

# 論文 フレッシュコンクリートの推定単位水量に及ぼす空気量と単位容積質量の季節的影響

袴田 豊<sup>\*1</sup>・北村 昌彦<sup>\*2</sup>・立花 長久朗<sup>\*3</sup>・松沢 克友<sup>\*4</sup>

**要旨：**エアメータ法を用いた推定単位水量に及ぼす空気量と単位容積質量の影響を，春夏秋冬の季節変動に着目して検討した。岩手県生コンクリート工業組合の技術委員会に所属する 6 箇所の生コン工場で測定した結果， $\pm 20\text{kg/m}^3$  の許容範囲を上回るデータが比較的少なかったのは，春季であることから，春季が最も安定した単位水量を算出できる可能性がある。エアメータ法は空気量と単位容積質量が互に関連しているものの，重回帰分析を用いて推定単位水量に及ぼすこれらの影響度を把握できることを明らかにした。これによって，測定精度は向上し，推定単位水量は安定するものと考えられる。

**キーワード：**推定単位水量，エアメータ法，空気量，単位容積質量，重回帰分析

## 1. はじめに

岩手県生コンクリート工業組合では，組合員の生コン工場の試験担当者を対象とし，平成 13 年から 3 年に 1 回の頻度で，現場で行われるスランプ試験や空気量試験に関する技量を確認している。

平成 15 年 10 月，国土交通省から通達が出され，1 日当たりの生コンクリートの使用量が  $100\text{m}^3$  以上になる場合，単位水量試験が義務付けられるようになった。単位水量の測定は，その測定原理によって多種多様の方法が開発されているが，多くの現場では，その簡便性からエアメータ法を用いているのが一般的である。

そこで，平成 16 年の研修会では，国土交通省の通達を重視し，スランプ試験や空気量試験などの通常の試験に加え，エアメータ法を対象とした単位水量試験も加え，その技量を確認することにした。試験の結果，単位水量の推定誤差が  $\pm 15\text{kg/m}^3$  を超えて配合の修正を要求されたり， $\pm 20\text{ kg/m}^3$  を超えて返品されるケースが想定されるなど，多くの試験担当者の技量に問題のあることが明らかとなった。試験経験が浅いのが原因とはいえ，当工業組合としては，単位水量測定技術に関する基礎資料を採取することが急務である，との結論に達した。

エアメータ法によって求められる単位水量は，フレッシュコンクリートの空気量と単位容積質量から，計算によって求める方法であるため，これらの要因をいかに制御するかが，単位水量を推定する上で重要となる。ところが，空気量は温度の影響を受けるため，推定単位水量は季節的な変動が考えられる。空気量の変動は，単位容積質量にも間接的な影響を及ぼす。工事の期間が長く，季節変動を考慮しなければならないにも関わらず，その

配合計画で品質の保証を行っている場合が多いとの指摘<sup>1)</sup>は，単に季節変動と配合上の問題だけでなく，季節変動とスランプや推定単位水量など品質管理上の問題も示唆している。

本研究では，当工業組合の技術委員会が中心となり，県内の各地区を代表する委員の 6 箇所の生コン工場が，春夏秋冬の 4 シーズンを対象として，単位水量試験を行った。推定された単位水量は，空気量と単位容積質量との関連を，重回帰分析によって解析した。推定単位水量に及ぼす空気量と単位容積質量の関係を明らかにするとともに，推定単位水量に及ぼす空気量と単位容積質量の影響の程度を，季節的変動も考慮しながら明らかにすることが，本研究の目的である。

## 2. 試験の概要

試験の着手は，2005 年の秋季（10 月）からとした。その後，冬季（2006 年 1 月），春季（同 4 月），夏季（同 8 月）と試験を進めた。生コン工場の出荷に合わせ，工程検査用の生コンクリートを中心に，多様な生コンクリートを採取するように努めた。**表-1**に，呼び強度や単位水量など主な配合を示す。最大値，最小値，および平均値は，6 箇所の生コン工場を対象としたものである。併せて，気象庁の HP を用い，生コン工場が立地する 6 箇所の外気温を，季節（月）ごとの平均値に着目してまとめた。

