

論文 単位水量測定に基づくコンクリートの品質調査

岡田 秀敏^{*1}・佐藤 嘉昭^{*2}・清原 千鶴^{*3}・大谷 俊浩^{*4}

要旨：本研究では、単位水量の測定結果を用い、コンクリートの製造から施工管理まで一貫した品質管理体制を構築することを最終目的としている。本論文は、一連の研究の第1段階であり、単位容積質量法に基づく単位水量測定プログラムを作成し、大分県内の生コン工場におけるコンクリートの単位水量の調査結果をまとめたものである。

キーワード：単位水量、単位容積質量法、圧縮強度、乾燥収縮ひずみ

1. はじめに

現在、コンクリートの品質管理が重要な課題となっている。これには、コンクリートの剥落現象や施工現場における加水問題などコンクリート技術に対する不信感が背景にある。特に単位水量は、コンクリートの強度や耐久性に影響を及ぼす重要な要因の1つであることは周知のとおりである。このような背景を受けて国土交通省より**表-1**に示すような通達が表示された。これらによりこれまで曖昧であった単位水量の管理基準が明確になったが、測定方法については特に限定されておらず、示された10種類の測定方法のどれを採用するかは現場に委ねられている。

そこで、筆者らは、レディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場）において迅速かつ容易に測定できることを念頭に置き、単位

水量測定方法の1つである単位容積質量法に着目した。本研究では、コンクリートの製造から施工管理まで一貫した品質管理体制を構築することを最終目的とし、単位水量の管理のみならずコンクリートの品質管理から施工管理にまで反映が可能なデータの取得・保存を行うための管理システムの開発に取り組んでいる。本論文はその一連の研究の第1段階として、大分県内の生コン工場においてコンクリートの単位水量を測定するとともに、硬化コンクリートの物性についても調査を行い、プログラムの開発に必要なデータの蓄積を行うことを計画した。

2. 単位水量測定方法

2.1 測定方法の概要

生コン工場や施工現場で単位水量測定を行う場合、比較的測定誤差が少なく、現場への適

表-1 単位水量を取り巻く動向

2003.10 国土交通省 通達	「レディーミクストコンクリートの品質確保について」<土木>	(1)受注者による単位水量の受け入れ検査の実施 (2)1日当りコンクリートの使用量が100m ³ 以上の工事を対象 (3)単位水量の上限値 粗骨材最大寸法 20～25mm: 175kg/m ³ , 粗骨材最大寸法 40mm: 165kg/m ³ を基本
2003.11 国土交通省 通達	「レディーミクストコンクリートの品質確保について」<建築>	(1)延床面積 1500m ² 程度以上の新築工事を対象
2004.3 国土交通省	「レディーミクストコンクリート単位水量測定要領(案)」	(1)1日当りコンクリート使用量が100m ³ 以上の工事が対象。 試験頻度は2回/日(午前1回, 午後1回)

*1 大分大学大学院 工学研究科博士後期課程環境工学専攻((株)ゼロテクノ) (正会員)

*2 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース教授 工博 (正会員)

*3 大分大学 工学部客員研究員 博士(工学) (正会員)

*4 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース准教授 博士(工学) (正会員)

応性が高い方法である必要がある。そこで、(1) 短時間での測定が可能であること、(2) 試験費用がかからない方法であること、(3) 特殊な技術を要さなくても測定が可能な方法であることを考え、エアメータを用いた単位容積質量法による単位水量測定プログラムを開発して単位水量を測定することとした。

単位水量を管理する場合に基準となる値は配合計画書に記載された単位水量(以下、計画値)である。しかし、実際に出荷されているコンクリート中の単位水量は、練混ぜ時に投入される計量水量に骨材の表面水量を加えたものであることから、本研究では、単位水量を算出する場合、生コン工場における印字記録を用いることとした。さらに施工現場に適用することを念頭におき、トラックアジテータへ投入した全バッチの印字記録を用いるとともに、印字記録に記載されている各バッチの混練量や混練量の割り増し係数なども考慮することとした。

