12
- 6) NewRC総プロ委員会: 平成4年度高強度コンクリート分科会報告書、(財)国土開発技術研究センター、pp.4 8-1, 4-18 6, 1993.2