対象とした生コンクリートの呼び強度の範囲は 16～42，スランプは 5～21cm，粗骨材の最大寸法は 15～40mm，用いたセメントの大半は普通ポルトランドセメントである。推定単位水量に及ぼす季節的影響としての要因は，

\*1 岩手県生コンクリート工業組合 中央技術センター指導開発課長 博士（工学）（正会員）

\*2 盛岡小野田レミコン株式会社 代表取締役

\*3 北岩手生コン株式会社 専務取締役（正会員）

\*4 大船渡レミコン株式会社 大船渡工場工場長

表－１ コンクリートの主な配合と外気温

| 季節 | 年月          | 呼び強度 |    | 粗骨材の<br>最大寸法<br>(mm) |    | スランプ<br>(cm) |    | 単位水量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     | 外気温<br>(℃) |      |      |
|----|-------------|------|----|----------------------|----|--------------|----|------------------------------|-----|-----|------------|------|------|
|    |             | 最大   | 最小 | 最大                   | 最小 | 最大           | 最小 | 最大                           | 最小  | 平均  | 最大         | 最小   | 平均   |
| 秋季 | 2005 年 10 月 | 40   | 18 | 40                   | 20 | 18           | 8  | 195                          | 140 | 159 | 15.0       | 12.5 | 14.0 |
| 冬季 | 2006 年 1 月  | 42   | 18 | 40                   | 20 | 18           | 5  | 186                          | 138 | 156 | 0.2        | -3.0 | -1.4 |
| 春季 | 2006 年 4 月  | 42   | 16 | 40                   | 15 | 21           | 5  | 184                          | 140 | 164 | 8.3        | 6.1  | 7.1  |
| 夏季 | 2006 年 8 月  | 33   | 18 | 40                   | 20 | 18           | 8  | 184                          | 141 | 160 | 25.2       | 22.9 | 24.0 |

ここでは外気温に着目した。それぞれの季節に対応する外気温は、地域性があるため最大値と最小値が若干異なっているものの、平均的な外気温は各季節に応じて異なっており、これによって推定単位水量に及ぼす影響を把握することにした。

試験方法は、生コン工場にとって受入れやすく、土木研究所によって開発された土木研究所法、いわゆるエアメータ法を採用した。空気量および単位容積質量の測定とともに、生コンクリートに用いた細骨材および粗骨材の密度、骨材修正係数を事前に測定しておき、測定された空気量からこの骨材修正係数を差し引いた空気量を実際の計算では用いた。単位水量の推定式は、厳密式と簡易式とで二種類ある。今回の試験は生コン工場で行っているが、実際の工事では現場で行うことが想定されるため、推定式はなるべく簡略化したものがよい。そこで、今回の試験で得られた 923 個のデータを元に、厳密式を用いて算出した単位水量の推定値と設計値の差（以下、単位水量の誤差と表す）と、簡易式を用いて算出した単位水量の誤差を比較してみた。簡易式を用いた推定式を式(1)に示す。

$$W=W_1+(\gamma_1-\gamma_2)\times\beta \quad (1)$$

ここに、W：推定単位水量 (kg/m<sup>3</sup>)，W<sub>1</sub>：配合表上の単位水量 (kg/m<sup>3</sup>)， $\gamma_1$ ：配合表上の空気量を除いた単位容積質量 (kg/m<sup>3</sup>)， $\gamma_2$ ：試験で得られる空気量を除いた単位容積質量 (kg/m<sup>3</sup>)， $\beta$ ：換算係数 (=0.7)。

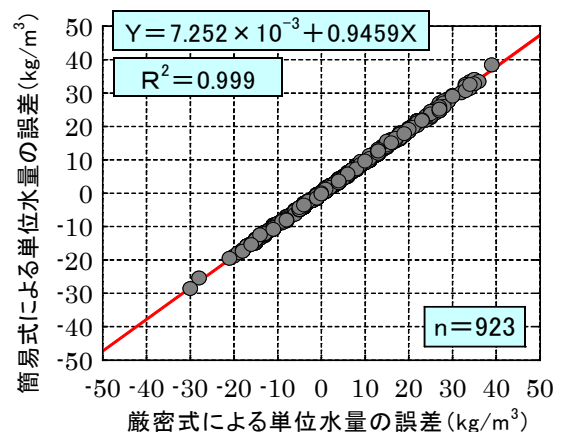
図－１は、その結果である。単位水量試験に着手するのは初めてという工場が多かったため、単位水量の誤差は-30kg/m<sup>3</sup>から+40kg/m<sup>3</sup>とその範囲は広いが、両者の相関関係は極めて高く、簡易式を用いても厳密式と同様に何ら遜色がない結果が得られることが明らかとなった。実際に、両者による全ての結果について比較したところ、±3kg/m<sup>3</sup>の範囲内にすべての結果が収まることが明らかとなったので、本試験では簡易式を採用した。

