

# 論文 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの表面吸水試験による吸水機構の検討及び中性化の予測に関する研究

白川 敏夫\*1・盧 薇迪\*2

**要旨：**本研究は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末に置換したコンクリートについて、中性化していない場合や中性化した場合の表層部の緻密性を非破壊試験である表面吸水試験装置により求められる吸水速度係数で評価できることを明らかにした。更に、中性化速度係数の理論式を基に、中性化速度係数と吸水速度係数の関係式を提案し、実験結果と比較検討した。その結果、提案式は、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートも普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートも同様に、非常に良い相関を示すことが明らかとなった。

**キーワード：**表面吸水試験, 非破壊試験, 高炉スラグ微粉末, 中性化進行予測

## 1. はじめに

近年、非破壊や微破壊による表層部の物質透過性を測定し、表層部の緻密性を評価する研究が行われている<sup>1),2),3)</sup>。

コンクリートの中性化は鉄筋コンクリート構造物の耐久性に対して影響を与える原因の一つである。コンクリートの中性化は表層部から炭酸ガスの拡散により進行する。そこで、非破壊や微破壊試験機による表層部の透気性により、中性化を予測する研究が行われている<sup>4),5)</sup>。

筆者らは、表面吸水試験により表層部コンクリートの緻密性を測定し、コンクリートの中性化の進行を予測することにより、コンクリートの耐久性を評価する方法について検討を行っている<sup>6),7)</sup>。

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、一般に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べ、緻密性が増大することや、中性化速度については、大きくなることが知られている。中性化速度が大きくなる原因について、筆者らは、促進中性化試験により、中性化すると水和物の一部も中性化することにより緻密性が低下し、表層部から炭酸ガスの拡散が大きくなり、その結果中性化の進行が速くなることを明らかにしている<sup>8)</sup>。

以上のような背景に、本研究は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末に置換したコンクリートについて、中性化していない場合や中性化した場合の表層部の緻密性を非破壊試験である表面吸水試験装置により評価できるかについて促進中性化試験を用いて検討した。更に、中性化の進行と吸水機構の関係について検討し、高炉スラグ微粉末の使用の有無について、中性化の進行を非破壊である表面吸水試験による評価の可能性について検討した。

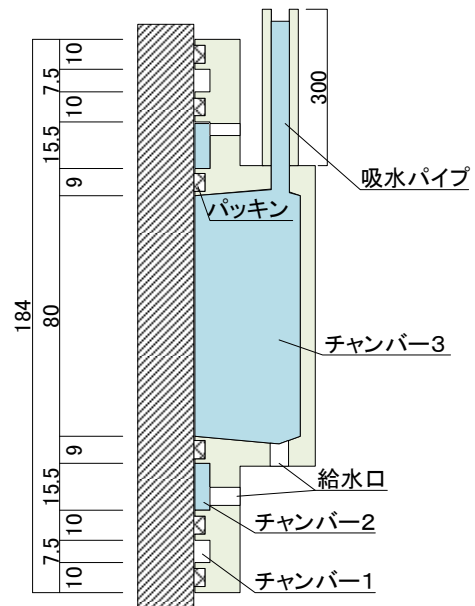


図-1 表面吸水試験装置の概要

## 2. 実験概要

### 2.1 表面吸水試験

本研究で用いた表面吸水試験装置の概要を図-1に示す。図-1に示すように、吸水試験装置は、三つのチャンバーからなる。チャンバー1は、吸引ポンプによりチャンバー内を負圧にすることにより、構造物への取り付けを行えるようにした。また、チャンバー3は、取り付けられたコンクリート構造物に吸水試験が行えるようにした。なお、吸水量測定のため、メモリを付した長さ300mmの吸水パイプを取り付けた。また、チャンバー2は、チャンバー1が吸引ポンプにより負圧となり、チャンバー3の吸水試験への影響を除くために作製した。

\*1 九州産業大学 建築都市工学部住居・インテリア学科教授 博士(工学) (正会員)

