

# 論文 吸水性状に基づく乾燥収縮・促進中性化深さなどの長期性状の推定に関する研究

久保田 英樹<sup>\*1</sup>・清水 五郎<sup>\*2</sup>・中田 善久<sup>\*3</sup>

要旨:筆者らは,吸水試験によりコンクリート内部組成の粗密によって吸水速度や吸水量に相違をもたらし,それらの吸水性状を試験することによりコンクリートの物性を広範囲かつ総合的に特定することが可能であるとの所見を示してきた。本報では,新たな解析手法によって,圧縮強度,乾燥収縮,中性化深さなどの試験値と吸水試験結果との相関性は高く,諸物性の推定が可能であることを示している。また,吸水試験方法に関しては,試験開始時にコンクリート中に含有水が存在する場合について,含水率の影響を分析している。これにより試験開始時の試験体の調整を除くことによって,より簡易な吸水試験方法を提示している。

キーワード:吸水率,含水率,高強度コンクリート,乾燥収縮,中性化深さ

## 1. はじめに

コンクリートの品質を評価する方法として,材料の種類とその構成比をはじめ,各種強度,乾燥収縮,中性化深さなどの各種試験方法が個別に存在している。特に乾燥収縮や中性化深さなどの試験に関しては長期にわたる一貫した実測が要求され,高度な測定技術や設備などを必要とすることを考慮すると必ずしも容易な試験とはいえない。

筆者らはかねてより,上記の試験結果のほとんどはコンクリートの内部組成に支配されていることに着目し,乾燥した硬化コンクリートの吸水特性からコンクリートの品質を総合的に評価することができるかどうかについて検討を試みてきた。すなわち,コンクリート内部組成の粗密によって吸水速度や吸水量に相違をもたらし,それ

らの吸水性状を試験することによりコンクリートの物性を広範囲かつ総合的に特定することが可能であるとの所見を示してきた。<sup>1)~4)</sup>

本報告では既報の試験結果を用いているが,新たな解析手法によって,圧縮強度,乾燥収縮,中性化深さなどの試験値と吸水試験結果との相関性は高く,諸物性の推定が可能であることを示している。また,吸水試験方法に関しては,試験開始時にコンクリート中に含有水が存在する場合について,含水率の影響を分析し,比較的自由度の高いより簡易な吸水試験方法を提示している。

## 2. 実験の概要

### 2.1 使用材料およびコンクリートの調査

セメントは,普通(N),中庸熱(M),低熱(L)の各種ボル

表 - 1 コンクリートの調査・実験定数・強度・乾燥収縮量・中性化深さ

セメント種類	W/C (%)	重量調合 (kg/m <sup>3</sup> )				実験定数												28日圧縮強度	26週乾燥収縮量 (×10 <sup>-6</sup> )	26週中性化深さ (mm)
		C	W	S	G	初期含水率(%)			初期含水率(%)			初期含水率(%)			V <sub>0</sub>					
						0	25	50	0	25	50	0	25	50	0	25	50			
N	45	378	170	881	871	5.1	3.9	2.5	51.1	40.2	41.2	0.08	0.09	0.08	0.07	0.03	0.01	45.2	6.99	-
	35	486	170	1251	397	5.0	3.8	2.4	116.0	110.3	110.3	0.06	0.05	0.06	0.04	0.01	0.01	63.7	-	0.3
	35	486	170	793	871	4.6	3.4	1.9	97.2	90.3	85.1	0.10	0.11	0.11	0.05	0.04	0.01	59.7	-	0.2
	35	529	185	720	871	5.1	3.8	2.3	83.3	78.6	74.3	0.07	0.04	0.01	0.06	0.05	0.05	61.7	-	0.3
	35	486	170	793	871	4.8	3.7	3.9	51.8	45.0	40.9	0.10	0.06	0.04	0.05	0.02	0.01	61.8	6.49	-
	25	680	170	673	871	3.5	2.5	1.8	54.3	49.1	41.6	0.09	0.12	0.14	0.03	0.01	0.01	96.7	5.32	-
M	45	411	185	821	871	5.9	4.7	3.4	45.8	39.5	29.8	0.08	0.05	0.09	0.11	0.04	0.01	45.1	7.10	-
	35	486	170	1259	397	5.1	3.5	2.2	111.1	99.6	80.3	0.07	0.04	0.01	0.05	0.04	0.04	60.5	-	0.5
	35	529	185	725	871	5.1	3.4	2.1	83.3	80.1	80.2	0.05	0.02	0.02	0.06	0.05	0.01	66.1	-	0.3
	35	486	170	800	871	4.6	3.4	1.9	36.6	23.7	26.2	0.09	0.06	0.45	0.06	0.02	0.00	58.2	6.98	0.2
	25	740	185	593	871	2.9	1.9	1.4	30.1	20.8	14.5	0.20	0.15	0.11	0.03	0.02	0.01	96.7	5.71	-
L	45	411	185	821	871	6.0	4.0	2.8	60.7	39.1	31.4	0.08	0.07	0.36	0.11	0.02	0.01	39.8	6.72	-
	35	486	170	1259	397	5.3	3.5	2.1	125.0	110.2	99.5	0.07	0.07	0.04	0.04	0.02	0.01	55.0	-	0.8
	35	529	185	728	871	6.2	4.1	2.9	69.4	58.6	44.7	0.10	0.09	0.08	0.09	0.07	0.06	56.2	-	0.6
	35	486	170	800	871	4.6	2.9	1.6	39.5	40.4	40.4	0.06	0.13	0.31	0.07	0.02	0.01	66.0	6.66	0.5
	25	740	185	596	871	3.4	2.0	1.4	31.2	17.9	15.4	0.14	0.16	0.11	0.03	0.02	0.02	100.0	5.89	-

