

論文 吸水性状に基づく高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみの評価に関する研究

久保田 英樹^{*1}・清水 五郎^{*2}・中田 善久^{*3}・須藤 絵美^{*4}

要旨:乾燥したコンクリートが吸水する際に、組成が異なると吸水速度や吸水量に顕著な差異を生ずる。つまり、それらの吸水性状はコンクリートの内部組成と密接に関連していると考えられることから品質を評価する手掛かりとなり得るか検討を重ねてきた。これまでの結果より吸水試験から得られる 吸水率 - 時間曲線 から実験定数を展開し、調合に関する材料構成比や圧縮強度を誤差10~15%程度内で推定できることを示してきた。本報では高強度領域にあるコンクリートの乾燥収縮に関して同様な手法によって吸水試験結果に基づき収縮ひずみの予測が可能かどうかについて検討を試み、適用性の高い結果を得ることができた。

キーワード: 吸水性状, 高強度コンクリート, 調合, 強度, 耐久性, 乾燥収縮

1. はじめに

コンクリートの品質評価の方法には、強度試験をはじめ、中性化および乾燥収縮などの耐久性試験や細孔径分析などの多様な試験方法が存在する。しかし、それらの試験の多くは、個別に試験結果を評価するものであり、総合的に評価する試験方法ではない。

本研究では、コンクリートが多孔質材料であり、材料の構成比や調合により、その粗密などの内部組成が異なることに着目し、吸水試験を実施し、その吸水性状から品質を総合的に判断できるか検討を行う。筆者らの既報の研究において、水セメント比が40~65%、セメントの種類が普通ポルトランドセメントおよび混和剤としてAE減水剤を用いた普通強度のコンクリートで検討を行い、コンクリートの吸水性状からコンクリートの調合および強度を推定できることを示した¹⁾。また、吸水性状と中性化速度に相関性があることも明らかにしており、乾燥収縮ひ

ずみに関しても推定が可能であることを示唆している。

既往の文献では、多数の実験データに基づく予測式の提案や複合則理論を用いたモデルに基づいて乾燥収縮ひずみの推定を行っているが、外的要因の影響を取り入れられないことや、構成材料の物性値を予測するのが困難などの問題がある²⁾。

そこで、本研究は、このことを踏まえて、高強度コンクリートを対象とし、当該試験方法の適合性について検討をおこなった^{3)~5)}。なお、本報では吸水試験結果に基づき収縮ひずみの予測が可能かどうかについて検討を試みた。

表 - 1 試験項目および試験概要

試験項目	JIS	概要
吸水試験	-	全面浸漬法 図-1参照
圧縮強度	A 1108	100 × 100mm 標準養生 4週
乾燥収縮	A 1129-2	コンタクトゲージ法