\*2 九州産業大学大学院 博士前期課程

表-1 調(配)合

記号	水結合材比 (%)	置換率 (%)	空気量 (%)	スラン プ (cm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					水 W	セメント C	高炉スラグ <sup>※</sup> B	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤*
N50	50	0	4.2	18.0	171	342	0	733	1094	0.60%
B505	50	50	2.3	19.0	170	170	170	729	1089	0.45%
N55	55	0	3.6	17.0	173	314	0	788	1026	0.65%
B551	55	10	4.4	18.5	173	283	31	788	1025	0.65%
B553	55	30	4.6	18.5	172	219	94	786	1023	0.65%
B555	55	50	4.7	19.5	172	157	157	785	1021	0.65%
N60	60	0	4.4	20.5	165	275	0	802	1094	0.55%
B605	60	50	3.4	19.5	164	137	137	799	1090	0.50%

\*)セメント質量に対する比率

装置の外側の直径は 184mm とし、コンクリートへ吸水させるチャンバー 3 の直径は 80mm とした。また、チャンバー 3 は、吸水試験時に気泡が残らないように若干勾配を付けた。各チャンバーの間、またチャンバー 1 と外側とは約 9 から 10mm の間隔とし、そこに溝を設けパッキンを挿入した。軟質のパッキンを用いることにより、多少のコンクリート表面の不陸にも対応できるようにした。なお、吸水状況を目視で確認できるよう、材質は透明樹脂を使用した。

表面吸水試験は、まずチャンバー 1 を負圧にすることにより供試体に取り付け、次にチャンバー 2 に給水タンクより給水し、最後にチャンバー 3 にチャンバー 2 と同様に、給水タンクより給水するとともに、吸水パイプへ給水した。なお、吸水パイプの長さは、図-1 に示すように、300mm とし、吸水パイプへの給水高さは、250mm 程度とした。

吸水量は、チャンバー 3 に取り付けた長さ 300mm の吸水パイプの水位差を圧力センサーにより 10 秒間隔に 10 分間測定した。

本装置を用いたコンクリートへの水の浸入についての駆動力は、コンクリート空隙中の毛細管張力と吸水パイプへの給水による水圧が考えられる。予備実験により、吸水パイプへの給水高さを変え実験した結果、その影響はないことを確認している。このことより、コンクリートの空隙中への水の浸入については、その駆動力を毛細管張力が支配的であると考え、Lucas-Washburn の式が成り立ち、式(1)に示すように、吸水量は時間の平方根に比例する<sup>9)</sup>。

$$V = S\sqrt{t} + V_0 \quad (1)$$

ここに、V：単位面積当たりの吸水量(mm<sup>3</sup>/mm<sup>2</sup>)、S：吸水速度係数(mm/sec<sup>0.5</sup>)、t：吸水時間(sec)、V<sub>0</sub>：初期吸

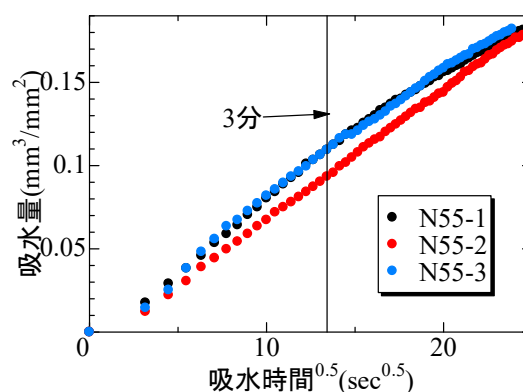


図-2 吸水量と吸水時間の関係

表-2 高炉スラグ微粉末の物性

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	活性度指数(%)		
		7日	28日	91日
2.91	4260	73	100	116

表-3 細粗骨材の物性

	種類	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	F.M.
細骨材	海砂	2.57	1.52	2.57
粗骨材	碎石 2005	2.75	0.74	6.74

水量(mm<sup>3</sup>/mm<sup>2</sup>)