\*1 日本大学大学院 理工学研究科 研究生 修士(工学) (正会員)

\*2 日本大学 理工学研究所 上席研究員 博士(工学) (正会員)

\*3 日本大学 理工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

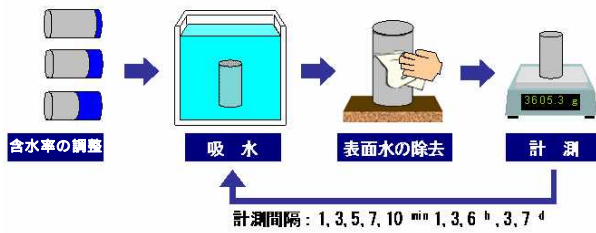


図 - 1 吸水試験の概念

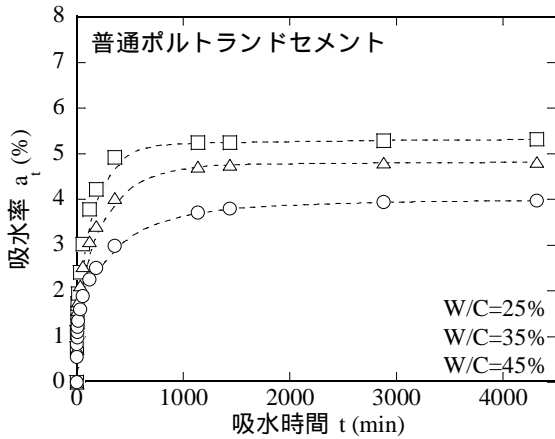


図 - 2 吸水試験に基づく経時変化

トランドセメント(T社)を用いた。細骨材は山砂,粗骨材は硬質砂岩碎石を用いた。コンクリートの水セメント比は高強度を対象としているため,W/C25,35,45%の3水準とし,所定の施工軟度得られるように高性能AE減水剤を用いた。コンクリートの実施調査を表-1に示す。

## 2.2 試験項目及び方法

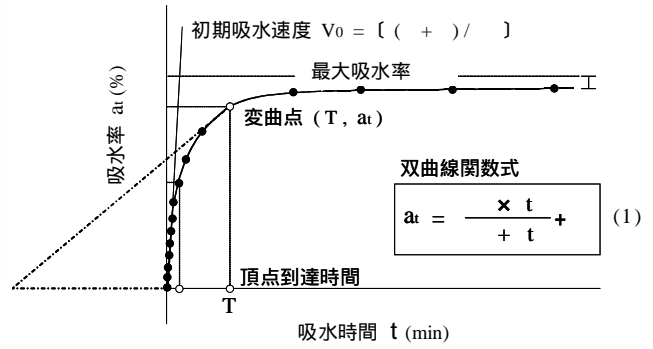
### (1) 吸水試験

試験方法の概念を図-1に示す。試験は、10 × 20cm 試験体を4週間標準養生したのち、含水率を調整するため温度70 °Cの炉中で乾燥させ同一調合の試験体に対して試験開始時の初期含水率0% (許容値の範囲3 ~ 7%)、25% (許容値の範囲22 ~ 27%)、50% (許容値の範囲41 ~ 55%)の3水準を基本として試験を実施するものとした。吸水試験は所定の時間間隔で試験体を水中に浸漬したのち気中に取り出して表面水を除去し、質量の増加を計測することを繰り返すものとした。なお、ここでいう初期含水率は、湿潤状態の試験体の含水量に対する割合のことをいう。

