

## 論文 フレッシュモルタルの透水係数に関する実験的研究

犬飼 利嗣<sup>\*1</sup>・三島 直生<sup>\*2</sup>・坂本 英輔<sup>\*3</sup>・畑中 重光<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では，自由水の挙動に及ぼす配合や水みちによる影響を透水係数によって定量的に説明できると仮定し，フレッシュモルタルの透水試験により自由水の挙動を定量的に評価することを試みた。ここでは，フレッシュモルタルの透水試験方法を考案し，動水こう配や配合(水セメント比)が透水係数に及ぼす影響について検討した。その結果，考案した透水試験方法で，試料ごとに一定した値の透水係数を求めることが可能であること，透水係数は水セメント比やブリーディング量と相関関係にあることなどが明らかとなった。

キーワード：フレッシュモルタル，自由水，透水試験方法，透水係数，ブリーディング

## 1. はじめに

フレッシュコンクリート中の自由水の挙動を定量的に把握することは，材料分離現象や鉄筋コンクリート構造体の品質を評価する上で極めて重要である。また透水・脱水工法など，自由水の制御を目的とした工法では，その品質改善効果を定量的に推定<sup>例えば<sup>1)</sup></sup>する上で役立つものと考えられる。

筆者らはこれまでに，フレッシュコンクリート中の自由水の挙動を解明することを目的として研究を進めてきた<sup>2)-5)</sup>。しかし，実験の考察は定性的なものにとどまり，定量的な評価を得るには至っていない。

土質工学の分野では，土中の間隙を移動する水の性質を知る上で，土の透水試験により透水係数が求められている。そこで，フレッシュモルタルやコンクリートも同様に，その透水係数を知り得れば，自由水の挙動を定量的に評価することが可能になると推察した。

本研究では，フレッシュモルタルの透水試験方法を考案し，実験1として水頭差(吸引圧)および試料厚さが透水係数に及ぼす影響について検討した。ついで実験2として，配合(水セメント比)が透水係数に及ぼす影響について検討した。

## 2. フレッシュモルタルの透水試験方法

土の透水試験方法は，Darcyの法則に基づく透水係数を求める試験として，従来から標準化されている。しかし，フレッシュモルタルやコンクリートの透水試験には標準化された方法はなく，実験的に検討された例はほとんどみられない<sup>6)</sup>。

そこで筆者らは，水頭差に代えて真空圧(吸引圧)を利用したフレッシュモルタルの透水試験方法を考案した。

図-1に，考案したフレッシュモルタルの透水試験方法を示す。試験手順は，以下のとおりである。すなわち，図に示すように，試料を詰めた容器を透水試験装置の所定の位置に設置し，給水コックを開いて着色液[フタロシアニン酸の1wt%水溶液(密度:1.00g/cm<sup>3</sup>)]をフタと試料上面の間に充填する。その際，排気コックを開き十分に排気を行う。給水コックと排水コックを閉め，シリンジに着色液を27.5cm<sup>3</sup>充填する。給水コックを開き真空ポンプを作動させ，レギュレータで調整した一定の吸引圧のもとで透水試験を開始する。試験開始後2.5cm<sup>3</sup>ごとの透水時間を測定し，全量(27.5cm<sup>3</sup>)を透水するまでこれを行う。なお浸透水に着色液を用いたのは，

\*1 東海コンクリート工業(株) 企画・技術部技術グループ係長 工修 (正会員)

\*2 三重大学 工学部建築学科助手 博士(工学) (正会員)

\*3 三重大学大学院 工学研究科システム工学専攻 工修 (正会員)  
(日本学術振興会 特別研究員)