表 - 2 コンクリートの調合および各パラメータ

セメント種類	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					吸水試験の実験定数 at=(x t)/(+t)				乾燥収縮の実験定数		圧縮強度 (N/mm ²)	乾燥収縮ひずみ(×10 ⁻³) JIS A 1129-2									
		C	W	S	G	Ad		V ₀	T	s	s	1w		2w	3w	4w	8w	13w	17w	21w	26w		
N	45	378	170	881	871	2.65	5.11	49.44	0.081	0.075	1.27	6.99	1.80	45.2	2.29	3.98	4.13	4.70	5.68	6.39	6.57	6.89	6.99
	45	411	185	816	871	1.95	5.31	40.55	0.084	0.078	1.32	7.03	1.98	49.1	2.27	3.41	4.07	4.32	5.46	6.30	6.52	6.80	7.03
	35	486	170	1251	397	12.64	5.04	87.50	0.060	0.044	1.19	7.07	1.63	63.7	2.79	3.99	4.40	4.74	5.75	6.34	6.75	6.80	7.07
	35	486	170	1098	555	8.02	4.70	60.00	0.103	0.049	1.14	6.56	1.70	60.9	2.74	3.92	4.25	4.46	5.32	5.94	6.20	6.44	6.56
	35	486	170	793	871	5.83	4.62	58.33	0.102	0.049	1.12	6.30	1.85	59.7	2.23	3.32	3.99	4.28	5.03	5.63	5.91	6.14	6.30
	35	486	170	640	1029	4.86	4.31	49.17	0.081	0.053	1.06	5.90	1.85	66.9	2.09	3.33	3.72	3.97	4.66	5.31	5.54	5.76	5.90
	35	514	180	743	871	4.88	4.82	50.00	0.068	0.059	1.20	6.61	1.85	69.1	2.42	3.40	4.00	4.40	5.26	5.87	6.30	6.46	6.61
	35	529	185	720	871	3.97	5.12	50.83	0.073	0.062	1.28	6.72	1.90	61.7	2.61	3.45	4.05	4.45	5.40	6.00	6.38	6.55	6.72
	35	571	200	645	871	3.43	5.49	49.17	0.075	0.067	1.37	6.89	1.91	62.2	2.67	3.47	4.11	4.57	5.56	6.16	6.49	6.70	6.89
	25	680	170	673	871	9.52	3.50	72.00	0.088	0.032	0.69	5.32	1.06	96.7	2.67	3.19	3.62	3.86	4.33	4.75	4.95	5.16	5.32
M	45	378	170	886	871	1.89	5.43	45.45	0.094	0.073	1.35	6.93	2.55	47.1	2.33	3.12	3.59	4.21	5.37	6.23	6.59	6.89	6.93
	35	486	170	1259	397	12.88	5.06	70.71	0.072	0.046	1.21	7.49	2.06	60.5	2.90	3.83	4.53	4.84	6.02	6.64	7.08	7.23	7.49
	35	486	170	1106	555	6.44	4.83	56.06	0.091	0.059	1.20	7.39	2.37	62.3	2.80	3.51	3.88	4.60	5.83	6.50	6.87	7.20	7.37
	35	486	170	800	871	5.10	4.64	50.00	0.088	0.057	1.15	6.98	2.54	58.2	2.29	3.24	3.71	4.43	5.66	6.39	6.71	6.89	6.98
	35	486	170	648	1029	3.89	4.39	47.47	0.083	0.054	1.08	6.73	2.08	60.7	2.19	3.20	3.59	4.39	5.17	6.05	6.38	6.66	6.73
	35	514	180	751	871	4.88	4.35	46.97	0.053	0.053	1.07	7.13	2.40	69.3	2.35	3.29	4.06	4.67	5.71	6.43	6.79	6.94	7.13
	35	529	185	725	871	3.97	5.08	41.41	0.052	0.062	1.27	7.29	2.46	66.1	2.42	3.30	4.16	4.82	5.77	6.51	6.94	7.12	7.29
	35	571	200	653	871	3.14	5.57	37.37	0.064	0.081	1.38	7.86	2.59	56.9	2.57	3.40	4.32	4.94	6.15	6.86	7.42	7.65	7.86
	25	740	185	593	871	9.62	2.92	28.08	0.196	0.028	0.47	5.71	1.70	87.6	2.29	2.75	3.24	3.59	4.30	4.85	5.17	5.49	5.58

N: 普通ポルトランドセメント M: 中層熱ポルトランドセメント

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (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)
 *4 株式会社内山アドバンス 中央技術研究所

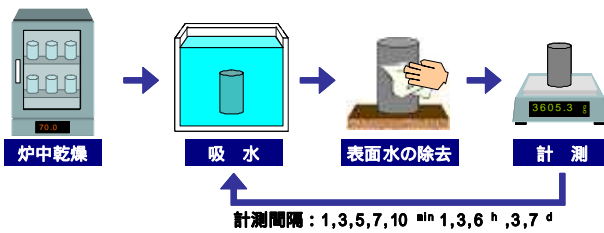


図 - 1 吸水試験の概要

2. 実験概要

2.1 試験項目および試験概要

試験項目および試験概要を表 - 1に示す。吸水試験は、アウトプット法にて実施した。なお、詳細については、後述する。圧縮強度試験はJIS A 1108に準拠し、材齢4週で実施した。また、乾燥収縮の測定は、JIS A 1129-2に準拠して実施した。

2.2 使用材料

コンクリートの使用材料として、セメントにおいては、普通ポルトランドセメント(以降、Nと称する)および中庸熱ポルトランドセメント(以降、Mと称する)を用いた。また、細骨材は、千葉県君津市産の山砂を用い、粗骨材は最大寸法20mmの埼玉県秩父市産の硬質砂岩砕石を用いた。また、高性能AE減水剤は、ポリカルボン酸系のものを用いた。