2.2 測定結果に及ぼす各種要因の影響

単位容積質量法は、空気量の測定精度、材料の計量誤差および骨材の密度測定誤差などの影響を受けることが指摘されている¹⁾。そこで、これらの影響要因による単位水量の測定誤差について試算することとした。試算に使用したコンクリートの配合は、水セメント比 55%，細骨材率 46.5%，単位水量 180kg/m^3 であり、使用したセメントの密度、細骨材および粗骨材の表乾密度は 3.16g/cm^3 、 2.58g/cm^3 および 2.70g/cm^3 である。

各誤差要因の変動に対する単位水量測定誤差の試算結果を表-2 に示す。これによると、既往の研究によって指摘されているように、空気量の測定誤差、骨材の密度測定誤差および粗骨材の計量誤差が単位水量測定結果に大きく影響を及ぼすことがわかる。材料の計量値は JIS A 5308 に規定されている許容範囲内で考えると最大 $\pm 4.5\text{kg/m}^3$ 程度の誤差が生じる可能性がある。さらに、これに密度測定誤差として各材料に $\pm 0.01\text{g/cm}^3$ が加わると、本プログラムによる

表-2 各種誤差が単位水量測定結果に

及ぼす影響

誤差要因		変動量	測定誤差
測定誤差	空気量の測定	+0.1%	-1.8kg/m^3
	エアメータの容積測定	+1cc	$+0.3\text{kg/m}^3$
	試料質量の測定	+1g	-0.1kg/m^3
計量誤差	セメント	+1%	-0.6kg/m^3
	細骨材	+3%	-1.3kg/m^3
	粗骨材	+3%	-2.5kg/m^3
密度測定誤差	セメント	$+0.01\text{g/cm}^3$	-0.6kg/m^3
	細骨材	$+0.01\text{g/cm}^3$	-2.2kg/m^3
	粗骨材	$+0.01\text{g/cm}^3$	-2.5kg/m^3
表面水率誤差	細骨材	+0.1%	-0.1kg/m^3
	粗骨材	+0.1%	-0.1kg/m^3

単位水量測定値には、 $\pm 10.0\text{kg/m}^3$ 程度の誤差が生じる可能性があることが試算された。

3. 単位水量調査結果

3.1 調査方法

本調査では、大分県内の8つの工場で出荷前のアジテータ車から採取したコンクリートを対象として品質調査を行った。なお、調査対象としたコンクリートの配合は、実験の都合上粗骨材の最大寸法が20mmのものとした。本実験で使用するエアメータは作業性に優れ、広く普及しているワシントン型エアメータとした。空気量の測定方法は、JIS A 1128に従って測定し、容器内のコンクリート質量を測定した。また、測定終了後のコンクリート試料を5mmふるい上で洗い出しを行い、粗骨材採取量の変動の影響についても調査した。さらに、硬化後のコンクリートの物性を確認するため、圧縮強度試験用供試体($\phi 100 \times 200\text{mm}$)および乾燥収縮ひずみ試験用供試体($100 \times 100 \times 400\text{mm}$)を作製した。作製した供試体は、全て所定の材齢まで水中養生(温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$)とした。圧縮強度試験は、材齢28日においてJIS A 1108に準拠して行い、乾燥収縮ひずみ試験は、恒温恒湿室内(温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\% \text{R.H.}$)にて材齢7日より乾燥を開始し、レーザ変位計を用いて測定を行った。

3.2 調査結果

(1) 調査したコンクリートの配合計画

これまで調査を行ったコンクリートの配合の一覧を表-3に示す。採取したコンクリートの呼び強度は18～30であり、呼び強度21のコンクリートが最も多い結果となった。配合計画上の単位水量は158～187kg/m³の範囲にあり、182～184kg/m³の範囲が最も多くなっている。

(2) 単位水量測定結果

単位水量の測定結果を表-3に示す。なお、表中には、印字記録による細骨材の表面水率の値も示している。これによると細骨材の表面水率は0.5～12.0%まで幅広く分布していることが分かる。