\*4 三重大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

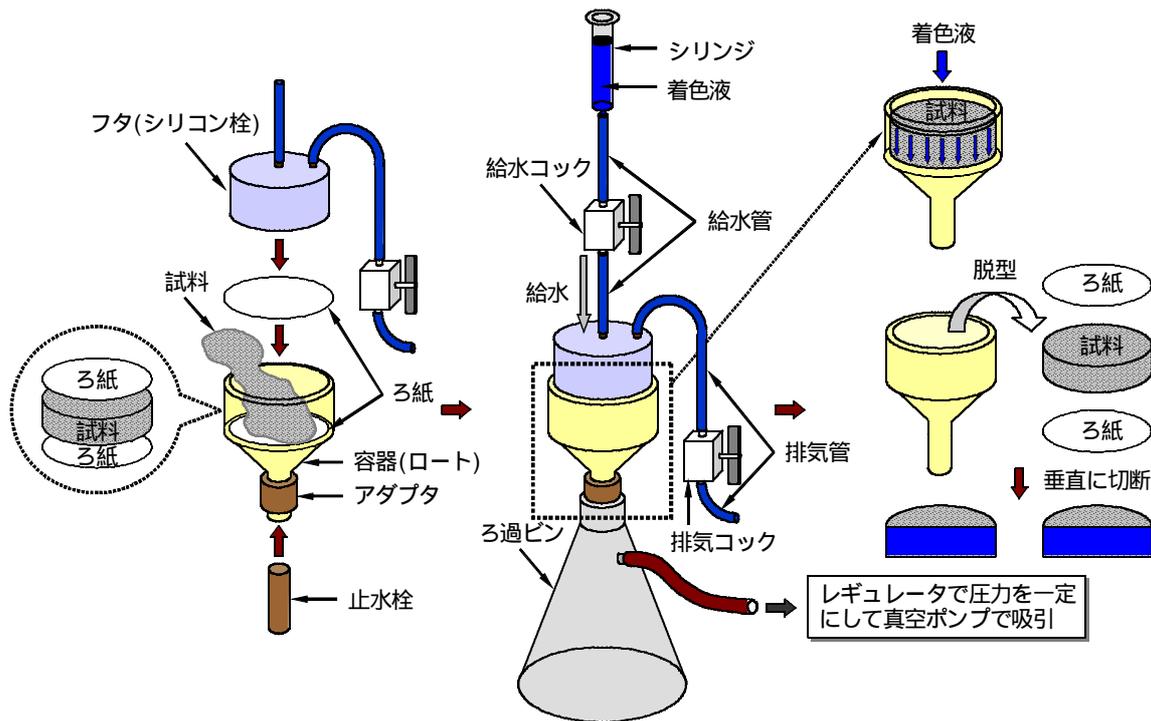


図 - 1 フレッシュモルタルの透水試験方法

表 - 1 モルタルの使用材料(実験1, 2)

| 材料名  | 種類           | 備考   |
|------|--------------|--|
| セメント | 白色ポルトランドセメント | 密度:3.05g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3650cm <sup>2</sup> /g |
| 細骨材  | 乾燥珪砂(4号, 5号) | 絶乾密度:2.54g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率(混合):2.42              |
| 混和剤  | 高性能AE減水剤     | ポリカルボン酸基含有多元ポリマー                                       |
| 水    | 上水道水         | -  |

表 - 2 モルタルの配合(実験1)

| 水セメント比<br>W/C<br>(wt%) | 砂セメント比<br>S/C<br>(wt) | 目標空気量<br>Air<br>(vol%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |        |            |            |           |
|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|--------|------------|------------|-----------|
|                        |                       |                        | セメント<br>C               | 水<br>W | 4号珪砂<br>S1 | 5号珪砂<br>S2 | 混和剤<br>AD |
| 50                     | 2.5                   | 8.0                    | 508                     | 254    | 635        | 635        | 0.762     |