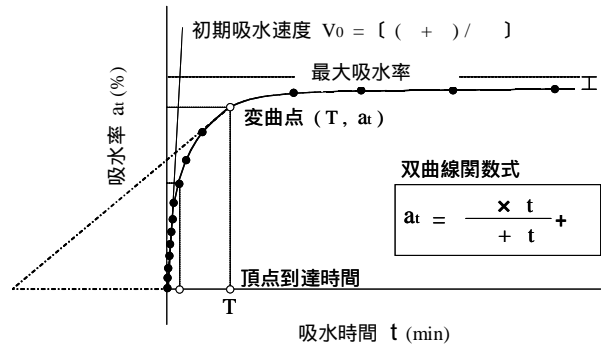
2.3 コンクリートの調合および試験体概要

コンクリートの調合および各パラメータを表 - 2に示す。コンクリートの調合は、NおよびMともに、水セメント比25%～45%とした。また、単位水量は、NおよびMともに170kg/m³～200kg/m³とした。なお、表中に示されている圧縮強度は、材齢28日の標準養生圧縮強度である。

試験体の形状は、10 × 20cmの円柱形で、脱型後、28日間標準養生を行った後、試験に供した。

2.4 吸水試験方法

吸水試験の概要を図 - 1に示す。従来の吸水試験方法には、全面浸漬法、供試体の一部を浸漬する部分浸漬法および毛管浸透法がある⁶⁾。本研究では、全面浸漬法に基づいて行った。すなわち、試験体を28日間標準養生した後、乾燥させ乾燥状態とした。試験体の乾燥は、便宜上、70～3日間の炉中乾燥とした。この時の乾燥状態は湿潤状態の含有水に対しておよそ95%の乾燥率であった。また、炉乾燥させることで、試験体表面にクラックが生じることが予想されるが、今回行った実験の範囲では試験体表面にクラックは確認されなかった。吸水試験は、図 - 1に示したように乾燥状態の試験体を所定時間水中に浸漬させ、表面水を除去した後、吸水量を計測する作業を繰り返し行うものとした。



: 最大吸水率 (%)

: 最大吸水率の1/2にいたる時間 t (min)

: 補正係数 ()

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 - 2 吸水率 - 時間曲線の概念

(1) 吸水率 - 時間曲線

吸水率 - 時間曲線の概念を図 - 2に示す。吸水率と吸水時間の関係をみると図 - 2のような曲線を描く。この曲線は、数学的モデルとしては、双曲線関数が良好に適合する(相関係数 $R^2=0.97$)¹⁾。このことから、以下の式(1)が展開できる。

$$a_t = \frac{V_0 \cdot t}{1 + t} + \quad (1)$$

(2) 実験定数

図 - 2の双曲線関数において $t=$ の時 $a_t = + = a_{max}$ となり、実験定数 + は、コンクリートの最大吸水率を表すことになる。実験定数 は、最大吸水率の1/2にいたる時間t(min)を表し、実験定数 は推定精度をあげるための補正係数である。また実験定数 V_0 は、初期吸水速度時間t(min)が0の時の吸水曲線の傾きを示し、実験定数Tは、曲線の頂点到達時間(h)を示しており、即ち吸水曲線の傾きが45°になるときの時間(h)を示している。

2.5 乾燥収縮試験方法

乾燥収縮試験は、JIS A 1129-2のコンタクトゲージ方法とし、試験体の寸法は、100 × 100 × 400mmの直方体で、材齢1日で脱型し、材齢7日まで標準養生を行った後、温度 20 ± 1 、湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室に保管し、所定の乾燥材齢において測定した。

3. 結果および考察

3.1 吸水率の経時変化

吸水試験に基づく経時変化を図 - 3に示す。Nにおいては、水セメント比が小さくなるほど吸水率も減少する傾向を示した。これは、水セメント比が小さくなると、コンクリートの内部組成が密になったためと考えられる。また、Mにおいても、水セメント比が小さくなると吸水率が減少する傾向がみられた。また、NとMを比較すると