他の単位水量の測定方法と同様に、本法においてもサンプリングによる誤差は避けられない。そこで、ここでは出来るだけ正確な値を算出するため粗骨材の洗い出し試験を行い、理論上の粗骨材量との差から空気量の補正値を算出し、単位水量測定結果に生じるサンプリング誤差を補正することとした。サンプリング誤差補正前後の単位水量測定結果は表-3に示している。また、図-1にサンプリング誤差補正前後の測定単位水量の関係を示している。本調査の範囲内ではサンプリングによる誤差はほとんど確認できなかったが、BおよびH工場ではサンプリング誤差が大きい測定結果もあった。そこで、以後の考察においては補正後の測定単位水量を

表-3 採取したコンクリートの配合および単位水量測定結果

採取工場	採取月	コンクリートの呼び名	配合計画値			細骨材表面水率(%)			測定結果			補正結果	
			W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	S1	S2	S3	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	洗い出し粗骨材量による空気量補正値(%)	補正後単位水量 (kg/m ³)
A	9月	24-15-20N	55.0	43.2	165	6.9	—	—	15.5	5.3	170.1	0	170.1
	11月	24-12-20BB	54.9	43.8	158	8.0	—	—	11.5	5.8	162.4	0	162.4
	2月	21-15-20N	60.2	44.0	165	10.8	—	—	15.0	5.5	163.2	-0.2	166.9
	3月	18-12-20BB	65.1	45.8	158	6.9	—	—	—	5.2	155.6	0	155.6
B	8月	21-18-20N	59.5	49.0	184	4.3	—	—	18.5	4.8	182.0	0.1	180.1
	9月	24-18-20N	54.9	47.7	184	4.3	—	—	18.5	4.6	185.6	-0.1	187.3
	10月	21-8-20BB	59.4	45.0	161	3.2	—	—	9.5	5.0	166.0	-0.1	167.9
	11月	27-15-20N	51.1	44.9	176	4.3	—	—	17.0	5.2	170.8	-0.1	172.7
	12月	27-18-20N	51.1	47.0	184	5.0	—	—	19.0	5.7	176.4	0.0	176.4
	1月	24-15-20N	54.9	45.5	176	3.5	—	—	17.0	4.4	188.9	-0.2	192.4
	2月	21-18-20N	59.5	49.0	184	6.0	—	—	19.5	5.8	171.2	0.0	171.2
	3月	24-18-20N	54.9	47.7	184	6.0	—	—	19.5	4.3	193.8	-0.3	199.1
	10月	21-18-20N	59.3	49.7	185	2.5	3.0	—	21.0	5.2	189.6	-0.1	191.4
	12月	21-18-20N	59.3	49.7	185	4.2	1.3	—	21.0	5.1	183.3	0.0	183.3
C	2月	21-15-20N	59.3	47.4	180	6.4	5.3	—	16.5	6.0	175.5	-0.1	177.4
D	9月	21-18-20N	58.3	47.5	182	6.0	—	—	18.5	5.5	182.8	0.1	181.0
	10月	21-18-20N	58.3	47.5	182	6.2	—	—	—	4.2	187.4	0.0	187.4
	11月	24-18-20N	53.5	46.6	183	6.5	—	—	—	4.5	177.7	0.0	177.7
	12月	24-18-20N	53.5	46.6	183	6.1	—	—	—	4.7	181.2	0.1	179.4
	1月	24-18-20N	53.5	46.6	183	5.6	—	—	19.0	4.9	177.7	0.0	177.7
	2月	21-18-20N	58.3	47.5	182	7.5	—	—	18.0	4.4	175.6	0.0	175.6
	3月	21-18-20N	58.3	47.5	182	4.6	—	—	19.5	3.9	187.0	0.0	187.0
E	10月	24-18-20N	54.6	46.7	184	2.5	—	—	19.5	5.1	188.1	—	—
	12月	30-18-20N	49.0	45.3	187	6.0	—	—	18.0	5.8	183.8	0.1	182.0
	2月	21-15-20N	59.3	46.3	172	3.0	—	—	15.0	4.7	172.6	-0.1	174.4
F	8月	21-8-20BB	58.6	46.9	163	4.0	0.6	—	7.5	4.2	153.5	0.0	153.5
	10月	21-15-20N	59.3	47.9	179	4.5	0.6	—	17.0	4.4	180.5	0.0	180.5
	2月	24-18-20N	54.6	48.4	185	6.1	0.5	—	20.0	4.5	182.0	-0.1	183.8
G	8月	18-8-20BB	71.1	48.4	160	3.7	0.5	—	—	4.2	158.4	—	—
	10月	18-8-20BB	71.0	48.4	160	7.7	0.5	—	9.5	5.8	162.4	-0.2	166.0
	1月	18-15-20N	72.3	48.7	179	8.3	0.5	—	17.0	3.9	180.8	-0.3	186.1
	2月	30-18-20N	52.8	45.5	183	11.9	0.5	—	18.0	4.6	175.5	-0.2	179.2
H	8月	24-15-20BB	54.0	44.6	175	2.6	3.0	3.0	16.5	3.8	188.1	—	—
	10月	27-18-20N	52.0	44.9	184	2.0	2.0	3.0	15.5	4.9	173.7	0.1	171.8
	2月	27-18-20N	52.0	44.9	184	5.0	5.0	5.0	19.0	3.9	183.6	0.1	181.8
	3月	24-18-20N	55.0	45.9	183	8.0	8.0	8.0	15.5	4.5	175.0	-0.9	191.3