### 3. 試験の結果および考察

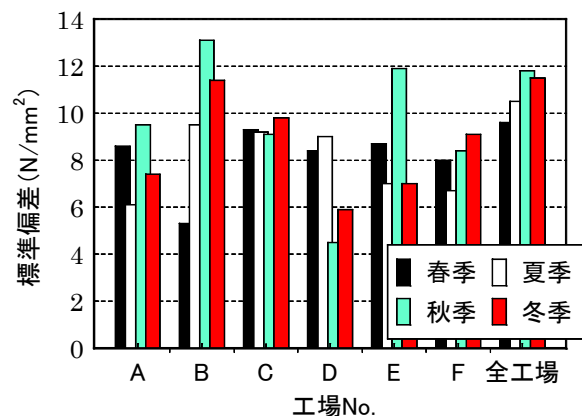
#### 3.1 単位水量の誤差の季節変動

図－２に、４シーズンごとの単位水量の誤差の標準偏

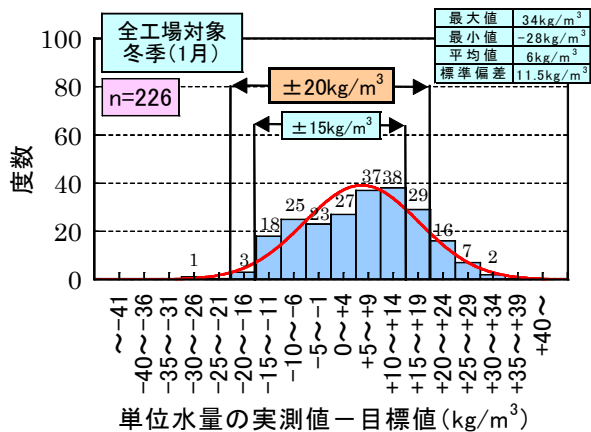
差をまとめ、季節的な変動を示した。これによると、C工場は季節的な変動がほとんどなく、D工場は季節を追うごとに標準偏差は比較的小さくなっている。一方、これ以外の工場はいずれも試験を開始した秋季の標準偏差が一番大きく、それ以降順次標準偏差は小さくなる傾向にある。これをもってして評価するならば、単位水量の誤差は、春季あるいは夏季がもっとも小さく安定している、ということになりがちである。ただし、D工場およびE工場以外は、ほとんどの工場が単位水量の測定は初めてであり、初めの季節である秋季は試行錯誤の連続