図-2 に吸水量と吸水時間の平方根の関係について、水セメント比 55%の未中性化供試体を例に示す。

図に示すように、吸水開始から数点は、吸水試験装置の装着等の関係から直線関係からやや外れているが、その後、ほぼ両者の関係は直線関係となっている。吸水後 3 分から 10 分までの吸水量と時間の関係を式(1)に最小二乗近似し、その比例係数である吸水速度係数を求め、吸水速度係数により、各種コンクリートについての吸水

性能とした。

## 2.2 供試体の調合

調合を表-1に示す。調合は、水セメント比50%、55%、60%の3種類の普通ポルトランドセメントを使用した場合を基本に、水セメント比55%は、セメント質量の1割、3割、5割を高炉スラグに置換し、水セメント比50%と60%はセメント質量の5割を高炉スラグに置換した計8種類のコンクリートとした。なお、目標スランブは18cm、空気量は4.5%とし、高性能AE減水剤を使用し調整した。

表-2に使用した高炉スラグ微粉末の物性値を示す。高炉スラグ微粉末は、石膏を添加した、ブレン値4000 (cm<sup>2</sup>/g)を使用した。

表-3に使用した、細粗骨材の物性値を示す。細骨材は海砂を、粗骨材は、碎石を使用した。

## 2.3 供試体の作成および促進中性化

供試体の形状を図-3に示す。図に示すように、長さ500mm×幅100mm×高さ200mmとした。供試体は、各条件3本作製した。なお、図中の上部が打設面であり、表面吸水試験装置の取り付けは、高さ200mmの側面とした。写真-1に表面吸水試験状況もあわせて示す。

供試体は、鋼製型枠に打設後、翌日脱型を行い、材齢28日まで標準水中養生を行った。その後、温度20℃、相対湿度60%の環境下で28日間前乾燥を行った。

促進中性化を行う供試体は、JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法に準じ、温度20℃、相対湿度60%、CO<sub>2</sub>濃度5%の環境下で13週まで促進中性化試験を行い、促進材齢1、4、8、13週（一部の調合は12週まで）に中性化深さを測定した。促進中性化を行わない供試体は、前乾燥後、同一環境下で更に8週間乾燥した。なお、前乾燥以降は図-3に示すように側面をアルミ箔テープでシールした。

表面吸水試験は、促進中性化供試体については促進材齢8週に行った。その後、中性化深さも同一場所で計れるように、吸水した部分を割裂し、中性化深さも測定した。促進中性化を行わない供試体については、促進中性化供試体と同一の促進材齢8週に表面吸水試験を行った。なお、表面吸水試験は各条件3回行い、山崎ら<sup>10</sup>と同様に、Grubbsの検定により異常値を棄却した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 促進中性化結果

促進中性化材齢1、4、8、13週において、中性化深さを測定した。水結合材比55%の結果を例に、中性化深さと材齢の関係を図-4に示す。高炉スラグ微粉末の置換率が多くなるほど中性化深さは大きくなった。