## 3. 実験結果と検討

### 3.1 吸水率 - 時間 曲線

吸水試験の結果に基づき、時間経過(t)にともなう吸水率(a<sub>t</sub>)の経時変化の一例を示せば、図-2となる。a<sub>t</sub>-t曲線は調合や初期含水率が異なる場合においても、いずれもきわめて良好な双曲線関数として示すことができ、図-3に示す数学的モデルに近似する。したがって、 $V_0$ 、 $T$ 、 $a_t$ などの実験定数は調査条件が異なるごとに固有値として定量



$V_0$ : 初期吸水速度時間 t (min) が0の時の吸水曲線の傾き  
 $T$ : 頂点到達時間 (h) 吸水曲線の傾きが1になるときの時間

図 - 3 吸水率 - 時間曲線の概念

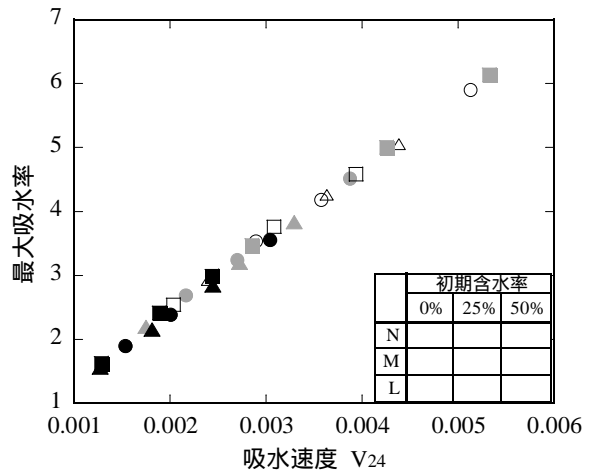


図 - 4 吸水試験に基づく経時変化

化することができる。また、それらの固有値をパラメータとする固有値解析により吸水性状を比較検討したり、吸水以外の物性値との相関性を検討することが可能となる。

なお、図-3に示す基本式(1)の実験定数  $V_0$ 、 $T$ 、 $a_t$  はセメントの種類や水セメント比、初期含水率などによって変動するのでそれらの相互の関係を示せばセメントの種類ごとに次式となり、基本式(1)に代入することによって適合性の高い双曲線関数を得ることができる。

$$N: a_t = \frac{V_0 \times t}{T + t} + a_0 \quad (2)$$

$$M: a_t = \frac{V_0 \times t}{T + t} + a_0 \quad (3)$$

$$L: a_t = \frac{V_0 \times t}{T + t} + a_0 \quad (4)$$

$$N: a_t = \frac{V_0 \times t}{T + t} + a_0 \quad (5)$$

$$M: a_t = \frac{V_0 \times t}{T + t} + a_0 \quad (6)$$

$$L: a_t = \frac{V_0 \times t}{T + t} + a_0 \quad (7)$$

ここに、W/C: 水セメント比 (%)