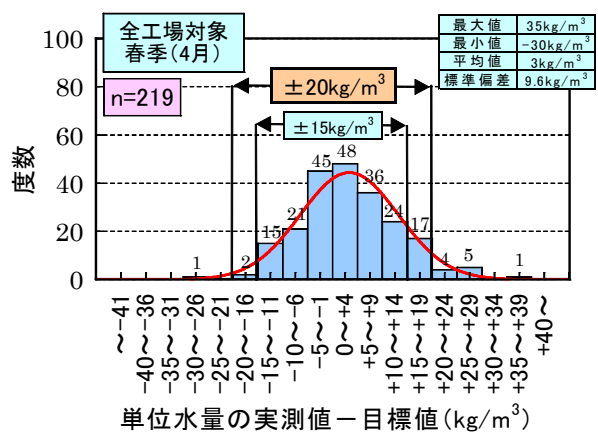
図－１ 単位水量の推定式の厳密式と簡易式による試験結果の比較



図－２ 単位水量の誤差の標準偏差



図－3 単位水量の誤差（全工場・冬季）



図－4 単位水量の誤差（全工場・春季）

であったという点に注意が必要である。図－2では、試験による習熟度の違いがなるべく相殺されるように、全工場のデータによる標準偏差によって季節的な変動を示した。秋季よりも冬季、冬季よりも春季の標準偏差が小さく、季節を追うごとに単位水量の誤差のバラツキは小さくなっている。試験を繰り返すたびに標準偏差は小さくなっており、試験の習熟度が影響したとも考えられるが、最後に行った夏季の標準偏差は逆に春季よりも大きくなっており、試験の習熟度だけでは説明できない側面がある。今回の試験は、すべて生コン工場で行っている。生コン工場では、夏場には季節的要因として温度が高くなり、これが現場までの空気量のロスを大きくする原因になることから、工場での目標空気量は高めに設定する傾向にある。目標空気量が大きくなると、設計空気量との差が大きくなり、単位水量の誤差も大きくなりがちである。その誤差自体が大きい場合、小さい場合に比べてその繰返しによる標準偏差は、一般に大きくなる傾向にある。夏季の標準偏差はこのような理由で大きくなったものと考えられ、季節的な変動として温度は、単位水量に影響を及ぼす要因の一つになりうるものと考えられる。標準偏差を見る限り、季節としては、温度の影響が小さく空気量のロスが少ない春季が比較的安定しているといえる。

標準偏差が小さく安定しているといっても、それは単にバラツキが小さいことを言っているに過ぎず、推定単位水量で肝心なのは、基準値の $\pm 15\text{kg/m}^3$ あるいは $\pm 20\text{kg/m}^3$ の許容範囲を外れるデータ数に着目する必要がある。そこで、全ての工場を対象とした単位水量の誤差のヒストグラムを作成し、春季の結果を冬季と対比して検討した。

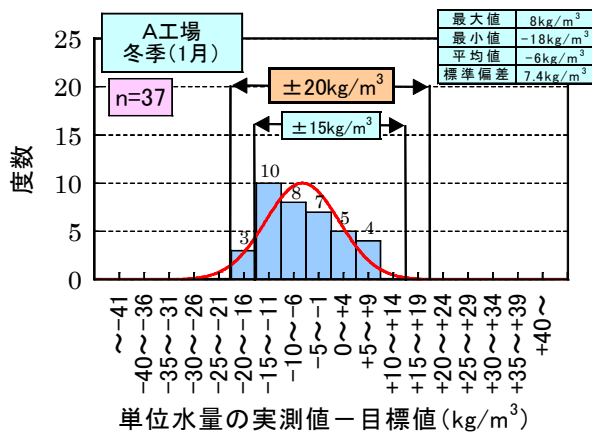
図－3は冬季を対象とした単位水量の誤差であり、図－4の春季を対象としたヒストグラムの対照として用いた。冬季は、 $+15\text{kg/m}^3$ および $+20\text{kg/m}^3$ の許容範囲を外れるデータが比較的多いのに対して、春季は $+20\text{kg/m}^3$

の許容範囲を外れるデータは比較的少ない。ヒストグラムの形も冬季に比べて山形で、その幅も明らかに小さいことから、標準偏差の違いで見られたように、実際の単位水量の誤差においても、春季が良好な結果を示すことが明らかとなった。