硬化後の試料切断面の着色状態から、浸透水の移動経路を目視観察するためである。

### 3. 吸引圧および試料厚さが透水係数に及ぼす影響(実験1)

#### 3.1 実験要因

実験因子は吸引圧および試料の基準厚さとし、実験水準は、それぞれ、30, 40, 50kPa, および10, 15, 20mmとした。

#### 3.2 実験方法

##### (1) モルタルの使用材料および配合

モルタルの使用材料を表 - 1 に、配合を表 -

2 に示す。なお、白色ポルトランドセメントおよび灰白色の乾燥珪砂は、硬化後の試料切断面の着色状態を明確にするために用いた。

##### (2) 試料の成形方法

容器(下部内径60mm, 上部内径63mmのロート)の底面にあらかじめ湿らしたろ紙を敷き、基準の厚さとなるようモルタルを1層で詰めた。突き棒で25回均等に突いた後、突き穴がなくなるまで容器側面を木づちで軽く叩き、上面をコテで平滑に仕上げて試料とした。また、漏水を防止するために試験開始直前まで、ロートの先端に止水栓をあらかじめ挿入した(図 - 1 参照)。

### (3) 試料厚さの測定

試料厚さは、試料の質量と単位容積質量との関係から式(1)により求めた。

$$h = (Sw/Uw) / (D^2/4) \quad (1)$$

ここに、 $h$ ：試料厚さ(cm)

$Sw$ ：試料の質量(g)

$Uw$ ：試料の単位容積質量(g/cm<sup>3</sup>)

$D$ ：容器の直径(cm)

### (4) 透水試験方法

試料の上面に湿らしたろ紙を敷き容器をフタで密閉した後、2節で述べた方法で透水試験を行った。透水量が10cm<sup>3</sup>から20cm<sup>3</sup>に達するまでに要した時間を基にして、透水量を式(2)により、透水係数を式(3)により求めた。なお透水量や透水係数の算出にあたっては、試料に吸引圧やブリーディングによる圧密作用が生じないものと仮定した。

$$Q = 10/t \quad (2)$$

$$k = [h/(P/g)] \cdot (Q/A) \quad (3)$$

ただし、 $Q$ ：透水量が10cm<sup>3</sup>から20cm<sup>3</sup>に達するまでに要した時間を基にして算出した単位時間あたりの透水量(cm<sup>3</sup>/s)

$t$ ：透水量が10cm<sup>3</sup>から20cm<sup>3</sup>に達するまでに要した時間(s)

$k$ ：透水係数(cm/s)

：水の密度(1×10<sup>-3</sup>kg/cm<sup>3</sup>)

$h$ ：試料厚さ(cm)

$P$ ：吸引圧(kPa)

$g$ ：単位の換算係数(9.80665×10<sup>-2</sup>)

$A$ ：試料の断面積(cm<sup>2</sup>)

### (5) 浸透水の移動経路の観察

材齢3日で試料を脱型し、垂直に切断した(図-1参照)。試料切断面の着色状態から、浸透水(着色液)の移動経路を目視観察した。

### 3.3 実験結果および考察

図-2に、透水量と透水時間の関係を一例として示した。図に示すように、透水量は透水試験開始後しばらくは不安定な状態を示すが、その後は時間の経過とともに直線的に増加している。これは、単位時間あたりの透水量がほぼ一

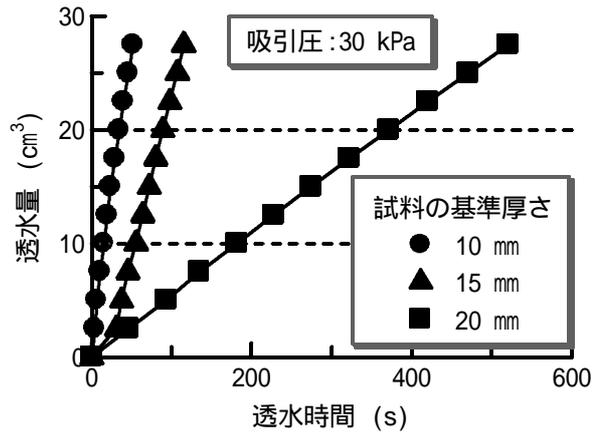


図-2 透水量と透水時間の関係(実験1)