これらの実験結果を次式に示す中性化速度式に近似し、中性化速度係数Aを算出した。

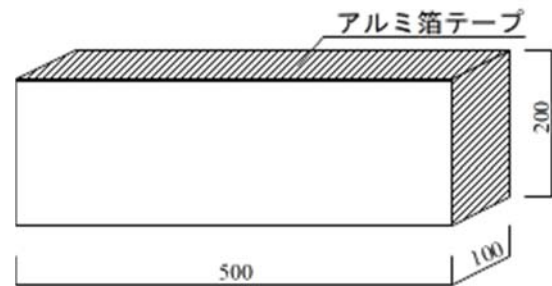


図-3 供試体形状

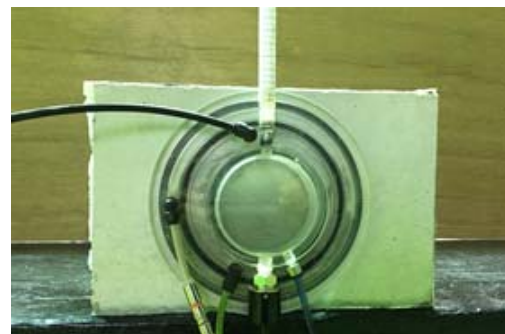


写真-1 表面吸水試験状況

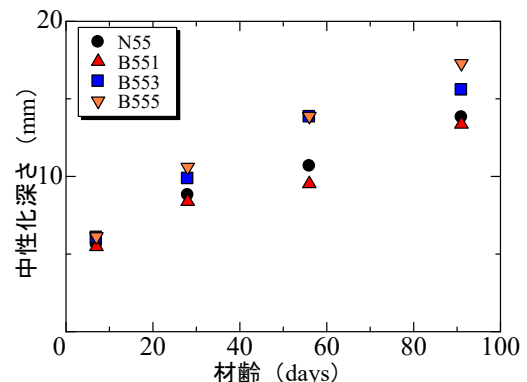


図-4 中性化深さの経時変化 (水結合材比 55%)

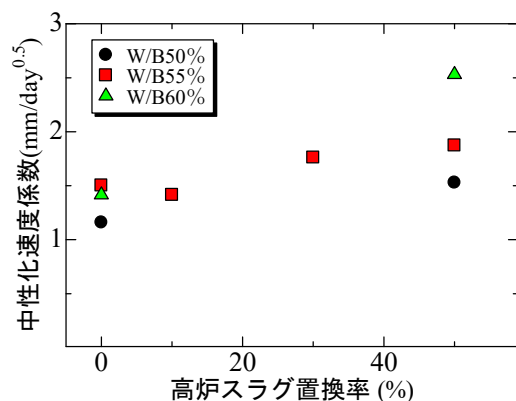


図-5 高炉スラグ置換率と中性化速度係数の関係

$$x = A\sqrt{t} \quad (2)$$

ここに、 $x$ ：中性化深さ(mm)， $A$ ：中性化速度係数  
(mm/day<sup>0.5</sup>)，促進中性化材齢(day)

図-5 高炉スラグ置換率と中性化速度係数の関係を示す。図に示すように、一般に言われているように、高炉スラグ置換率が多くなるほど中性化速度係数も大きくなる傾向を示した。また、この傾向は水結合材比により異なる傾向を示した。

そこで、図-5 の置換率と中性化速度係数の関係を基に、高炉スラグ微粉末の置換率 0% の中性化速度係数を基準に、置換率 50% の時の中性化速度係数との比と水結合材比の関係求めた。図-6 にその結果を示す。

図に示すように、水結合材比 50%、55%においては、1.3 倍程度、水結合材比 60%においては 1.8 倍程度大きくなった。以上のように、実験データは少ないが、水結合材比が大きくなるほど中性化速度係数の比は大きくなる傾向を示した。

### 3.2 高炉スラグ微粉末の置換率と吸水速度係数

中性化促進材齢 8 週まで中性化促進実験を行った後、図-1 に示す表面吸水試験装置を用いて吸水試験を行い、吸水速度係数を算出した。なお、促進中性化材齢 8 週と同一の乾燥期間における促進中性化を行っていない場合についても同様に行った。

図-7 に吸水速度係数と高炉スラグ微粉末置換率の関係を示す。なお、促進中性化材齢 8 週と同一の乾燥期間における促進中性化を行っていない場合の高炉スラグ置換率と吸水速度係数の関係も併せて示す。

一般に、普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末に置換したコンクリートは耐塩害性などが向上するなど緻密化することが明らかとなっている。

図に示すように、促進中性化を行っていない場合、高炉スラグ置換率が多くなるほど吸水速度係数が小さくなり、コンクリートが緻密化していることが分かる。

一方、中性化した場合は、高炉スラグ置換率が多くなるほど、吸水速度係数も大きくなる傾向を示した。これは、高炉スラグ微粉末を用いた場合、組織を形成している CaO/SiO<sub>2</sub> 比の低い C-S-H ゲルが生成され、この C-S-H ゲルを中性化すると、著しく空隙が増大するためと考えられる<sup>8)</sup>。