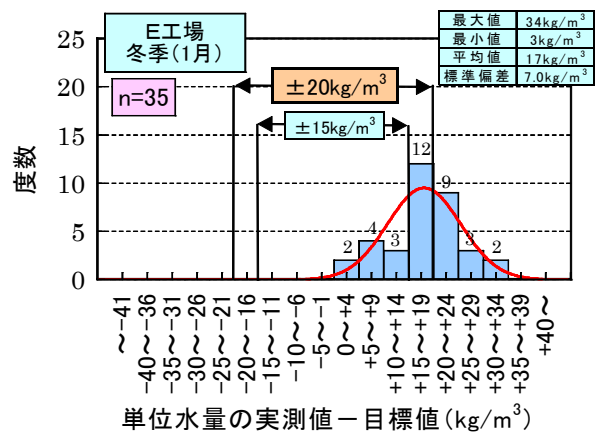
### 3.2 単位水量の誤差に及ぼす空気量と単位容積質量の影響

単位水量の誤差に及ぼす空気量や単位容積質量の影響について検討する場合、全ての季節を対象とするか、あるいは任意の季節を対象とするかは、検討が必要である。全ての季節を対象とすることで、季節的な変動は相殺されるものの、その一方で任意に選択した季節に密接な結果は得られにくくなる。季節は、むしろ任意のシーズンを限定した方が、単位水量の誤差に及ぼす空気量や単位容積質量の影響について検討しやすくなると考えられる。しかも、その任意のシーズンは、空気量や単位容積質量の影響を受けやすいシーズンであることが望ましい。このような意図により、ここでは、試験を開始して2シーズン目で、単位水量の誤差が比較的大きく不安定であった冬季をあえて選ぶことにした。さらに、これらの検討には、少なくとも二つの対照となる工場を選定する必要がある。比較の対照は工場を変えるだけでは不十分で、試験結果が対照的になっているのが望ましい。このような意図から、ここでは、A工場とE工場を比較の対照とした。

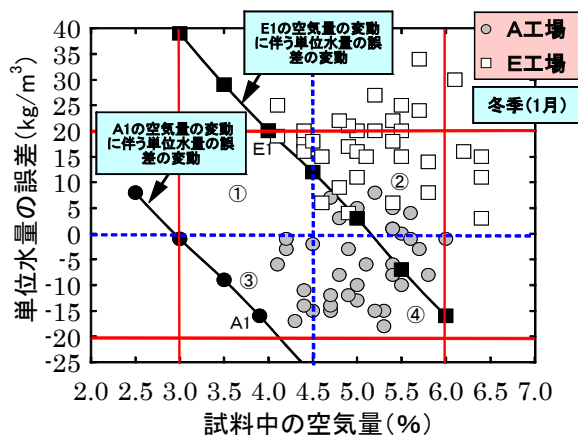
図－5にA工場を対象とした単位水量の誤差のヒストグラムを、図－6にE工場のヒストグラムを示す。A工場のヒストグラムは全体的にわずかにマイナス側に移動しており、推定値が目標値に比べて小さかったことが伺える。ただし、 $-20\text{kg/m}^3$ の指示値を下回る結果は一つも見られなかった。一方、E工場のヒストグラムは、全体にプラス側に大きく移動しており、A工場とは異なり、目標値に比べて推定値がかなり大きくなっている。しかも、 $+20\text{kg/m}^3$ の許容値を大きく外れる結果があり、



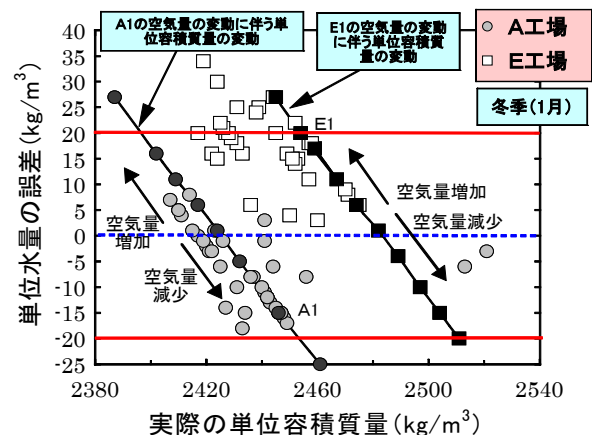
図－5 単位水量の誤差（A工場・冬季）



図－6 単位水量の誤差（E工場・冬季）



図－7 試料中の空気量と単位水量の誤差の関係



図－8 実際の単位容積質量と単位水量の誤差の関係

実際の現場であれば、生コン工場は単位水量の誤差が $\pm 20\text{kg/m}^3$ の指示値内になるまで全車両を対象とした測定を行い、さらに $\pm 15\text{kg/m}^3$ の管理値内に安定するまで、運搬車の3台毎に1回の測定が義務付けられることになる。ただし、A工場の試験結果とE工場の試験結果は対照的であり、比較の対照としては好ましい。

A工場とE工場の単位水量の誤差の違いは、どこに起因するのか、解析を行った。はじめに着目した要因は、空気量である。エアメータ法は、計算の過程で「配合表上の空気量」と「生コン工場で測定した空気量から骨材修正係数を差し引いた空気量（以下、試料中の空気量と表す）」を用いており、単位水量の誤差に及ぼす試料中の空気量の影響について検討することにした。図－7は、試料中の空気量と単位水量の誤差の関係を表したグラフである。A工場およびE工場いずれも試料中の空気量は4.0～6.5%の間の領域にあり、生コン工場での目標空気量は高めに設定されている。通常、試料中の空気量の変動に伴い、単位容積質量も変動するので、図－8に、実際の単位容積質量と単位水量の誤差の関係を表し、これら二つのグラフを照合しながら解析を進めた。