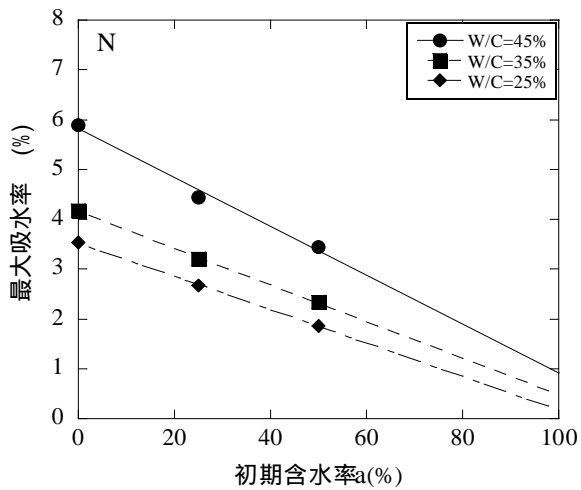


図 - 5 Nにおける初期含水率と最大吸水率の関係

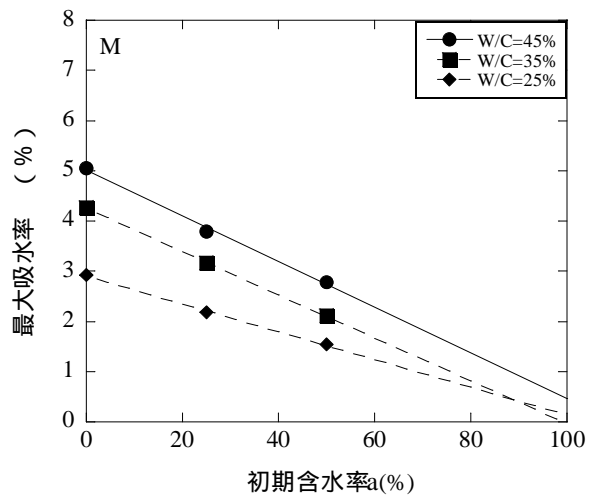


図 - 6 Mにおける初期含水率と最大吸水率の関係

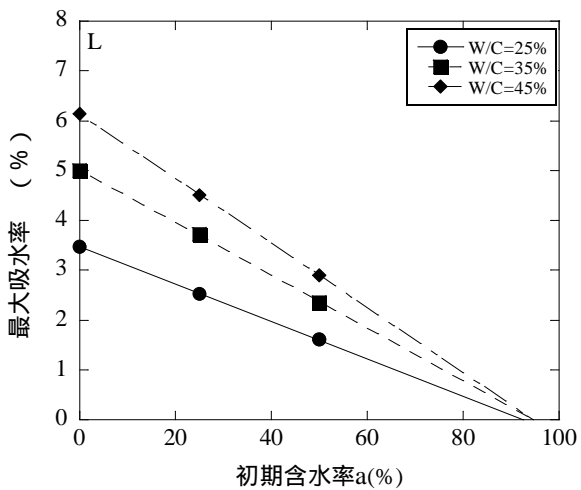


図 - 7 Lにおける初期含水率と最大吸水率の関係

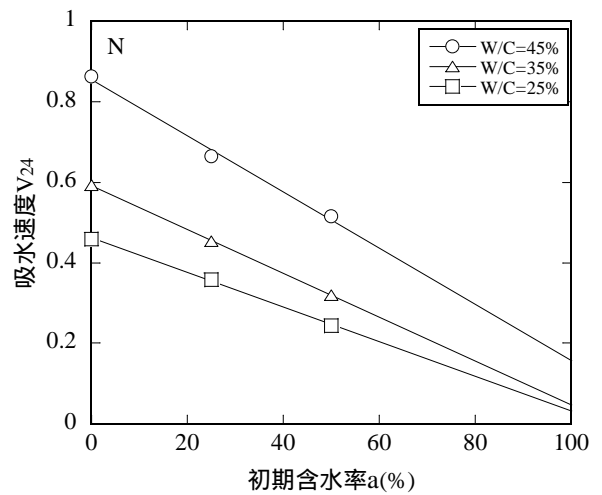


図 - 8 Nにおける初期含水率と吸水速度V<sub>24</sub>の関係

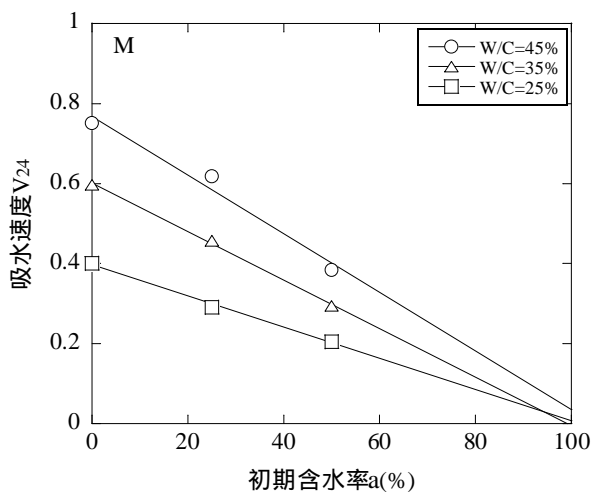


図 - 9 Mにおける初期含水率と吸水速度V<sub>24</sub>の関係

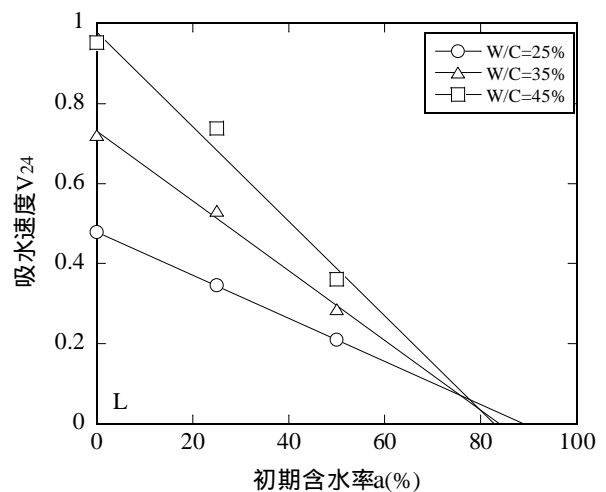


図 - 10 Lにおける初期含水率と吸水速度V<sub>24</sub>の関係

a: 初期含水率(%)