用いることとした（洗い出しによる粗骨材量の測定値が無い場合は補正前の値を使用）。

単位水量の計画値と測定値の関係を図-2に示す。国土交通省「レディーミクストコンクリート単位水量測定要領(案)」では測定した単位水量が計画値に対して $\pm 15\text{kg/m}^3$ 以上で改善指示、 $\pm 20\text{kg/m}^3$ 以上で持ち帰りと定められている。また、(社)日本コンクリート工学協会「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」²⁾では $\pm 10\sim 15\text{kg/m}^3$ をイエローゾーン、 $\pm 15\sim 20\text{kg/m}^3$ をレッドゾーンと定めている。そこで、図中には $\pm 10\text{kg/m}^3$ および $\pm 15\text{kg/m}^3$ の境界線を点線で示している。調査の結果、単位水量の配合計画値と測定値の差は $+16.8\sim -12.8\text{kg/m}^3$ となり、 $\pm 10\sim 15\text{kg/m}^3$ のイエローゾーンに該当するコンク

リートが3件、 $\pm 15\sim 20\text{kg/m}^3$ のレッドゾーンに該当するコンクリートが2件あった。

(3) 配合の修正

表-1の単位水量測定結果を基に配合計画値の修正を行うこととした。配合修正を行う場合、本調査では出荷前のアジテータ車から採取したものであるため、設定値と水量の差は、加水の影響はないものとし、次のような仮定を設けた。

- 1m^3 あたりの単位水量は表-1に示す測定値を用いる
- 空気量は実測値を用いる
- 計画値と測定値の増減は、骨材表面水率誤差であると考え、細骨材量で補正を行