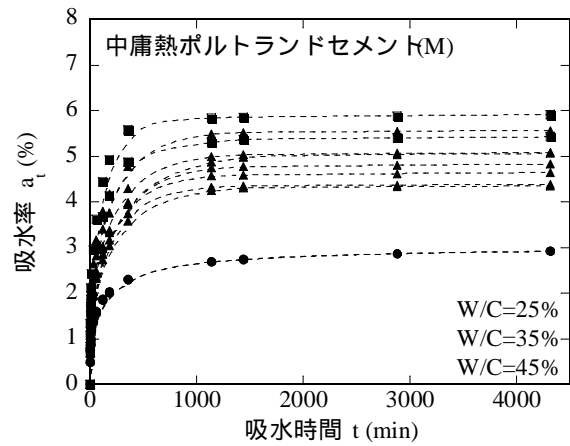
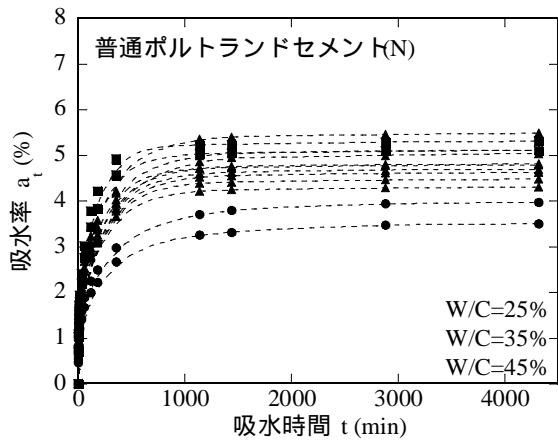


図 - 3 吸水試験に基づく経時変化

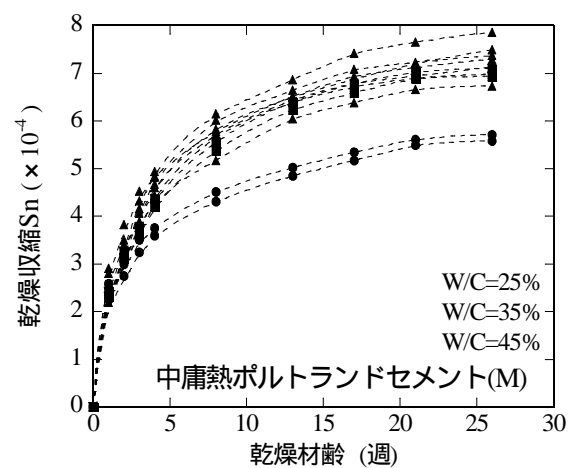
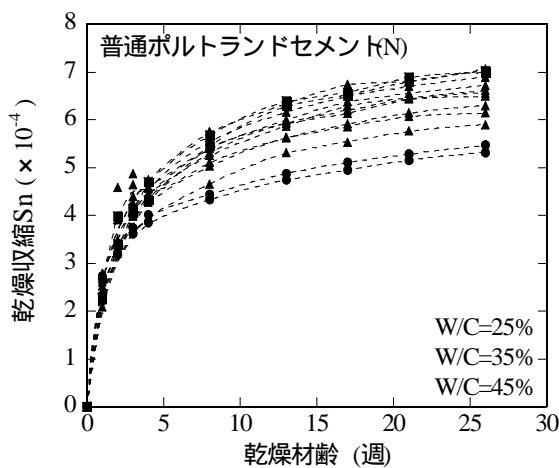