水セメント比は後述の(3)吸水特性と水セメント比から精度良く算定することができる。

### 3.2 コンクリートの吸水特性

#### (1) 吸水速度と最大含水率

ここに、1つのデータの解析例として、水中浸漬24時間経過時点の平均吸水速度  $V_{24}$  を求めて、吸水試験終了時の最大吸水率との関係を示せば、図 - 4 となる。図 - 4 によれば、水セメント比の大きいコンクリートほど吸水速度は大きく、かつ最大含水率との関係ではほぼ直線的に推移している。また、初期含水率の小さいコンク

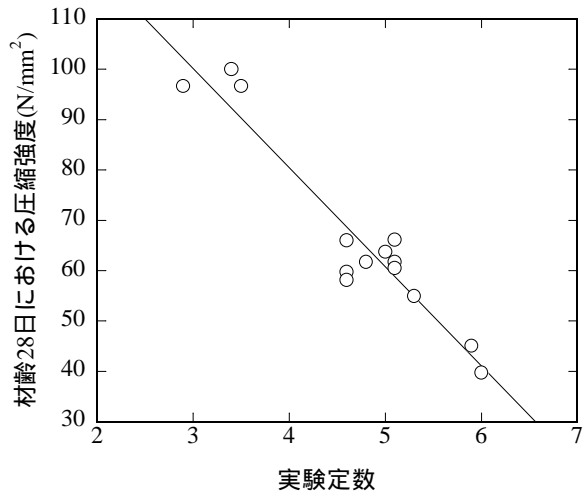


図 - 11 実験定数 と圧縮強度の関係

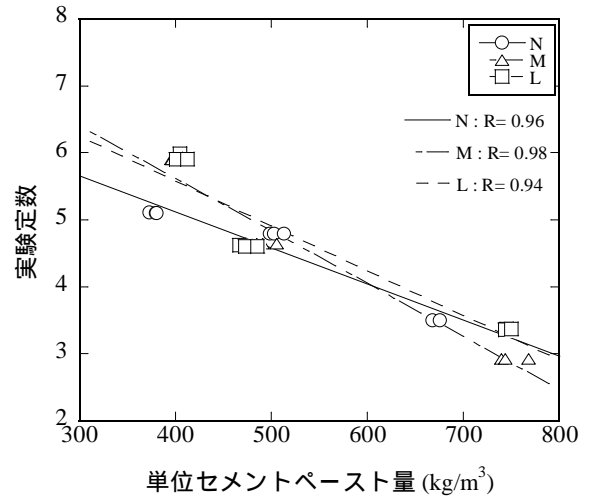


図 - 12 単位セメント量と実験定数 の関係

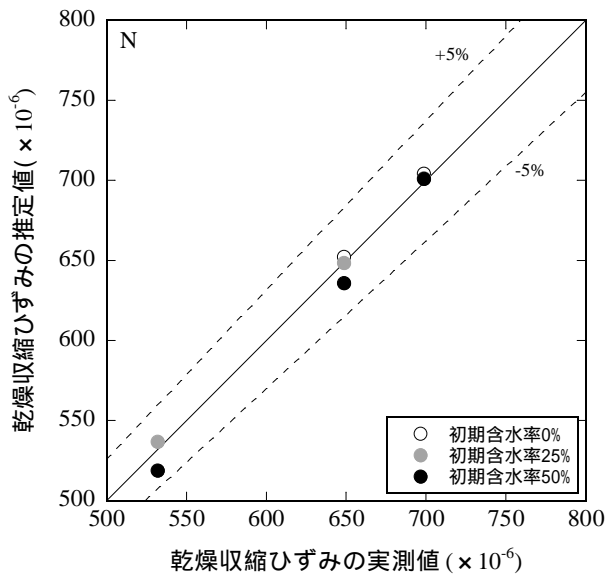


図 - 13 Nにおける乾燥収縮ひずみの推定精度

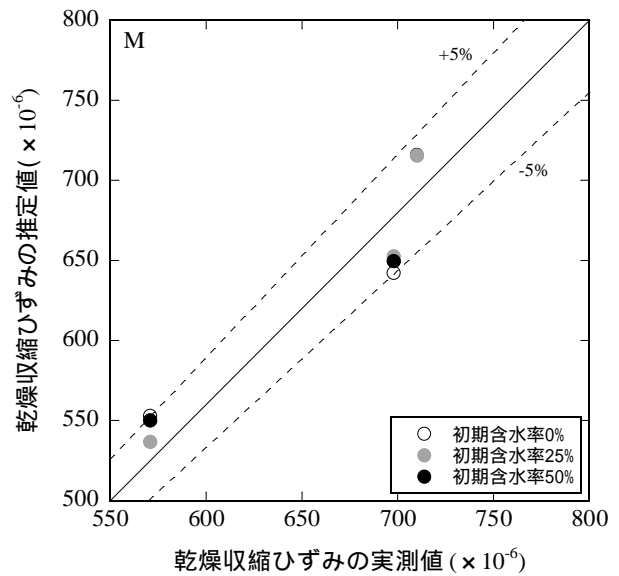


図 - 14 Mにおける乾燥収縮ひずみの推定精度

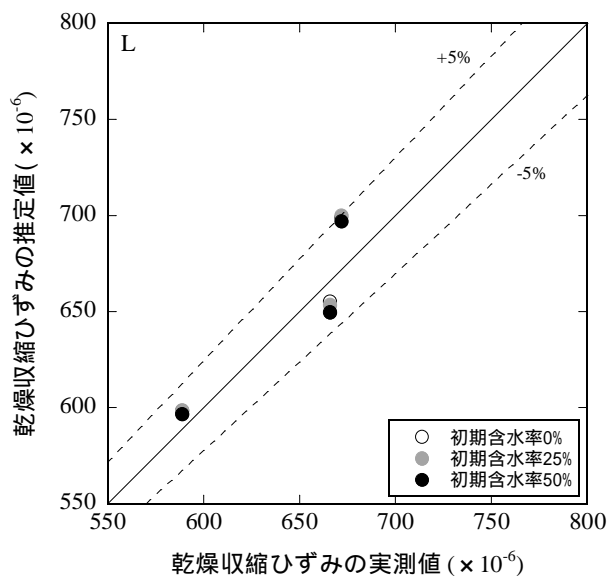


図 - 15 Lにおける乾燥収縮ひずみの推定精度

リートでは吸水速度は大きくなり、最大含水率との関係ではほぼ直線的に推移している。また、初期含水率の小さいコンクリートでは吸水速度は大きくなり、最大含水率との関係ではほぼ直線的な比例関係にある。セメントの種類が異なっても同様な傾向にあり、全体として $V_{24}$ とは良好な比例関係にある。

