

論文 厚さおよび脱型時期が異なるコンクリート壁体中の水分挙動

溝口 真史*1・杉山 央*2

要旨：コンクリートの水セメント比，厚さ，脱型時期が異なる各種の壁試験体を作製し，それらの試験体中の水分挙動の解明を試みた。その結果，壁厚が小さいほどコンクリート全体の含水率が低下しやすいこと，脱型材齢が早いほど，また水セメント比が大きいほど表面部の含水率の低下が著しいことがあきらかになった。また，コンクリート打ち込みからの含水率の経時変化を簡便に推定計算する方法を検討した。

キーワード：含水率，脱型，セメント水和反応，拡散方程式

1. はじめに

コンクリートからの水分逸散や水分の移動は，コンクリートの強度や耐久性に大きな影響を及ぼす。このため，図-1に示すようにコンクリート中の水分挙動（移動と逸散を含めたもの）を解明し，さらには的確に予測することができれば，品質の良いコンクリートを作ることに活用できる。そこで，本研究では，コンクリートの水セメント比，厚さ，脱型時期が異なる各種の壁試験体を作製し，それらの試験体中の経時的な水分挙動を解明するとともに，その推定方法について検討した。

コンクリート中の含水率を測定する手法としては，供試体の気乾質量と絶乾質量とから求める方法（質量法），電気的方法^{1), 2)}，湿度から間接的に求める方法³⁾，中性子水分計による方法⁴⁾などが挙げられる。このうち，湯浅らの研究¹⁾により開発されたセラミックセンサ，佐野らの研究²⁾により開発された印加電圧センサはコンクリート打ち込み時にセンサを埋め込むことでコンクリート中の含水率を非破壊で長期にわたり測定することができる。特に，写真-1に示す印加電圧センサは汎用のデータロガーと接続することにより，設定した時間間隔での自動計測が可能である。そこで，本研究では，印加電圧センサを写真-2に示すような壁試験体の各位置に埋め込んで含水率の経時変化を調査した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料および調合

コンクリートに使用した材料は，普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³，比表面積：3140 cm²/g），大井川産川砂（表乾密度：2.56 g/cm³，吸水率：1.02%），青梅産砕石 5号（表乾密度 2.65 g/cm³，吸水率：0.78%），青梅産砕石 6号（表乾密度：2.56 g/cm³，吸水率：1.02%），ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤，AE減水剤 標準形（1種）である。表-1にコンクリートの調合を示す。

2.2 試験体の種類

表-2に壁試験体の種類を，図-2および図-3に印加電圧センサを埋め込んだ壁試験体および円柱供試体（以降，センサ供試体と表記）の形状・寸法を示す。これに加え，強

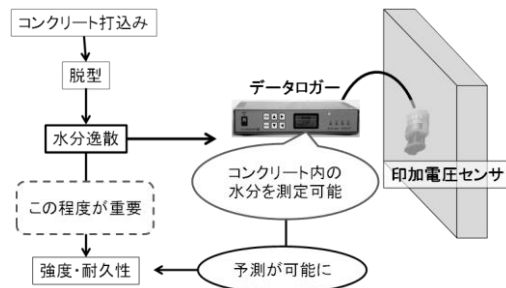


図-1 本研究の全体像



写真-1 印加電圧センサ



写真-2 壁試験体

表-1 コンクリートの調合

調合名	W/C (%)	単体量(kg/m ³)					Ad1 C×%	Ad2 C×%
		W	C	S	G1	G2		
N25	25	170	680	686	400	400	1.00	-
N55	55	170	309	827	483	483	-	0.81

※W: 栃木県水道水, C: 普通ポルトランドセメント, S: 大井川産川砂, G1: 青梅産砕石 5号, G2: 青梅産砕石 6号, Ad1: ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤, Ad2: AE減水剤 標準形（1種）

表-2 壁試験体の一覧

調合名	脱型時期	壁厚 (mm)	センサ位置 (表面からの距離mm)
N55	5日	100	0, 50
		200	0, 50, 100
		300	0, 50, 100, 150
	28日	200	0, 50, 100
N25	1日	200	0, 50, 100
	5日	200	0, 50, 100