図 - 4 乾燥材齢と収縮ひずみの関係

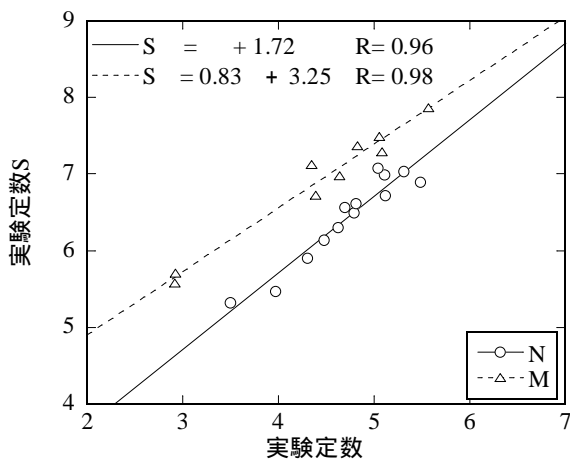


図-5 実験定数 と s の関係

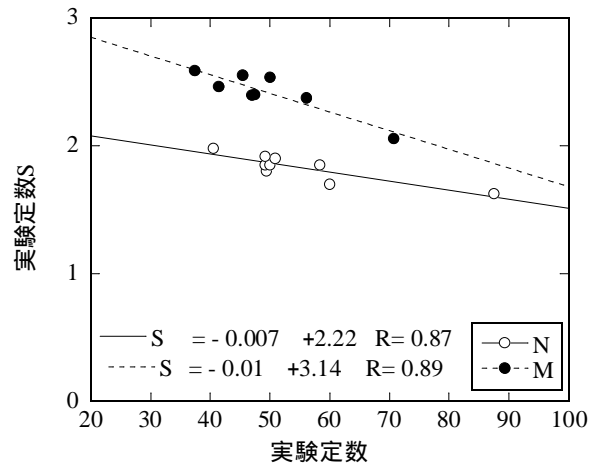


図-6 実験定数 と s の関係

全体的にMの方が吸水率が大きい結果となった。これは、ポルトランドセメントの組成化合物である、けい酸三カルシウム(C₃S)がけい酸二カルシウム(C₂S)に比べ、少ない¹⁷⁾Mにおいては、吸水試験開始時の材齢である28日では水和反応が十分に進行していないことが原因であると考えられる。なお、これらの曲線は、いずれも良好な双曲線関数として捉えることができる。ここで、双曲線関数を式(1)として、各々調合に対応する s , S を求め、その結果を表 - 1

に示した。結果の適合性はR=0.98となり良好な相関性を示している。

3.2 乾燥収縮ひずみの経時変化

乾燥収縮ひずみの26週にいたる経時変化(Sn-t)を図 - 4に示す。収縮ひずみは、いずれも、材齢の経過とともに平滑に増大し、先の吸水性状と同様に、双曲線関数を式(2)として検討すれば全体のデータに対して相関係数R=0.99となり十分な相関性が認められる。各々の調合