図－7において、A工場の試料のほとんどは領域④に

分布し、E工場の試料は、そのほとんどが領域②に分布している。A工場の単位水量の誤差がマイナス側にあるのは、まず生コン工場での目標空気量が高めに設定されていることに原因の一端があるように見られる。これを改善するには、試料中の空気量の変動によって、単位水量の誤差がどのように変動するのか、把握しておく必要がある。そこで、A工場のデータの一つA1をサンプルに、その変動をシミュレーションしてみた。A1は、試料中の空気量を少なくすることにより、左上に移動する。したがって、A工場全体の試料中の空気量は、これを少なくすることによって、単位水量の誤差はプラス側に移動する。すなわち、④の領域から①の領域に、試料中の空気量は移動することになる。ただし、試料中の空気量の減少に伴い、コンクリートの単位容積質量は増加する。

図－8によると、試料中の空気量の減少に伴い、サンプルのA1は右下に移動し、単位水量の誤差は大きくなるので、試料中の空気量を小さくすることは好ましい解決策とはいえない。むしろ、試料中の空気量はそのままにして、単位容積質量を小さくすることが改善につながる。したがって、A工場の単位水量の誤差がマイナス側になったのは、試料中の空気量に原因があるのではなく、

実際の単位容積質量が大きいことに原因の所在があるといえる。ただし、サンプルによって、空気量の増加あるいは減少が過度に行われると単位水量の誤差がむしろ大きくなる恐れもあるので、単位水量の誤差  $0\text{kg/m}^3$  を目標に見据えた対応が重要である。

引き続き、E工場についても同様の解析を試みた。E工場の試料中の空気量も明らかに、A工場と同様に大きく、②の領域にほとんどが分布している。ただし、中には目標空気量の上限値を超えているもの、あるいは試料中の空気量が範囲内にあっても単位水量の誤差が  $+20\text{kg/m}^3$  の指示値を超えているものが多数見られる。これを改善するには、E工場のデータの一つE1の試料中の空気量の変動に伴う単位水量の誤差の変動から、目標空気量を見直して試料中の空気量を増加するのが望ましいと見られがちである。ただし、図-8により、試料中の空気量の増加は、実際には単位水量の誤差を大きくする方向に働く。試料中の空気量はむしろ小さくなることで、単位水量の誤差はマイナス側に移動する。今回の試験で、試料中の空気量は工場で測定しており、単位水量が測定される現場までに、通常、試料中の空気量は減少することになる。この工場でも、試料中の空気量は現場に到着するまでに  $0.5\%$  程度減少することを見込んでおり、結果として単位水量の誤差は  $\pm 15\text{kg/m}^3$  の管理値内、あるいは  $\pm 20\text{kg/m}^3$  の指示値内に入るように管理している。E工場の場合、現場での単位水量を想定し、試料中の空気量および単位容積質量は、むしろ適切に管理されているといえる。一連の解析により、単位水量の誤差を良好にするには、試料中の空気量と単位容積質量の相互の関係を理解する必要があるといえる。

単位水量の誤差は、エアメータによって得られる単位容積質量が、配合上の単位容積質量に近くなるほど、良好になる。そこで、実測の単位容積質量を配合上の単位容積質量で除した値（ここでは便宜上、単位容積質量係数と表す）と単位水量の誤差の関係について検討した。図-9は、その結果である。ここで、配合上の単位容積質量からは、設計空気量が差し引かれている。A工場の回帰式とE工場の回帰式が異なっているのは、A工場の場合、基準となる配合上の単位容積質量に対して、骨材の密度等の変動の影響を受けて実際の単位容積質量が相対的に大きくなったためである。A工場およびE工場いずれも、右下がりの回帰式により、単位容積質量係数が大きくなると、単位水量の誤差は、マイナス側に移行する傾向を示している。具体的には、A工場の場合、単位容積質量係数が  $1.050$  を超えるような実際の単位容積質量となった場合には、単位水量の誤差はマイナス側に移行し、 $1.050$  を下回る単位容積質量が測定されれば、単位水量の誤差はプラス側に移行して、徐々に大きくな