*1 宇都宮大学大学院工学研究科 博士前期課程（学生会員）

*2 宇都宮大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)（正会員）

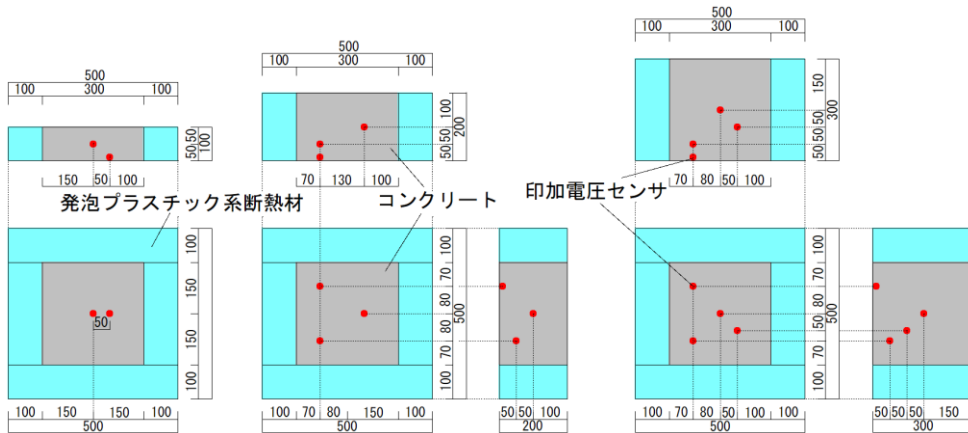


図-2 試験体の種類(左:壁厚 100mm, 中:壁厚 200mm, 右:壁厚 300mm)

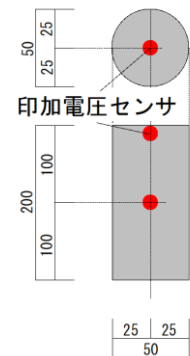


図-3 センサ供試体

制乾燥により含水率を測定する供試体(以降、含水率測定供試体と表記)を作製した。

壁試験体の種類は、調合が N55 と N25 の 2 種類、脱型時期が 1 日、5 日、28 日の 3 種類、壁厚が 100mm、200mm、300mm の 3 種類とし、全部で 6 個の試験体を作製した。印加電圧センサは表面から 5mm、50mm、100mm および 150mm の位置に温度測定用の T 型熱電対と一緒に埋め込んだ。試験体の養生方法は、所定の材齢に前後面の型枠を取り外した後、そのまま実験室内で気中養生とした。

円柱供試体は、センサ供試体と含水率測定供試体に共通して、1) 継続的な 20°C 一定の封かん養生 (以降、[円柱-封かん] と表記) および 2) 材齢 5 日まで 20°C 一定の封かん養生を行った後に 20°C 一定の気中養生 (以降、[円柱-気中-5d] と表記) の 2 種類とした。

2.3 印加電圧センサによる残留電圧の測定

印加電圧センサは、センサの先端部分の多孔質材料にコンクリート中のセメントペースト分を浸透させ、これに電圧を印加した後の残留電圧を測定する方式となっている²⁾。残留電圧はセメントペースト中の水分量と密接な関係があり、残留電圧を測定することでセメントペースト中の水分量の変化を相対的にとらえることができる。ただし、コンクリートの含水率を直接測定するものではないため、図-4 に示すように、別途、残留電圧と含水率の関係を調べ、その関係式をもとに含水率を算出する必要がある。

2.4 印加電圧センサによる測定結果の温度補正実験

印加電圧センサは、温度が異なることによって測定値に差異が生じる。このため、温度に応じた補正方法を検討するための実験を行なった。材齢 91 日の測定が終了したセンサ供試体の温度を 20→5→10→30→40°C の順に変化させた。温度制御は恒温恒湿器により行い、それぞれの設定温度を 72 時間保持し、各温度における残留電圧を測定した。

2.5 強制乾燥による含水率の測定

[封かん] は材齢 1, 3, 5, 7, 28 および 91 日に、[円

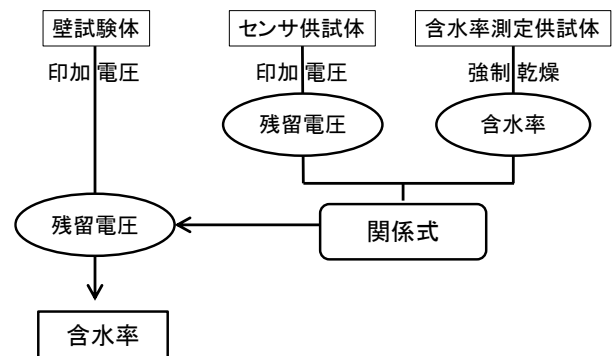


図-4 含水率の測定・計算手順

柱-気中-7d] は 28 および 91 日に含水率測定試験体の質量 M_{cw} (g) を測定し、その後温度 105°C で強制乾燥させた質量 M_{cd} (g) を求めた。これらの質量をもとに、次式により、含水率 W (%) を算出した。