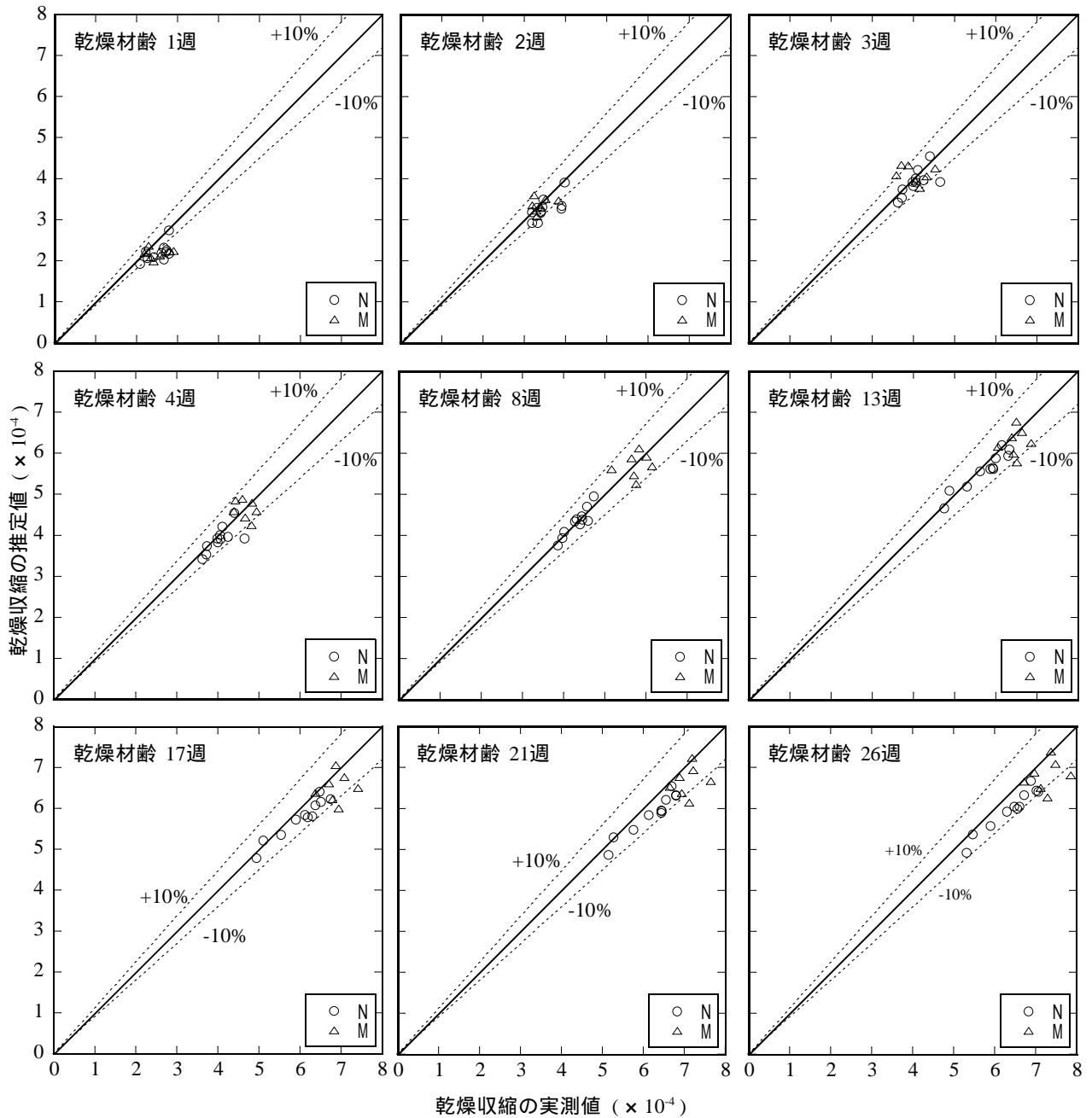


図-7 乾燥収縮の実測値と推定値との関係

に対応する実験定数を求め表-1に示した。

$$S_n = \frac{S \times t}{S + t} \quad (2)$$

3.3 吸水性状と収縮ひずみとの関係

先に示した $(-t)$ および $(S_n - t)$ の経時変化はいずれも双曲線関数として良好に適合することに言及し、各々の実験定数を表-1に示した。 $(-t)$ と $(S_n - t)$ との関係を検討するために各々の実験定数を比較対応すれば図-5および図-6を得る。これらの結果によれば、各々の定数間にほぼ直線的な関係が認められることから、この関係を用いて両試験結果を連立させることができる。すなわち、コンクリートの吸水試験結果から収縮ひずみを予測することが可能となる。

3.4 収縮ひずみ推定式

コンクリートの吸水性状から収縮ひずみを推定するための推定式は次の展開から得られる。

$$S_n = \frac{S \times t}{S + t} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Nの場合} \quad S &= +1.72 \\ \text{Mの場合} \quad S &= 0.83 \quad +3.25 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Nの場合} \quad S &= -0.007 \quad +2.22 \\ \text{Mの場合} \quad S &= -0.01 \quad +3.14 \end{aligned} \quad (4)$$

式(2)の基本式に式(3)および式(4)を代入して

$$\text{Nの場合} \quad S_n = \frac{(+1.72) \times t}{(-0.007 \quad +3.25) + t} \quad (5)$$

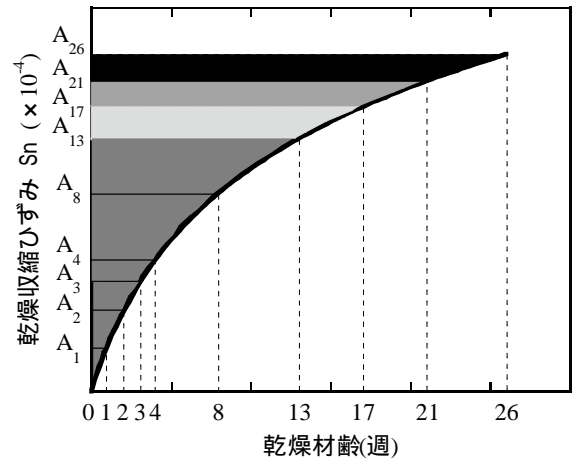
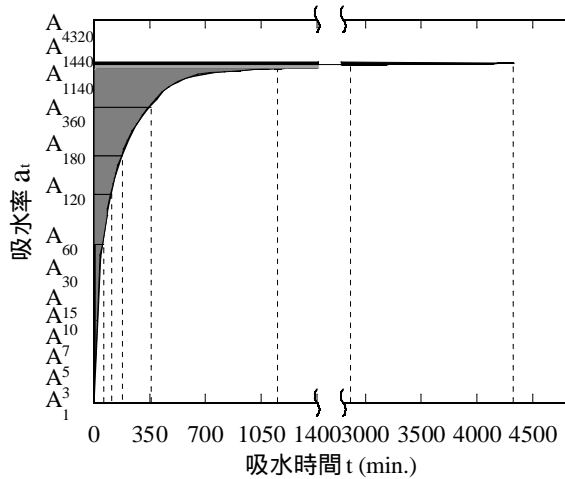