図-8 に図-7 の結果を基に、高炉スラグ置換率 0% の吸水速度係数を基準に、置換率 50% の場合の吸水速度係数との比と水結合材比の関係を示す。

図のように、中性化していない場合、高炉スラグ微粉末を置換することにより、水結合材比に関わらず 0.5 以

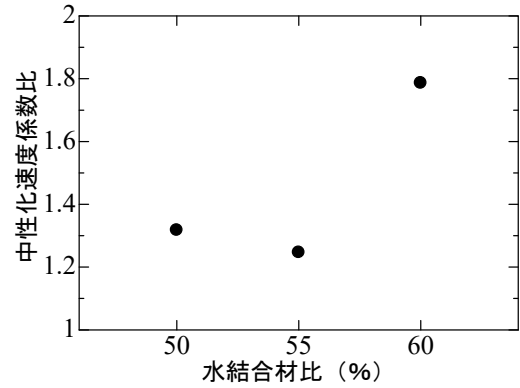


図-6 中性化速度係数比と水結合材比の関係  
(プレーンと高炉スラグ置換率 50% の比較)

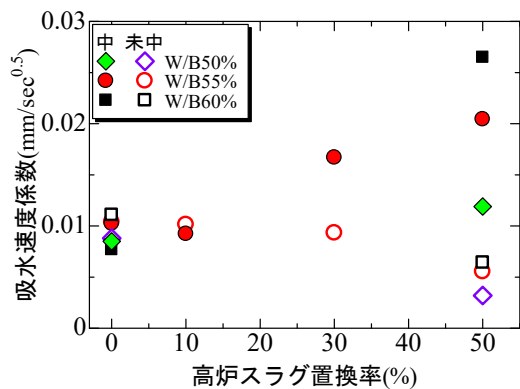


図-7 吸水速度係数と高炉スラグ置換率の関係

下の値を示し、かなり緻密化されていることが分かる。

一方、中性化した場合は水結合材比が大きくなるほどより吸水速度係数比が大きくなり、水結合材比 60%においては、3 倍強の値を示した。

既往の研究で示したように<sup>8)</sup>、中性化した場合、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは組織が粗密となるが、この傾向を非破壊である表面吸水試験により明らかにすることができた。更に、この傾向は、水結合材比が大きくなるほど顕著になることも明らかとなった。

## 4. 表面吸水試験による中性化予測

### 4.1 中性化速度係数と吸水速度係数の理論的關係

コンクリート中の炭酸ガスの拡散は、Fick の法則に従い、濃度分布は表面で環境濃度、中性化位置で 0 となる直線分布を仮定し、また、中性化位置へ拡散した炭酸ガスは、コンクリート中のセメント水和物と瞬時に反応すると仮定すると、式(2)中の中性化速度係数  $A$  は理論的に以下の式で求められる<sup>11)</sup>。

$$A = \sqrt{\frac{2D_{CO_2} \cdot C_2}{C_1}} \quad (3)$$



ここに、 $C_1$ ：炭酸ガスと反応するコンクリート中のセメント水和物量、 $C_2$ ：炭酸ガス濃度、 $D_{CO_2}$ ：コンクリート中への炭酸ガスの気体拡散係数

筆者らは、気体の拡散係数試験方法を提案している<sup>12)</sup>。そこで、水セメント比 45%、55%、65%のモルタル供試体を数種類の湿度で一定質量となるまで乾燥し、表面吸水試験、気体拡散試験を実施した<sup>9)</sup>。その結果、水セメント比や相対湿度に関係なく、気体拡散係数は、吸水速度係数と原点を通る1次式の関係にあることを明らかにした。そこで、式(3)中の炭酸ガス拡散係数を吸水速度係数に置き換えることができる。

炭酸ガスと反応するコンクリート中のセメント水和物量は単位セメント量と比例すると考えられる。普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末に置換した場合、炭酸ガスと反応するコンクリート中のセメント水和物量が減少すると考えられるが、詳細なデータがないので、ここでは、炭酸ガスと反応するコンクリート中のセメント水和物量は、単位結合材量に比例すると仮定する。

以上、二点を考慮すると式(3)は式(4)になる。

$$A = k_1 \sqrt{\frac{S}{C_3}} \quad (4)$$

ここに、 $k_1$ ：比例係数、 $C_3$ ：単位結合材量( $g/mm^3$ )、 $S$ ：吸水速度係数( $mm/sec^{0.5}$ )