$$W = \frac{M_{cw} - M_{cd}}{M_{cd}} \times 100 \quad (1)$$

3. 実験結果

3.1 印加電圧センサによる測定結果

印加電圧センサで測定される残留電圧 v (mV) は、センサ先端部分の多孔質部分の空隙率、セメントペーストの浸透の程度等に影響を受ける。すなわち、同一のコンクリートを試料としても、印加電圧センサによって残留電圧が異なる。そこで、本研究では、各々の印加電圧センサにおける測定開始時の残留電圧 v_0 (mV) を基準とした式 (2) に示す残留電圧率 V (%) を指標として用いることにした。

$$V = \frac{v}{v_0} \times 100 \quad (2)$$

なお、 $V=0\%$ の時は、コンクリートの含水率が 0% になる。図-5 に残留電圧率と温度 T_c (°C) の経時変化を示す。

3.2 残留電圧と含水率の関係

センサ供試体で測定した残留電圧率と含水率測定供試体で測定した含水率 W (%) の関係を図-6 および図-7 に

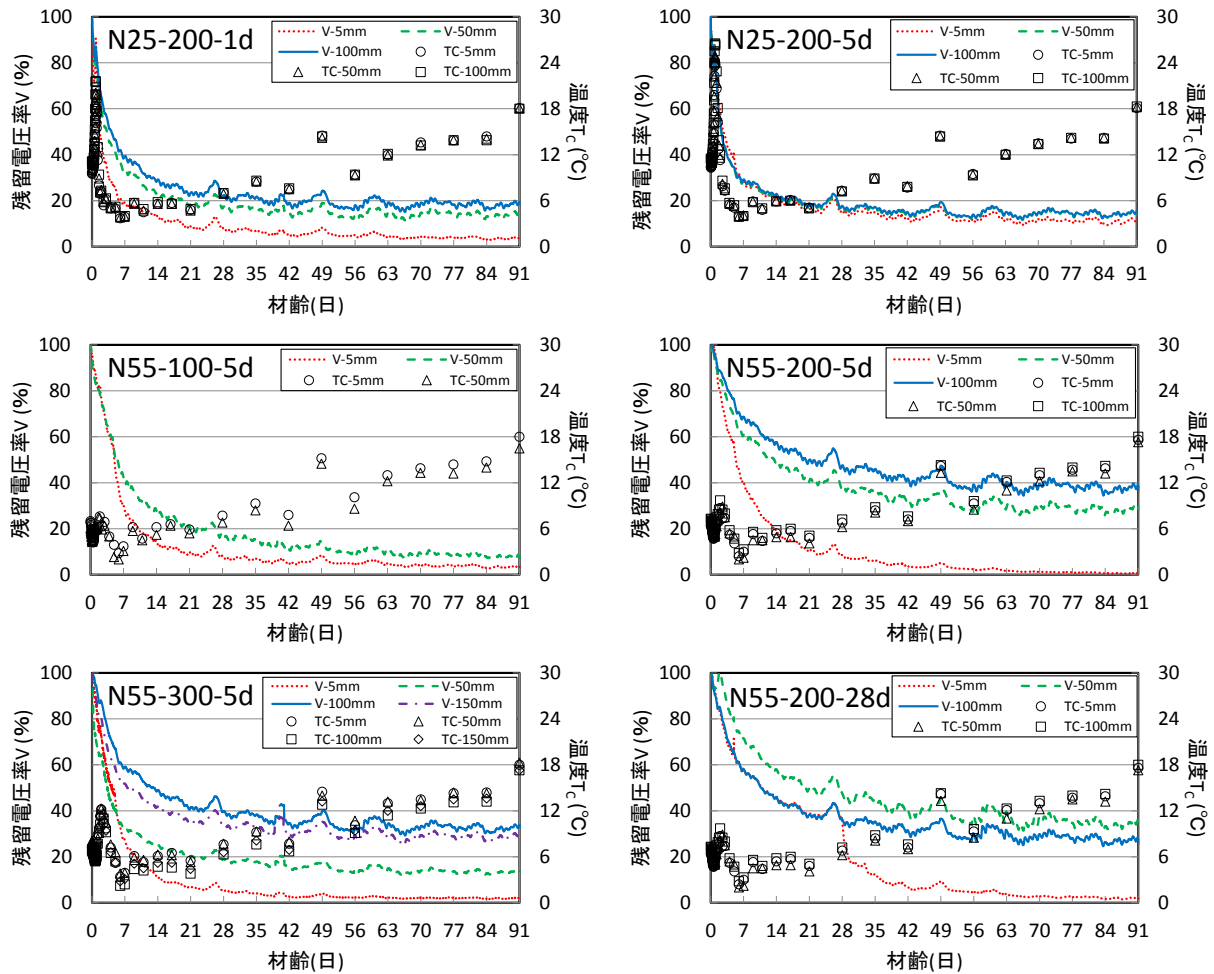


図-5 残留電圧率と温度の経時変化

示す。また、両者の関係を近似的に次式で表した。

$$W = B \cdot V^C \quad (3)$$

ここに、 B および C ：定数である。最小二乗法により B および C の値を求めたところ、N25では $B=1.964$ および $C=0.270$ 、N55では $B=1.908$ および $C=0.306$ が得られた。