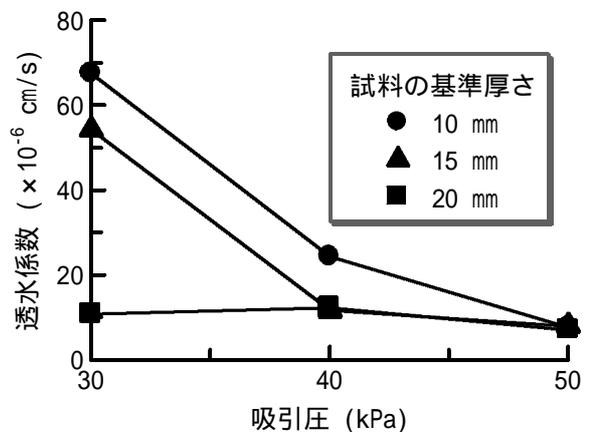


図-3 透水係数と吸引圧の関係(実験1)

定であることを示しており、透水係数の算出方法(透水量が10~20cm<sup>3</sup>に達するまでに要した時間を基にして算出する方法)が適切であることを示している。また、ロートの先端からの漏水はなく、透水試験開始直後からシリンジに充填した着色液の液面降下が確認されている。試験終了後にろ過ピンに排出された排水量は、全透水量(27.5g)とほぼ同じ値(±0.5g)であった。このような状況は、吸引圧や試料厚さなど実験条件にかかわらず、いずれも同様に観察された。

図-3に、透水係数と吸引圧の関係を示す。図に示すように、試料の基準厚さが10mmの場合、透水係数は吸引圧が30kPaでは大きく異なる値を示すが、吸引圧が大きくなるほど値は減少しバラツキも小さくなっている。吸引圧が50kPaになるとほぼ一定の値を示し、7~12×10<sup>-6</sup>cm/s程度となっている。これは、平田らが報告した実験結果<sup>6)</sup>、すなわち、水頭差が大きくなると

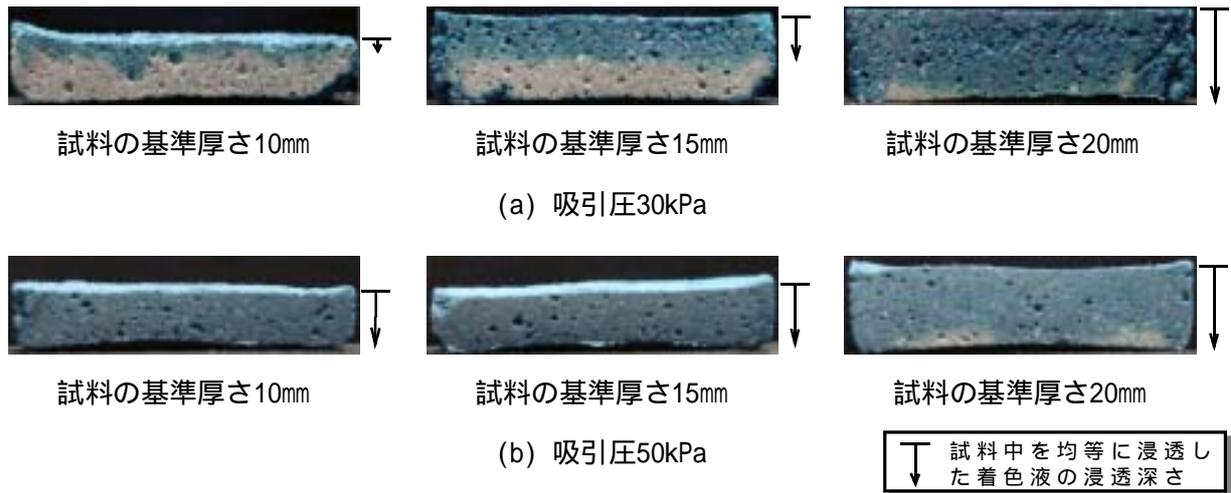


写真 - 1 硬化後の試料切断面(実験1)