#### 4.2 中性化速度係数と吸水速度係数の実験結果

中性化速度係数と吸水速度係数と単位結合材の比の関係を図-9に示す。なお、図中のプレーン1は本実験のデータを、図中のプレーン2は筆者の既往研究<sup>13)</sup>のデータを追加して示している。

両者の関係を式(4)に最小自乗近似した結果を図中に曲線で示す。図に示すように、高炉スラグ微粉末の使用の有無、置換率に係わらず非常に良い相関を示した。

図に示すように、一般に、普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末で置換すると炭酸ガスと反応するコンクリート中のセメント水和物量は小さくなると考えられるが、高炉スラグ微粉末の有無に関わらず、ほぼ同様な関係を示した。

この理由について考察すると、普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末で置換すると炭酸ガスと反応するコンクリート中のセメント水和物量は小さくなると考えられる。一方、中性化によりコンクリート中の細孔構造は変化し<sup>8)</sup>、中性化後の気体拡散係数と吸水速度係数の関係は、普通ポルトランドセメントを用いた場合と高炉スラグ微粉末を用いた場合では、両者の比例係数が異なるのではないかと考えられる。以上、二点が相殺され

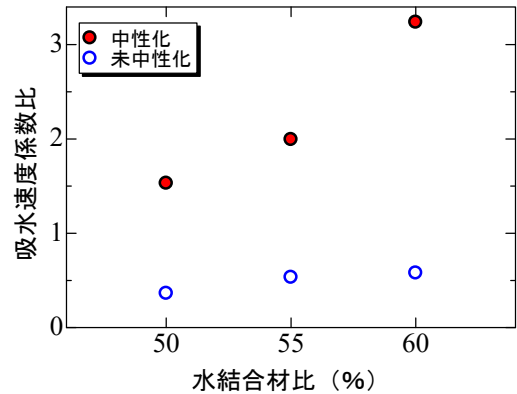


図-8 吸水速度係数比と水結合材比の関係  
(プレーンと高炉スラグ置換率 50%の比較)

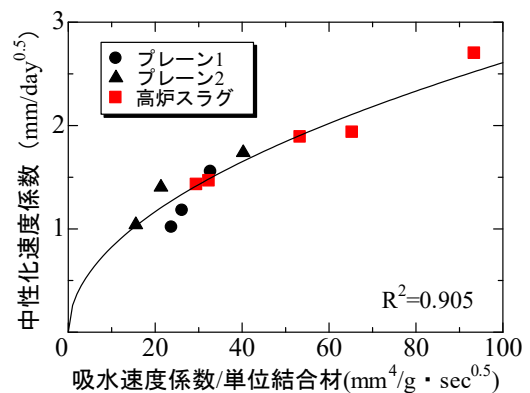


図-9 吸水速度係数/単位結合材と  
中性化速度係数の関係

た結果ではないかと考えられるが詳細については、今後の課題であると考えている。

既存構造物の中性化の進行を非破壊である表面吸水試験により予測する場合、単位結合材量は不明の場合が多い。そこで、単位結合材量の影響を無視し、式(4)中の単位結合材量を一定と仮定すると式(5)となる。

$$A = k_2 \sqrt{S} \quad (5)$$

ここに、 $k_2$ ：比例係数

中性化速度係数と吸水速度係数の関係を図-10に示す。図-9と同様に、筆者の既往研究<sup>13)</sup>のデータを追加して示している。なお、図中には、式(5)に最小自乗近似した結果も合わせて示す。

図-10に示すように、図-9と比較すると、相関性がやや下がるが、比較的良い相関を示した。なお、比例係数  $k_2=14.9$  となった。

この値は、式(3)に示すように、炭酸ガス濃度 5%の場合であり、既存構造物の中性化の進行を非破壊である表面吸水試験により予測する場合、炭酸ガス濃度の影響を

考慮する必要がある。また、温度 20°C、相対湿度 60%の一定環境であり、温度、相対湿度が変化すると異なることも考えられる。

以上のことより、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートも普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートも同様に、表面吸水試験によりコンクリートの中性化の進行予測が可能と考えられる。