3.3 残留電圧率の温度補正

センサ供試体から得られた式(3)は印加電圧センサが20°Cにおける残留電圧率と含水率の関係式となる。このため、壁試験体の任意の温度の残留電圧率を、20°Cにおける残留電圧率に変換する必要がある。

2.4に示した温度補正実験より、温度5、10、20、30および40°Cにおける残留電圧率を求めた。その結果をもとに、アレニウスプロットを用いることで、温度と残留電圧率の関係を求めた。 $\ln(V)$ と $1/T_k$ (T_k : 絶対温度)の関係を図-8および図-9に示す。また、両者の関係を近似的に次式で表すことにした。

$$\ln(V) = -F(1/T_k) + G \quad (4)$$

ここに、 F および G ：定数である。最小二乗法により F および G の値を求めたところ、N25では $F=4319$ および $G=17.9$ 、N55では $F=1950$ および $G=11.8$ が得られた。

式(4)を用いて、任意の温度 T_k (K)における残留電圧率

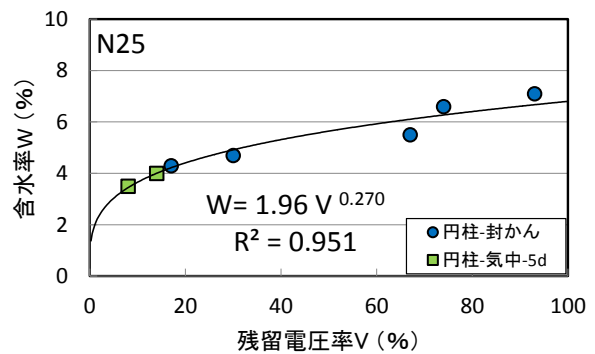


図-6 残留電圧率と含水率の関係(N25)

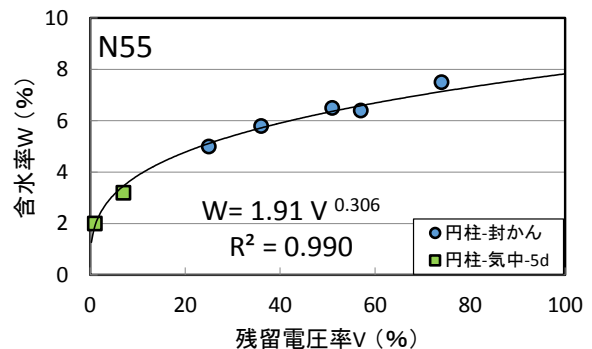


図-7 残留電圧率と含水率の関係(N55)