### (2) 初期含水率と最大含水率

図 - 4の結果を基本とし、初期含水率と最大含水率との関係を求めれば、図 - 5 ~ 7を得る。

### (3) 吸水特性と水セメント比

先の図 - 5 ~ 7に基づき、初期含水率と24時間水中浸漬時の平均吸水速度 $V_{24}$ との関係を示せば図 - 8 ~ 10となる。各図上にプロットされた実測点はいずれの場合も同一水セメント比ごとで良好な直線性を示し、各々に一定の傾きを求めることができる。次に、上記の直線の傾きと水セメント比との関係を示せば、セメントの種類ごとに

コンクリートの水セメント比を算定する一般式(8)~(10)を誘導することができる。この式による水セメント比の推定精度は良好で実施コンクリートの水セメント比に対する推定誤差±5%の範囲内にある。

$$N : W/C = \{(V_{24} + 0.1) / (-130) + 0.0003\} \times 5000 \quad (8)$$

$$M : W/C = \{(V_{24} - 0.003) / (-101) - 0.0007\} \times 5000 \quad (9)$$

$$L : W/C = \{(V_{24} - 0.06) / (-76) - 0.003\} \times 3333 \quad (10)$$

ここに、W/C：水セメント比(%)

V<sub>24</sub>：24時間浸漬時の平均吸水速度(%/h)

：初期含水率(%)

#### (4) 吸水特性と圧縮強度

吸水試験の結果からセメントの種類、水セメント比、初期含水率などの条件に基づき実験定数などを特定し、圧縮強度との関係を検討すると、図-11を得る。図-11から圧縮強度の推定が可能になり、表-1に示す標準強度に対して推定誤差±10%内にある。