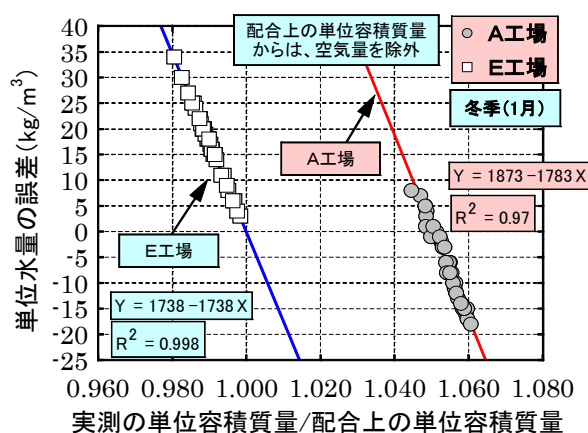


図-9 実際の単位容積質量を配合上の単位容積質量で除した値と単位水量の誤差の関係

る。一方、E工場の場合には、求められた回帰式により、単位容積質量係数は  $1.000$  が基準となる。これより大きくなる単位容積質量が測定されれば、単位水量の誤差はマイナス側に移行し、これよりも小さい単位容積質量では、プラス側に移行して徐々に大きくなる。骨材の密度なども考慮し、単位水量の誤差が  $0\text{kg/m}^3$  となるような単位容積質量係数を事前に求めておくことで、実際の単位容積質量係数と比較しやすくなり、必要な改善策も容易に執りやすくなるものと考えられる。

ただし、これまでの解析は、あくまでも二つの工場を取り上げ、冬季だけの限定したデータに着目した解析結果である。ここで重要なのは、むしろ試料中の空気量と単位容積質量が4シーズン間で、単位水量の誤差にどのような影響を及ぼすのか、その影響度を把握することにある。そこで、試料中の空気量と単位容積質量を説明変数、単位水量の誤差を被説明変数とし、偏回帰係数を比較する重回帰分析<sup>2)</sup>を行った。ただし、重回帰分析を行うにあたり注意しなければならない点は、多重共線性の検討である。試料中の空気量と単位容積質量の間に強い相関が存在する場合には、回帰分析の結果が歪められ、信頼性が低下する恐れがあるからである。両者の相関関係を確認したところ、相関係数は「 $0.152612$ 」と極めて小さく、VIF（分散拡大要因）についても「 $1.023846$ 」となり、多重共線性が疑われる一般的な基準の  $10$  を大きく下回る結果となった。一連の検討から、両者の相関関係はきわめて小さく、多重共線性は存在し得ないと判断し、通常重回帰分析を行った。ただし、ここでは、説明変数の単位の影響を取り除くため、説明変数と被説明変数の標準偏差を用い、偏回帰係数を標準偏回帰係数に変換して両者を比較しやすようにした。

図-10は、単位容積質量の標準偏回帰係数を試料中の空気量の標準偏回帰係数で除した値（ここでは便宜上、標準偏回帰係数比と表す）をシーズンごとにまとめ、両

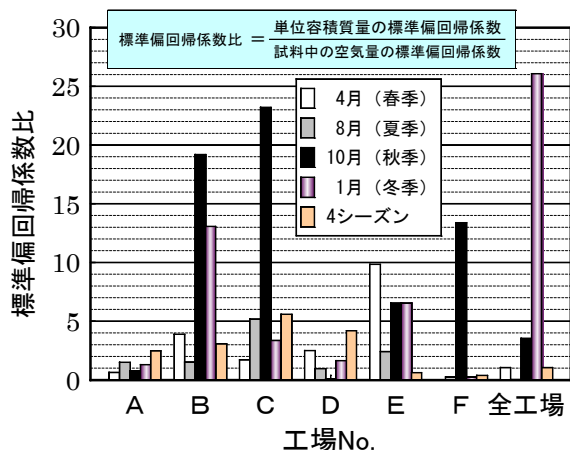


図-10 工場別の標準偏回帰係数比

者の影響度を比較しやすいようにした。なお、標準偏回帰係数の符号は負もあるが、ここでは便宜上、すべて正として取り扱った。

工場によって、あるいは季節によって、標準偏回帰係数比は異なり、統一的な解釈は困難である。すべての工場を対象とした場合、標準偏回帰係数は冬季が最も大きい値を示しており、冬季の推定単位水量は試料中の空気量よりも単位容積質量の影響を強く受けると判断できる。ただし、ここで重要なのは、推定単位水量に及ぼす試料中の空気量と単位容積質量の季節的影響を、個々の工場を対象として把握し、管理に生かすことである。