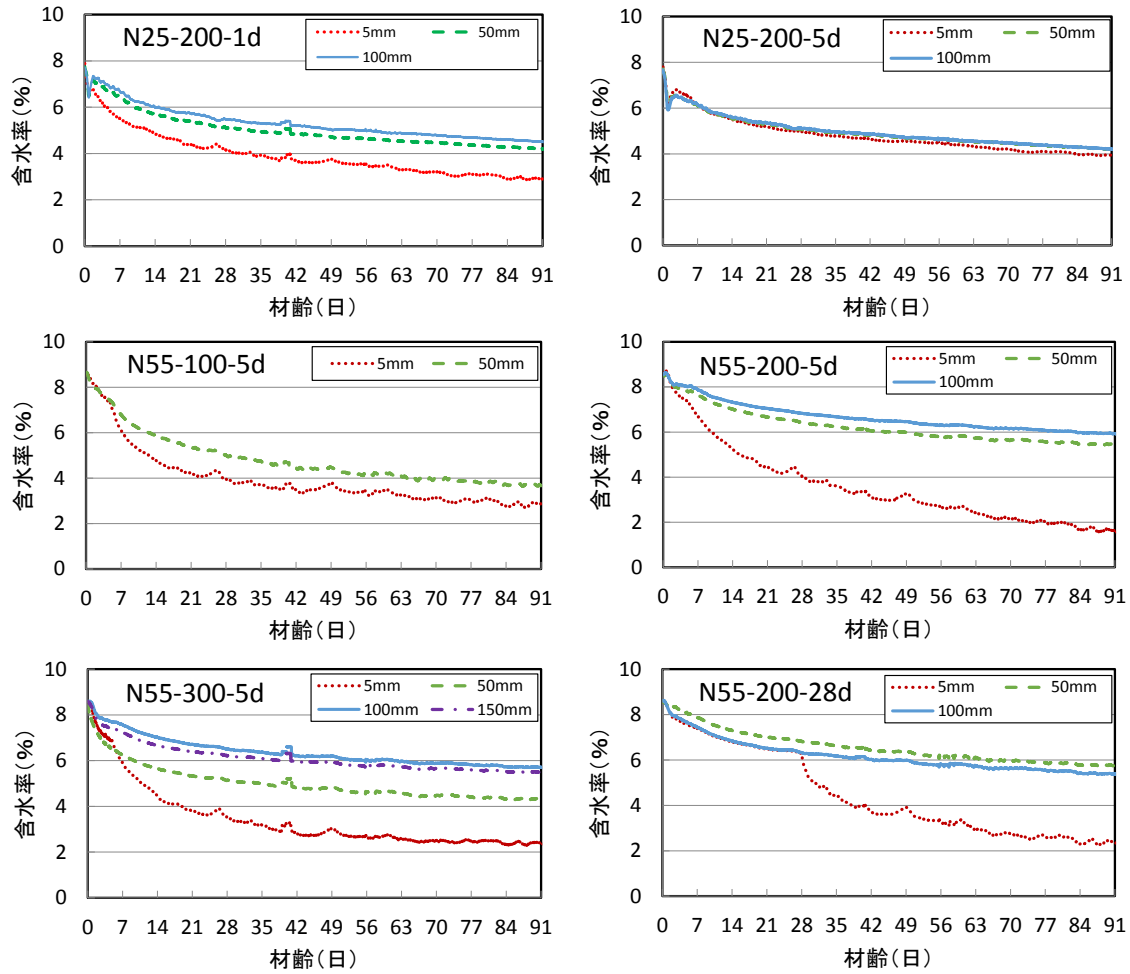


図-10 含水率の経時変化(実測値)

V を 20°C における残留電圧率 V_{20} に変換するための式を、次式のように導いた。

$$V_{20} = V \cdot \exp\{F\{(1/T_k) - (1/293.15)\}\} \quad (5)$$

3.4 含水率の経時変化

図-10に各壁試験体の含水率の経時変化(実測値)を示す。これは、それぞれの設置位置の印加電圧センサで測定された残留電圧率を式(5)により補正した値を入力値として、式(3)を用いて算出した含水率である。

N25の試験体については、材齢1日で脱型した直後から深さ5mmで含水率の低下がみられ、深さ50mmでも含水率の低下が少しみられた。しかし、材齢5日で脱型した場合は、深さ5mmでの含水率の低下がみられなかった。これより、材齢5日ではセメントの水和反応により組織が十分に緻密化され、脱型しても顕著な水分逸散が発生しなかったと考えられる。また、深さ100mmについては、[N25-200-1d]と[N25-200-5d]の材齢0~91日でほぼ同じ含水率を示したことから、材齢1日に脱型しても深さ100mmの水分はほとんど移動しないことがわかる。