#### (5) 吸水特性と乾燥収縮

一般に、コンクリートの乾燥収縮は、材料構成比のみに限定して大小を検討すれば、水セメント比と単位セメントペースト量によって大きく支配され、ともに大きくなるほど乾燥ひずみは増大する傾向にある。

ここで、吸水試験結果から値と表-1の単位セメントペースト量との関係を示せば図-12となり、セメントの種類によって若干の相違はあるものの、両者には十分な相関性が認められることから、この関係を用いてコンクリート中の単位セメントペースト量を特定することができる。次に、水セメント比(W/C)と単位セメントペースト量(W+C)を変数とする材齢26週における収縮ひずみS<sub>26</sub>(表-1)との関係を既往の文献<sup>5)</sup>を参考として求めると次式を得る。

$$N : S_{26} = 1.5 \{(5 \times W/C - 1) \times (W+C - 230) + 630\} + 314 \quad (11)$$

$$M : S_{26} = 1.7 \{(5 \times W/C - 1) \times (W+C - 230) + 630\} - 1816 \quad (12)$$

$$L : S_{26} = 2.7 \{(5 \times W/C - 1) \times (W+C - 230) + 630\} - 779 \quad (13)$$

ここに、S<sub>26</sub>：乾燥材齢26週における乾燥収縮ひずみ(×10<sup>-6</sup>)

W/C：水セメント比(%)

W+C：単位セメントペースト量(kg/m<sup>3</sup>)