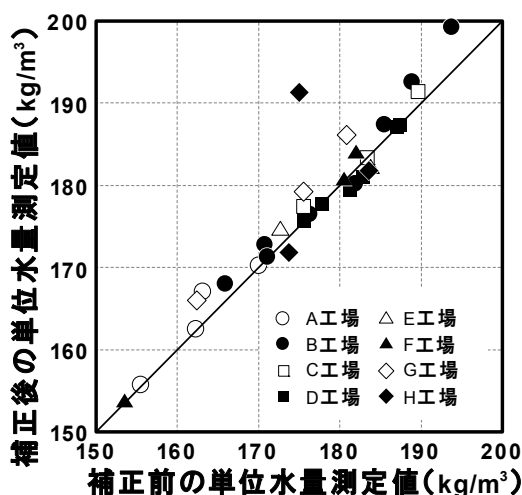


図-1 サンプル補正前後の測定単位水量

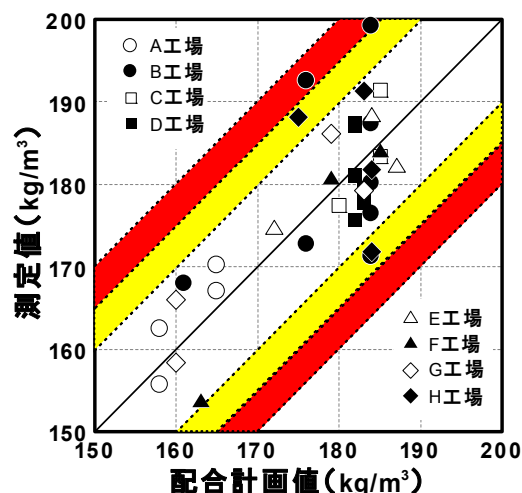


図-2 単位水量の配合計画値と測定値の関係

表-4 修正後のコンクリートの配合

採取工場	採取月	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)							
				W	C	S1	S2	S3	G1	G2	
A	9月	57.2	42.8	170.1	297	748	—	—	1054	—	
	11月	57.3	43.4	162.4	283	763	—	—	1047	—	
	2月	61.7	43.8	166.9	271	776	—	—	1050	—	
	3月	64.3	46.0	155.6	242	843	—	—	1044	—	
B	8月	58.3	49.3	180.1	309	858	—	—	454	451	
	9月	55.8	47.4	187.3	335	808	—	—	460	460	
	10月	62.2	44.4	167.9	270	795	—	—	510	510	
	11月	50.5	45.2	172.7	342	778	—	—	483	485	
	12月	49.6	47.6	176.4	355	804	—	—	454	454	
	1月	59.8	44.1	192.4	322	754	—	—	489	491	
	2月	56.2	50.0	171.2	305	869	—	—	448	446	
	3月	59.1	46.5	199.1	337	781	—	—	462	462	
C	10月	61.9	49.1	191.4	309	566	285	—	622	272	
	12月	59.2	49.8	183.3	310	580	292	—	623	272	
	2月	59.6	47.6	177.4	298	557	279	—	649	284	
D	9月	58.8	47.5	181.0	308	824	—	—	651	278	
	10月	59.8	47.0	187.4	313	821	—	—	662	283	
	11月	51.9	47.0	177.7	342	817	—	—	660	282	
	12月	52.6	46.9	179.4	341	811	—	—	659	281	
	1月	52.2	47.0	177.7	340	813	—	—	657	281	
	2月	56.2	48.0	175.6	312	849	—	—	661	283	
	3月	59.5	47.1	187.0	314	825	—	—	665	284	
E	10月	56.2	46.4	188.1	335	790	—	—	466	466	
	12月	48.5	45.7	182.0	376	762	—	—	461	461	
	2月	60.3	46.1	174.4	289	824	—	—	491	490	
F	8月	54.8	47.6	153.5	280	525	362	—	504	504	
	10月	59.7	47.8	180.5	303	504	347	—	479	479	
	2月	54.3	48.5	183.8	339	498	344	—	462	462	
G	8月	70.2	48.6	158.4	226	555	370	—	1007	—	
	10月	75.1	48.0	166.0	221	532	354	—	987	—	
	1月	74.6	48.2	186.1	250	528	353	—	973	—	
	2月	51.7	45.8	179.2	346	480	320	—	973	—	
H	8月	58.2	44.5	188.1	323	300	187	286	990	—	
	10月	48.3	45.3	171.8	355	326	204	262	974	—	
	2月	50.9	45.0	181.8	357	317	198	272	978	—	
	3月	57.9	45.8	191.3	330	311	195	286	954	—	

い、細骨材が数種類ある場合は、その比率に応じて調整する質量を分配する

d) a) ～c) の計算結果、容積が変動するため、 1m^3 に換算する

その結果を表-4 に示す。配合修正の方法については引き続き検討が必要であるが、本論文では硬化コンクリートの特性を表-4 に示す修正配合の値を用いて検討を行うこととした。

4. コンクリートの品質調査

最初に述べたように本研究では単位水量測定結果から出荷されるコンクリートの物性を予測し、コンクリートの品質管理を行うことを考えている。ここでは、単位水量測定結果より修正した配合(表-4)を用いて、各学会で推奨されている予測式を用いてコンクリートの物性を予測することを試みた。