N55の試験体については、材齢5日で脱型した場合に深さ5mmで含水率の急激な低下がみられ、材齢28日で脱型

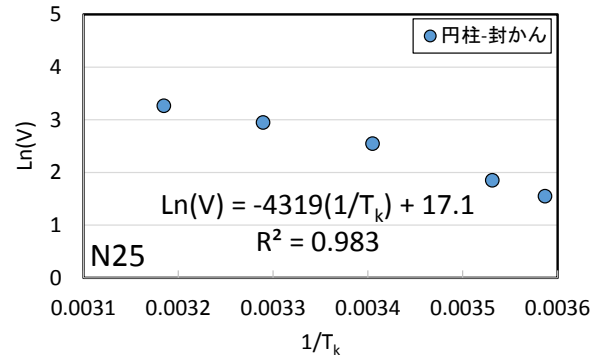


図-8 温度と残留電圧率の関係(N25)

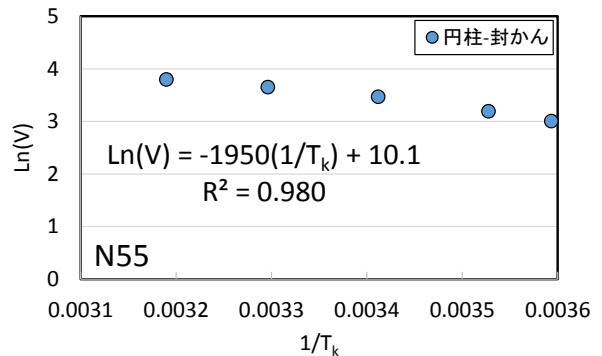


図-9 温度と残留電圧率の関係(N55)

した場合でも深さ 5mm で含水率の急激な低下がみられた。このことから、N55 のような水セメント比が大きい調合の場合は、封かん養生期間を長く設けても脱型後の表面からの水分逸散は著しいことがわかる。

壁厚が異なる [N55-100-5d] と [N55-300-5d] の材齢 91 日における深さ 50mm の含水率を比較すると、[N55-100-5d] で 3.7%、[N55-300-5d] で 4.3% であった。壁厚が小さな [N55-100-5d] の方が、内部に保有する水分量が少なく、結果として内部の含水率の低下が早く進行したものと考えられる。また、既往の研究⁹⁾において、水セメント比 55% のコンクリートでは概ね表面から 50mm 程度までが乾燥による影響を受ける範囲であることが指摘されているが、本研究の [N55-300-5d] でも同様の傾向が認められた。

水セメント比が異なる [N25-200-5d] と [N55-200-5d] の深さ 5mm の含水率を比較すると、[N55-200-5d] では脱型直後から含水率の急激な低下がみられたが、[N25-200-5d] では脱型しても含水率の顕著な低下がみられなかった。これは、N25 ではセメントの水和反応による生成物量が多く、組織が早期に緻密化され、脱型しても顕著な水分逸散が発生しなかったためと考えられる。

4. コンクリート中の水分の移動・逸散の計算

3. で測定した各種コンクリート壁試験体における含水率の経時変化を簡便に推定計算する方法を検討した。

4.1 基本式

コンクリート中の水分の移動・逸散を計算するために、Fick の第二法則を基本とした次式を設定した。

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} - h \quad (6)$$

ここに、 x : コンクリートの表面からの距離 (m)、 t : 時間 (s)、 $W(x, t)$: 距離 x 、時間 t における含水率 (%)、 D : 水分の拡散係数 (m^2/s)、 h : セメントの水和反応による水分消費速度 ($\%/s$) である。

4.2 セメントの水和反応で消費される水分量

コンクリート中の水分の移動・逸散とは別に、セメントの水和反応によってもコンクリートの含水率が変化する。そこで、外部との水分の出入りが無い [円柱-封かん] の含水率の減少量をセメントの水和反応による水分消費率 H (%) と仮定した。 H の経時変化を図-11 および図-12 に示す。また、 H の経時変化を近似的に次式で表した。

$$H = A \cdot \ln(t) + E \quad (7)$$

ここに、 A および E : 定数である。なお、 H を時間微分すると h になる。最小二乗法により A および E の値を求めたところ、N25 では $A=0.570$ および $E=-6.18$ 、N55 では $A=0.268$ および $E=-1.87$ が得られた。