引き続き、コンクリートに対する季節的影響として外気温に着目し、標準偏回帰係数比との関係を把握することにした。図-11に、外気温と標準偏回帰係数比との関係を示す。工場ごとの外気温は、立地場所の該当する月の平均気温として示した。6工場のうち、3工場（B、C、F）の標準偏回帰係数比は、秋季が最も大きく、いずれも15～25程度の値を示している。秋季は他の季節よりも、推定単位水量に及ぼす単位容積質量の影響が大きいことから、これらの工場は試料中の空気量よりも単位容積質量の管理を厳密にすることで、推定単位水量は良好になる。管理手法としては、前述の図-9に倣い、実際の単位容積質量を配合上の単位容積質量で除した値と推定単位水量との関係を求めることが、一例として挙げられる。一方、AおよびDの2工場は季節的変動が見られない。推定単位水量に及ぼす試料中の空気量と単位容積質量の影響度はどちらも同等といえ、二つの要因を平均して管理していくことが求められる。CおよびFの2工場についても、秋季以外の標準偏回帰係数は比較的小さく、同様の管理が求められる。

一連の解析により、標準偏回帰係数比を用いて管理することで、推定単位水量に及ぼす試料中の空気量と単位容積質量の影響度を把握できることが明らかとなった。

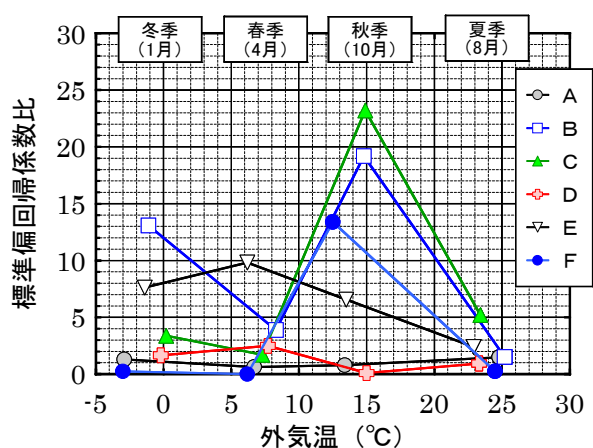


図-11 外気温と標準偏回帰係数比の関係

重回帰分析の解析手法を用いることで、測定精度の向上に寄与し、推定単位水量は安定するものと考えられる。

#### 4. まとめ

一連の試験によって、得られた結果をまとめる。

- (1) エアメータ法による単位水量の誤差は、春季が最も安定しており、 $+20\text{kg/m}^3$ の許容範囲を上回るデータが比較的少ない。
- (2) 単位水量の誤差を改善するには、試料中の空気量の変動が単位容積質量の変動にどのように影響するのか、把握しておく必要がある。
- (3) 単位水量の誤差が $0\text{kg/m}^3$ となるような単位容積質量係数を求めておくことで、実際の単位容積質量と比較でき、必要な改善策も容易にとれる。
- (4) 重回帰分析で解析する標準偏回帰係数比を導入することで、推定単位水量に及ぼす試料中の空気量と単位容積質量の影響度を季節的に把握できる。

本研究は、岩手県生コンクリート工業組合・技術委員会が行ったものであり、著者以外のメンバーは次のとおりである。澤本勝昭（釜石レミコン株式会社 第二工場）。

謝辞：本研究の遂行に際しては、当工業組合・前技術委員の千田量男氏（前一関レミコン株式会社）、および小山田福蔵氏（株式会社久慈レミコン）の御協力を頂いた。ここに、深甚の謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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：社団法人コンクリート工学協会，2004
- 2) Excel で学ぶ重回帰分析：株式会社ナツメ社，pp.135-177，2004