表 - 3 モルタルの配合(実験2)

| 水セメント比<br>W/C<br>(wt%) | 砂セメント比<br>S/C<br>(wt) | 目標空気量<br>Air<br>(vol%) | 単用量(kg/m <sup>3</sup> ) |        |            |            |           |
|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|--------|------------|------------|-----------|
|                        |                       |                        | セメント<br>C               | 水<br>W | 4号珪砂<br>S1 | 5号珪砂<br>S2 | 混和剤<br>AD |
| 35                     | 2.0                   | 8.0                    | 620                     | 217    | 635        | 635        | 3.100     |
| 50                     | 2.5                   |                        | 508                     | 254    |            |            | 0.762     |
| 65                     | 3.0                   |                        | 430                     | 279    | -          |            |           |

透水係数が大きくなる傾向とは異なる傾向を示しているが、実験間で水頭差が大きく異なるので、透水係数の結果だけでは比較検討できない。また透水係数は、試料の基準厚さが10mmおよび15mmでは大きく異なる値を示すが、基準厚さが20mmになるとほぼ一定の値(7~12×10<sup>-6</sup>cm/s程度)となっている。このように、試料の基準厚さや吸引圧が大きくなると透水係数の値は小さくなり一定となる傾向は、浸透水の移動経路に関係するものと考えられる。

写真 - 1 に、硬化後の試料切断面の一例を示す。写真(a)から分かるように、吸引圧が30kPaでは、試料厚さによって着色液の移動経路が大きく異なる。試料の基準厚さが20mmでは、着色液は試料中をほぼ均一に浸透した形跡がみられるが、10mmおよび15mmでは試料中を均一に浸透せず、その多くは容器側面を移動経路とした形跡がみられる。とくに10mmでは、その傾向が顕著である。これには、容器側面の面積と試料の体積の比率が影響していると考えられる。一方、写真(b)に示したように、吸引圧が50kPaでは、試料の基準厚さによって着色液の移動経路が異

なることはなく、いずれも試料中をほぼ均一に浸透した形跡がみられる。

図 - 3 に示したように、吸引圧が30kPaで得られた透水係数は、基準厚さが10mmおよび15mmでは極端に大きな値を示している。前述した観察結果も踏まえると、透水係数は浸透水の移動経路と相関した結果を表すものと考えられる。すなわち、試料の基準厚さが10mmおよび15mmで得られた透水係数の値は、浸透水の多くが、透水係数の大きい容器側面を水みちとして移動した試験結果によるものと考えられる。これは、吸引圧が50kPaで得られた透水係数の値と浸透水の移動経路の関係からも明らかである。

以上より、本実験の範囲では、透水係数を試料ごとに一定した値として得るには、容器側面の影響が小さく試料中をほぼ均一に浸透水が移動する吸引圧50kPa、試料の基準厚さ20mmを実験条件とするのが適切であると結論づけられる。

#### 4. 配合が透水係数に及ぼす影響(実験2)

##### 4.1 実験要因

実験要因は水セメント比とし、それぞれ、35、

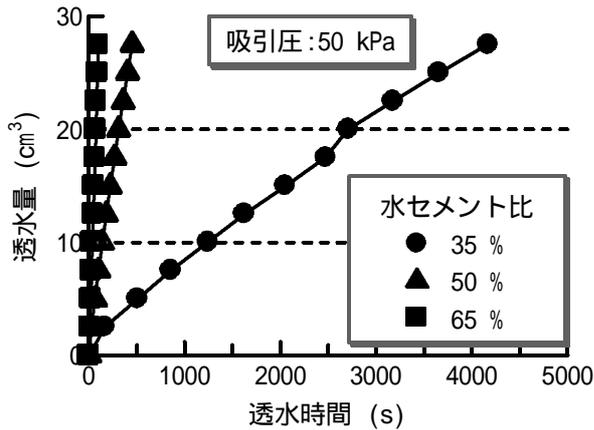


図 - 4 透水量と透水時間の関係(実験2)