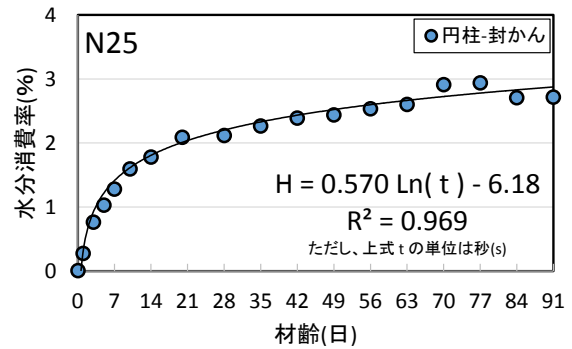


図-11 セメントの水和反応による水分消費率 (N25)

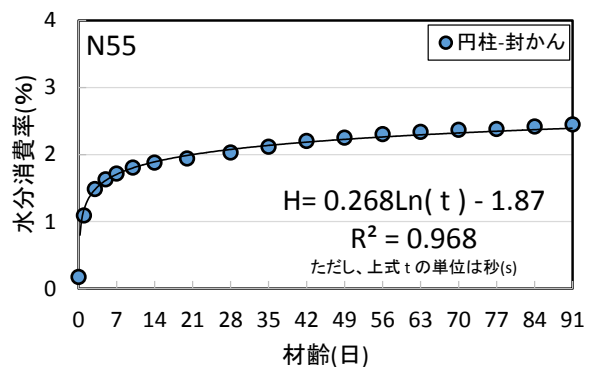


図-12 セメントの水和反応による水分消費量 (N55)

4.3 コンクリート中の含水率の推定計算

拡散係数 D の値については、N25 では [N25-200-5d]、N55 では [N55-200-5d] を取り上げ、それぞれの表面から 5mm の位置における材齢 7、10、14、28 および 91 日における含水率を式 (6) によって計算し、前記 5 材齢における計算値と実測値の偏差平方和が最小となるような D の値を求めた。すなわち、 D の値を $1.0 \times 10^{-12} \sim 5.0 \times 10^{-11}$ の範囲で $1.0 \times 10^{-13} (\text{m}^2/\text{s})$ の間隔で変えながら反復計算した。その結果、N25 は $3.4 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$ 、N55 は $2.7 \times 10^{-11} (\text{m}^2/\text{s})$ が得られた。N55 では寺島らの研究⁵⁾に示された $7.52 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$ の約 4 倍の値となり、N25 ではその約 2 分の 1 の値となった。

式 (6) により推定計算するにあたり、表面 ($x=0$) において、脱型前はコンクリートから外部へ水分は逸散せず、脱型後は迅速に水分が外部に逸散するものと仮定した。

図-13 に各壁試験体の含水率の経時変化 (計算値) を示す。なお、図中には含水率の実測値 (点プロット) も示す。N25 では、2 つの試験体に共通して、深さ 100mm の含水率の計算値は実測値よりも高くなった。[N25-200-1d] の深さ 5mm では、脱型直後から含水率が低下する傾向を計算により表すことができた。しかし、[N25-200-5d] の深さ 5mm では、実測値と異なり、含水率が低下する計算結果となった。これは、セメント水和反応による拡散係数の変化を考慮しなかったことが原因と考えられる。