図 - 8 吸水率 - 時間曲線(- t)および乾燥収縮の経日変化曲線(s - t)における実験定数A_tの範囲

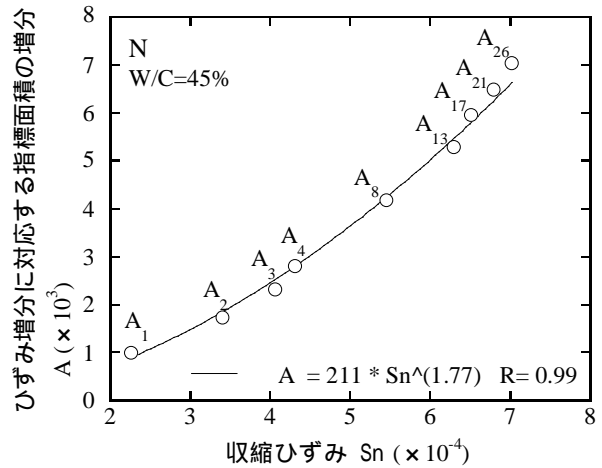
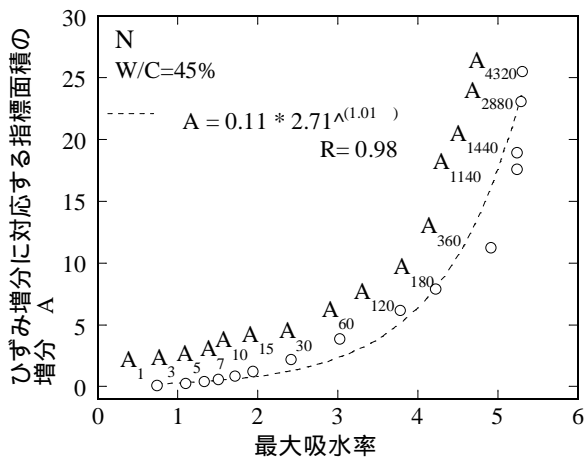


図 - 9 最大吸水率 および乾燥収縮ひずみ S_n と A との関係

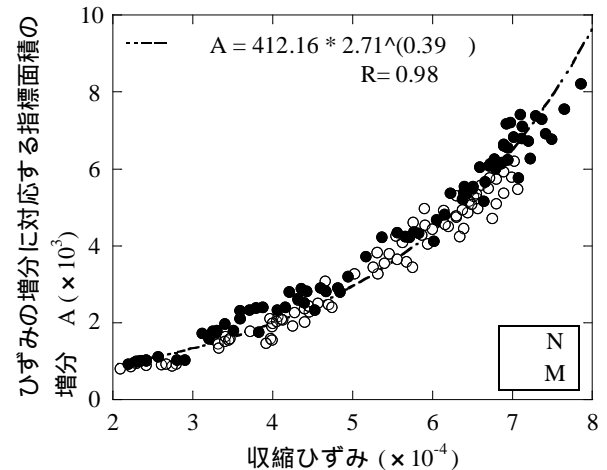
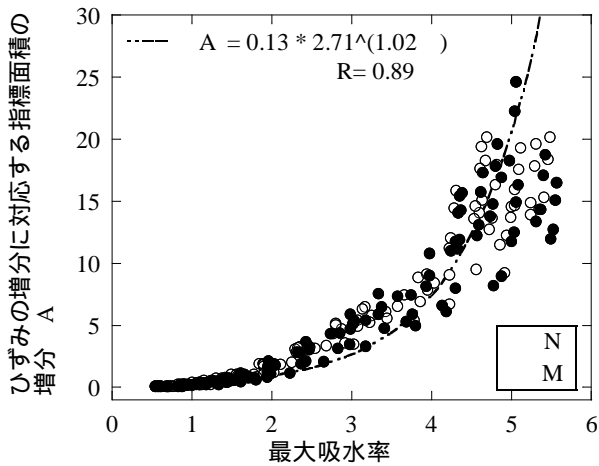