## 5. 結論

普通ポルトランドセメントおよび、普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートの表面吸水試験による吸水機構の検討及び中性化の予測について実験検討を行った。これらの結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 一般に言われているように、高炉スラグ微粉末の置換率が多くなるほど中性化速度係数は大きくなる傾向となった。
- 2) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは促進中性化を行ってない場合、高炉スラグの置換率が高いほど吸水速度係数が小さくなり、緻密性が高いと考えられる。一方、促進中性化を行った場合、高炉スラグの置換率が高いほど吸水速度係数が大きくなり、緻密性が低くなった。高炉スラグ微粉末を用いた場合、組織を形成している CaO/SiO<sub>2</sub> 比の低い C-S-H ゲルが生成され、この C-S-H ゲルを中性化すると、著しく空隙が増大するためと考えられる。
- 3) 促進中性化した場合、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは組織が粗密となり、この傾向は、水結合材比が大きくなるほど顕著になることが、本研究の範囲内で明らかとなった。
- 4) 中性化速度係数の理論式を基に、中性化速度係数と吸水速度係数の関係式を提案した。その結果、提案式は、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートも普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートも同様に、非常に良い相関を示すことが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) Torrent, R. J : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on the site, *Materials and Structure*, No. 150, pp.358-365, July 1992
- 2) 林和彦, 細川暁 : 表面吸水試験によるコンクリート実構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, *土木学会論文集 E2*, Vol. 69, No. 1, pp.82-97, 2013
- 3) 野中英, 湯浅昇 : ドリル削孔を用いた構造体コンク

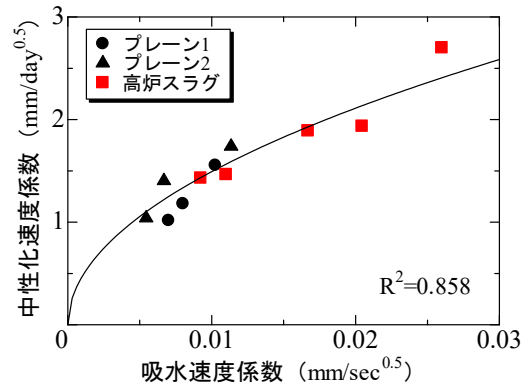


図-10 吸水速度係数と中性化速度係数の関係

リートの簡易透気試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.700, pp.689-696, 2014.6

- 4) 田中章夫, 今本啓一 : 表層透気性による既存 RC 構造物の中性化予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.691, pp.1539-1544, 2013.9
- 5) 加藤佳孝, 早川健司 : 表面透気試験を用いた中性化に伴う鋼材腐食の耐久性設計と検査の連係に関する一考察, *土木学会論文集 E2*, Vol. 68, No. 4, pp.410-421, 2012
- 6) 白川敏夫他 : 吸水試験方法による表層部コンクリートの品質評価に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.37, No.1, pp.1807-1812, 2015
- 7) 白川敏夫 : 表面吸水試験による既存鉄筋コンクリート構造物の中性化予測に関する研究, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, pp.643~644, 2017
- 8) 白川敏夫他 : モルタルを用いた場合の気体拡散性状への炭酸化の影響, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.74, No.636, pp.193-199, 2009.2
- 9) 酒井雄也他 : 微細空隙中を毛管張力により浸入する液状水挙動に関する検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.730-735, 2012
- 10) 山崎順二他 : 実大コンクリート壁におけるダブルチャンバー法を用いた表層透気性の評価に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, No.1, pp.2013-2018, 2016
- 11) 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説, 日本建築学会, 2004
- 12) 白川敏夫他 : セメントペースト硬化体の乾燥の程度と気体拡散係数の関係, *日本建築学会構造系論文集*, No.524, pp.7-12, 1999.10
- 13) 白川敏夫 : 表面吸水試験によるコンクリートの中性化予測に関する研究, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, pp.361~362, 2016