N55 では、いずれの試験体でも、深さ 100mm および

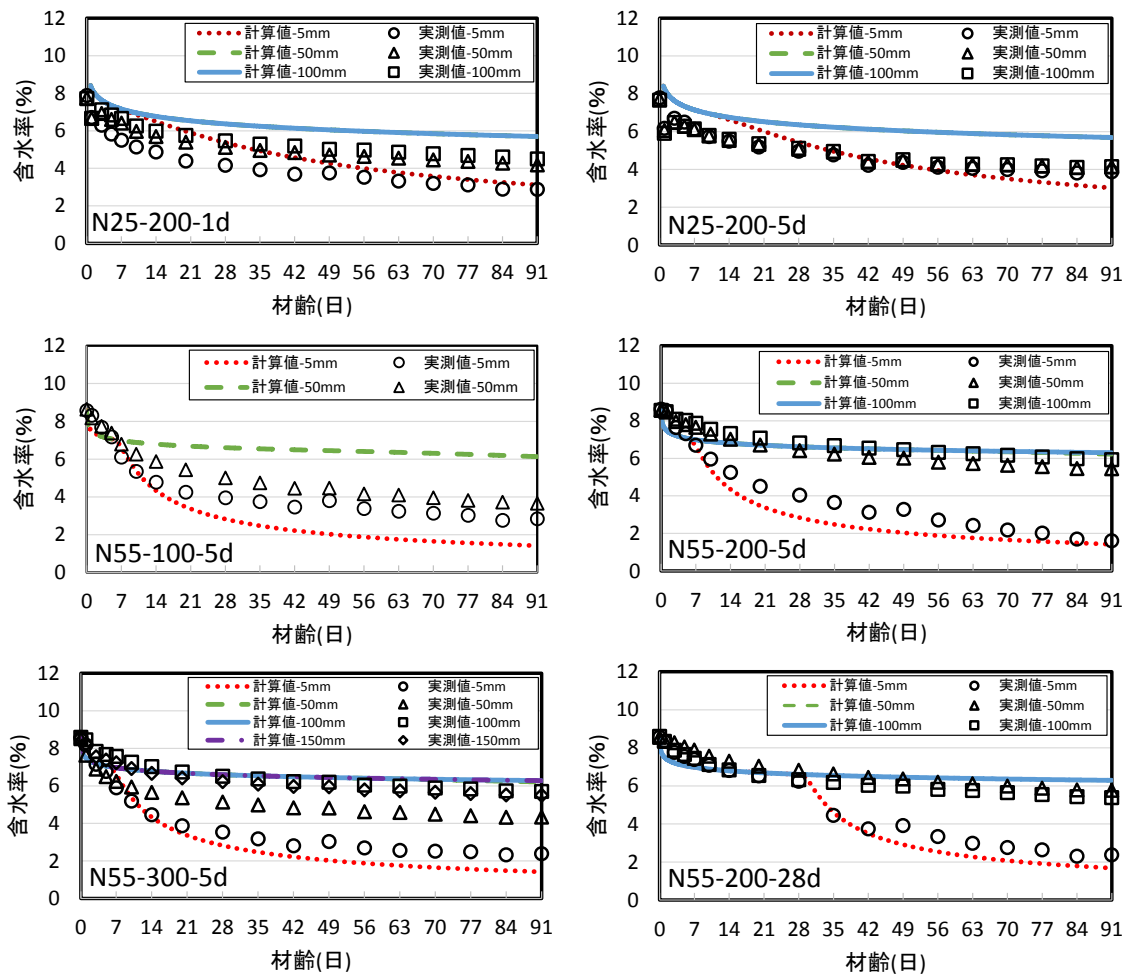


図-13 含水率の経時変化(計算値)

150mmの含水率の計算値は実測値と大差なかった。また、いずれの試験体でも、深さ5mmの含水率の計算値も実測値と著しい乖離はなく、脱型直後から含水率が低下する傾向を算出することができた。一方、[N55-100-5d]の深さ50mmでは、実測値よりも高い計算結果となった。今後、境界条件の設定、セメントの水和反応にともなう拡散係数の変化などについて検討する予定である。

5. まとめ

各種の壁試験体中の水分挙動について調査したところ、以下の結果が得られた。

- (1) 壁厚が小さくなるほど、コンクリート内部の含水率が低下しやすくなる。
- (2) N25のような水セメント比が小さい調合でも、脱型材齢1日では表面から水分が逸散する。N55のような水セメント比が大きい調合では、脱型材齢28日であっても、脱型後は表面から顕著に水分が逸散する。
- (3) コンクリート打込みからの含水率の経時変化を簡便に推定計算する方法について検討した。実測値と比較したところ、特に表面と中心の中間部についての推定精度に課題が残り、今後検討していく予定である。

参考文献

- 1) 湯浅昇ほか：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリート含水率測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第498号，pp.13-20，1997.8
- 2) 佐野禎ほか：印加電圧方式によるコンクリートの水分率推定方法に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.589-594，2005
- 3) 椎名国雄：コンクリートの内部湿度と変形，コンクリートジャーナル，Vol.7，No.6，pp.1-11，1969.6
- 4) 山田雅裕ほか：中性子水分計を用いたコンクリートの単位推量測定技術の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.911-916，2003
- 5) 寺島泰ほか：数種の多孔質材料中における水分子の有効拡散係数，土木学会論文報告集第256号，pp.91-94，1976.12
- 6) 佐藤幸恵ほか：脱型時期の違いがコンクリートの乾燥と品質に及ぼす影響に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.531-536，2008