図 - 10 最大吸水率および乾燥収縮ひずみとひずみ上部に対応する指標面積の増分 A の関係

M の場合
$$S_n = \frac{(0.83 + 3.25) \times t}{(-0.01 + 3.14) + t} \quad (6)$$

ここに、S_n : 乾燥収縮ひずみ (× 10⁻⁴)
 : 最大吸水率
 : 最大吸水率にいたる 1/2 の時間
 t : 材齢 (週)

3.5 推定精度

乾燥収縮ひずみの実測値と推定値との関係を図 - 7 に示す。式(5)および式(6)の推定式より乾燥収縮ひずみの推定値を算出することが可能である。推定精度は、概ね誤差 ± 10% の範囲にあるが材齢 13 週を超える推定値は、やや過小評価の傾向にある。なお、コンクリートの吸水性状は、コンクリートのち密性などの内部組織を間接的に表現する

ものであり、乾燥収縮とはほぼ表裏一体の関係にあり吸水性状と乾燥収縮の両者には密接な相関性が認められるものとする。したがって、コンクリートの長期性状を早期に推定する方法の一環を成すものと思われる。

3.6 双曲線(-t) ,(S-t)の検討

(-t) ,(S-t)の各々において収縮ひずみ(Sn)や吸水率(at)の増分に対する各曲線の上部の面積 A(例えば図 - 8参照)を求め、Snまたは atとの関係を示せば、図 - 10となる。これらの分析結果は指数関数として分布しているので異なる視点からの推定手法として展開の一助となる。

$$A = (t \times At) - \left(\frac{t}{60} \right) \times t - \left(\frac{t}{60} \right) \log \left(\frac{60}{t + \frac{60}{60}} \right) \quad (7)$$

ここに、 A : 吸水率の増分に対する曲線上部の面積
 At : 各吸水時間における吸水率の増分に対する曲線上部の面積
 : 最大吸水率
 : 最大吸水率にいたる1/2の時間
 : 補正係数
 t : 吸水時間 (min.)

4. まとめ

コンクリートの乾燥収縮を簡便に予測する手法として、吸水試験との関係を分析して相関性を検討した結果、次のような所見が得られた。

- (1) コンクリートの吸水試験における吸水率-時間曲線(-t)並びに乾燥収縮の経時変化曲線(s-t)はいずれも双曲線関数として適合性が高く、これによって定量化することができる。
- (2) 吸水率-時間曲線(-t)と乾燥収縮の経時変化曲線(S-t)の各々の実験定数間には比較的良好な相関性が認められることから、吸水試験結果に基づき、次式によって、同一材料を使用したコンクリートの場合、吸水性状から収縮ひずみを相対的に評価することができる。
- (3) 上式による収縮ひずみの推定精度は、概ね誤差 ± 10%の範囲にあるが、材齢13週を超える場合の推定値はやや過小評価の傾向にある。

5. おわりに

10 × 20cm供試体による比較的簡易で短期間に判定可能な吸水試験結果から、乾燥収縮の品質を評価することが可能であることを検証した。これは、コンクリートの吸水性状がコンクリートのち密性などの内部組織を間接的に表現するものであり、乾燥収縮とはほぼ表裏一体の関係にあり吸水性状と乾燥収縮の両者には密接な相関性が認められるものとする。したがって、コンクリートの長期性状を早期に推定する方法の一環を成すものと思われる。今後は中性化や凍結融解の抵抗性などの関連を含めて吸水性状がコンクリートの総合的な指標として有用であることを更に究明していきたい。

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) 清原千鶴ほか: 複合則理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.26, pp.489-494, 2004
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 笠井芳夫, 池田尚治: コンクリートの試験方法, 技術書院, pp.145-146, 1993
- 7) セメントの常識, セメント協会, 2007.1