推定式(11)~(13)の推定精度は図-13~15に示すように、誤差±5%の範囲にあり、十分な適合性を示しているものといえる。

#### (6) 吸水特性と中性化速度

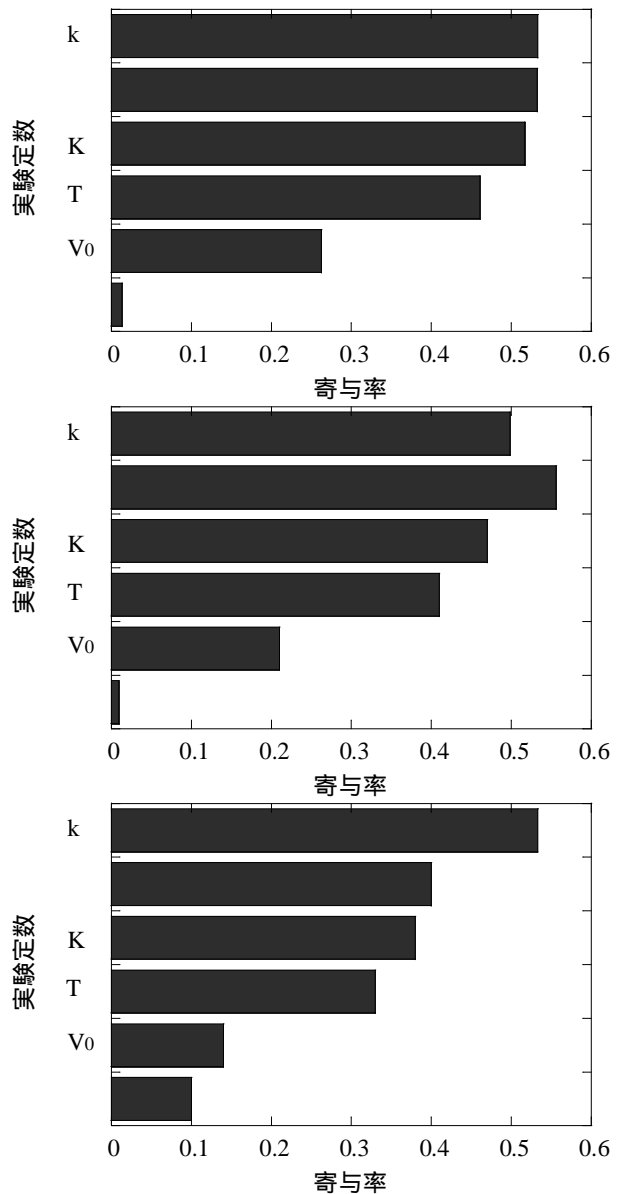


図-16 寄与率と実験定数および実験係数の関係

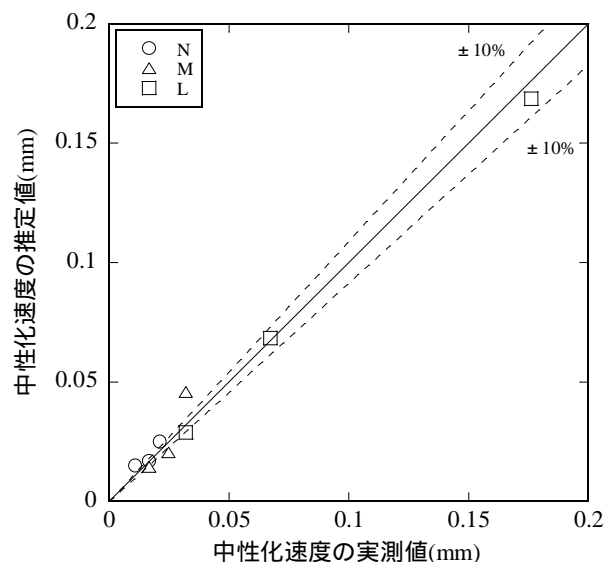


図-17 中性化速度の推定精度

寄与率と実験定数および実験係数の関係を図 - 16に示す。中性化速度の検討として多変量解析による重回帰分析を行った。吸水試験より得られる実験定数の中性化速度に対する寄与率を算出し、寄与率の高い上位2つの実験定数を用いて、重回帰分析を行い推定式を求めた。その際、実験係数kおよびKは単純に逆数関係の値であるため、寄与率のより高い方を用いた。ここで、中性化速度の推定式を(14)～(16)式に示す。

$$N : Vc=119k-0.2 \quad (14)$$

$$M : Vc=104k-0.6 \quad (15)$$

$$L : Vc=114k-1.05 \quad (16)$$

ここに、Vc：中性化速度 (mm/w)  
 k：実験定数  
 K：/(単位セメント量+単位水量)

推定式(14)～(16)の推定精度は図 - 17に示すように、誤差±10%の範囲にあり、十分な適合性を示しているものといえる。

#### 4. まとめ

吸水試験方法をより簡便なものとするため、特に吸水試験開始時に試験体中に含有水を含む場合について結果に及ぼす影響を分析し、定量的な検討を試みた。今回の研究を通じて主として次のような知見が得られた。

- (1)含水率 吸水曲線はセメントの種類、水セメント比、初期含水率の如何にかかわらず良好な双曲線関数として示すことができ、各々に実験定数、などを定量化することができる。
- (2)実験定数、などを固有値として、水セメント比を誤差±10%以内で精度良く推定することができる。
- (3)実験定数、値から単位セメントペースト量を誤差±5%の範囲で特定することができる。
- (4)実験定数、などを固有値として標準圧縮強度を非破壊的に推定することができる。
- (5)上記の結果(2)(3)から水セメント比と単位セメントペースト量を求めることにより、材齢26週における乾

燥収縮ひずみを推定誤差±5%の範囲で推定することができることを示した。

- (6)吸水試験より得られる実験定数の中性化速度に対する寄与率を算出し、寄与率の高い上位2つの実験定数を用いて、重回帰分析を行い推定式を求めた。その結果推定誤差±10%の範囲で推定できることを示した。

#### 5. おわりに

今後の目標や課題については、本報では高強度コンクリートを対象として展開しているが、一般的なコンクリートに対しても適合性が認められるかどうかについて検討を加えたい。また、より多くの実験データを蓄積して、本手法が簡便で総合的なコンクリートの物性評価法として定着することに努めたい。

#### 謝辞

本実験を行うにあたり、内山アドバンス 中央技術研究所の所員の方々、ものづくり大学 技能工芸学部 建設技能工芸学科 大塚研究室の学生および日本大学理工学部 建設学科 中田研究室の学生より多大な協力を頂きました。ここに記して深謝致します。

#### 参考文献

- 1) 許永東, 清水五郎: 吸水率 - 時間曲線に基づくコンクリートの品質評価に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第566号, pp.1-6, 2003.4
- 2) 石井新ほか: コンクリートの吸水性状に基づく品質評価に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2009.4
- 3) 久保田英樹ほか: 吸水性状に基づくコンクリートの品質評価に関する研究, 日本建築学会大会(東北), pp.619-620, 2009.8
- 4) 清水五郎ほか: 吸水速度に基づく高強度コンクリートの調合・強度の推定に関する研究, 日本建築学会大会(東北), pp.621-622, 2009.8
- 5) 庄谷征美, 米谷裕: 高性能減水剤を用いた高強度コンクリートの乾燥収縮および逸散水分の挙動について, 秋田高専研究紀要第14号, 1979.2