図-3 に修正配合強度と実測値の関係を示す。圧縮強度においては、各工場で用いられている配合強度算出式から表-4 の修正配合を用いて算出した修正配合強度と比較した。ばらつきはあるが修正配合強度よりも実測値の方が大きくなる傾向を示しており、特に E, F および G 工場の実測値と修正配合強度の差が大きい値を示す結果となった。

図-4 に乾燥期間 180 日における乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係を示す。予測には日本建築学会式³⁾と土木学会式(普通強度式)⁴⁾を用いた。

[日本建築学会]

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_{sh} \cdot \left(\frac{(t - t_0)}{0.16 \cdot (V/S)^{1.8} + (t - t_0)} \right)^{1.4(V/S)^{-0.18}} \quad (1)$$

[土木学会]

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon'_{sh} \cdot \left[1 - \exp \left\{ -0.108 (t - t_0)^{0.56} \right\} \right] \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon(t, t_0)$: 乾燥収縮ひずみの予測値
($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{sh}, \varepsilon'_{sh}$: 乾燥収縮ひずみの最終値

t : 材齢(日), t_0 : 乾燥開始材齢(日)

V/S : 体積表面積比(mm)

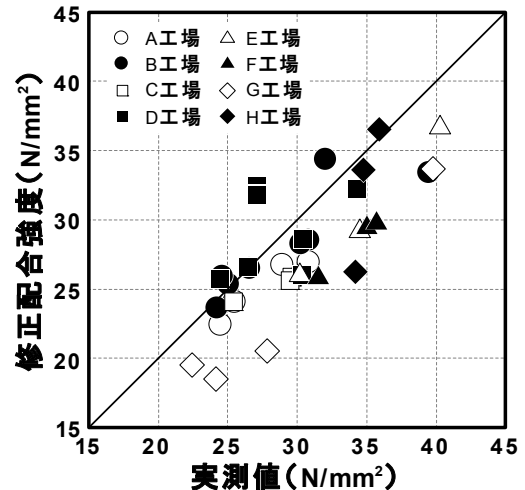


図-3 圧縮強度の実測値と修正配合強度

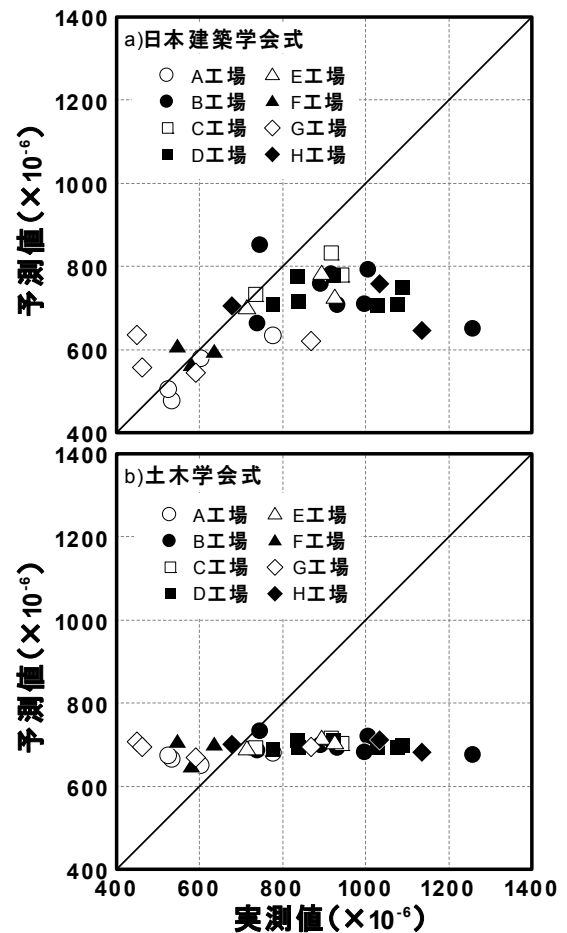


図-4 配合データより予測した乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の比較

図-4 より、粗骨材に石灰石碎石を使用している A, F および G 工場はコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さい結果を示しているが、どちらの予測式も精度よく予測できていない。そこで、今本らの研究⁵⁾を参考に短期の実験値(乾

乾燥期間 28 日)を用いて乾燥収縮ひずみの最終値を算定する簡易法を用いて乾燥期間 180 日の乾燥収縮ひずみを予測することとした。その結果を図-5 に示す。これによると両予測式とも概ね良い精度で乾燥期間 180 日を予測することが可能であることが確認できた。乾燥収縮ひずみの予測に関しては配合のみのデータで予測するよりも短期の実験値を使用して予測したほうがその精度が向上することが分かった。管理システムの作成についてはこの点を考慮する必要があるものと思われる。

5. まとめ

本論文では、単位容積質量法に基づく単位水量測定プログラムを作成し、大分県内の生コン工場におけるコンクリートの単位水量の調査を行った。さらに単位水量測定結果から修正した配合を基にコンクリートの物性値の予測を行い、実測値と比較検討を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 単位容積質量法では、各材料の計量誤差や材料密度の誤差により単位水量の測定誤差が $\pm 10\text{kg/m}^3$ 程度になる。
- (2) 単位水量測定プログラムによる単位水量測定値を用いることで、若干ばらつきはあるが圧縮強度を予測できる。
- (3) 乾燥収縮ひずみは配合のみで予測するのよりも短期でも実験データを用いた方が精度が高い。

今後も引き続き調査を行い、単位水量の測定精度の向上について検討を行うとともに単位水量管理に基づいたコンクリートの品質管理システムを構築する予定である。

謝辞

本研究は平成 17 年度科学研究費補助金萌芽研究(研究代表者:佐藤嘉昭)の一環として行われたものである。本実験に協力して下さった大分県生コンクリート工業組合ならびに大分県内の生コンクリート工場の関係者の方々に謝意を表します。

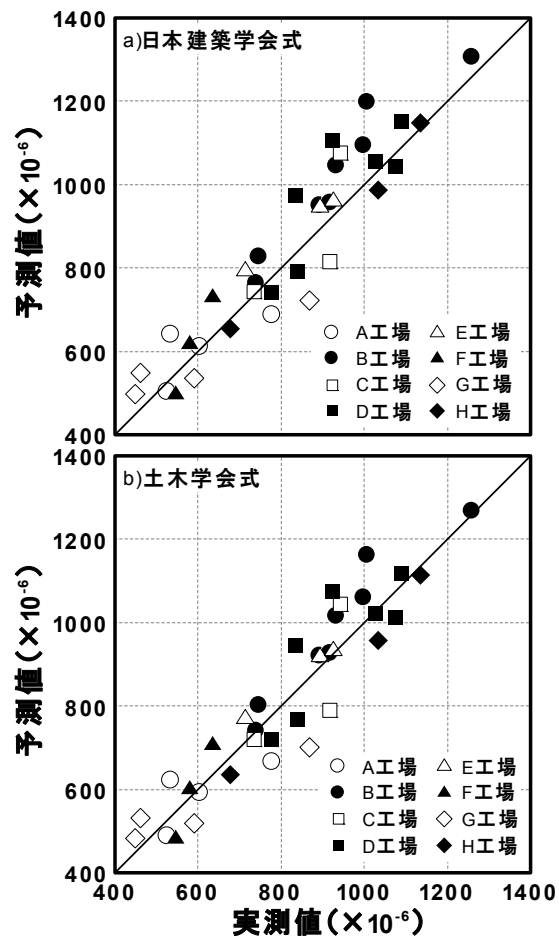


図-5 短期実験データより予測した乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の比較

参考文献

- 1) 並木哲ほか：単位水量測定方法の精度と誤差要因の検討，日本建築学会技術報告集，第 20 号，pp.13-16，2004.12
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：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，2004.6
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説，pp.4-5，2006.2
- 4) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，pp.30-34，2002.3
- 5) 今本啓一ほか：学会式と短期データを併用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.527-532，2006.7