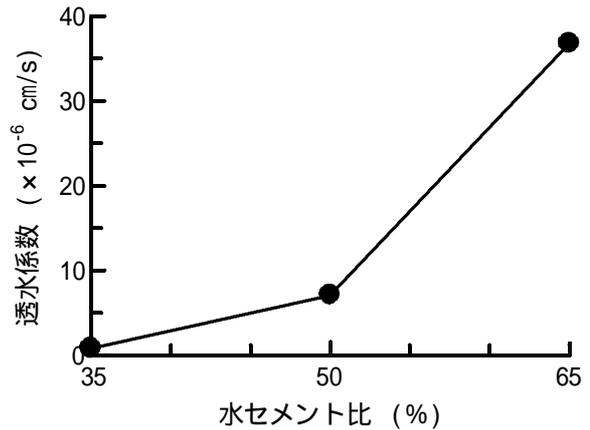


図 - 5 透水係数と水セメント比の関係(実験2)

50, 65%とした。なお、実験1の考察から吸引圧は50kPa, 試料の基準厚さは20mmとした。

#### 4.2 実験方法

モルタルの配合を表 - 3 に示す。その他の実験方法は、実験1と同様とした。

#### 4.3 実験結果および考察

図 - 4 に、透水量と透水時間の関係を示す。図に示すように、透水量は時間の経過とともにほぼ直線的に増加している。しかし、水セメント比が35%の試料では、全量(27.5cm³)を透水するのに1時間以上を要している。モルタルやコンクリートは、時間の経過にともない水和反応が進行するので、任意の状態の透水係数を求めるには、試験時間はできるだけ短いほうがよい。したがって、このような密実な試料を対象とする場合には、吸引圧を50kPaより大きな値として試験方法を検討する必要がある。

図 - 5 に、透水係数と水セメント比の関係を示す。図に示すように、透水係数の値は、水セメント比の増大にともない大きくなる傾向を示している。とくに水セメント比が65%では、著しく大きな値を示している。このような傾向は、筆者らが既報<sup>2)</sup>で報告した、フレッシュモルタル中の自由水(着色液)の上昇距離と水セメント比との関係や、ブリーディング量との関係と同様の傾向である。すなわち、既報<sup>2)</sup>では、図 -

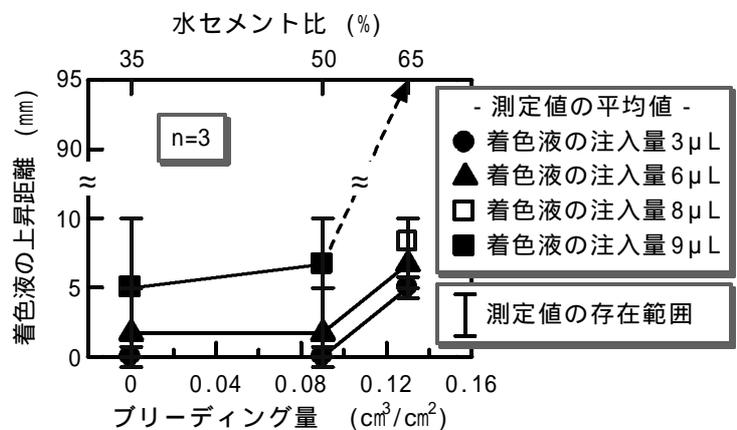


図 - 6 着色液の上昇距離と水セメント比およびブリーディング量の関係<sup>3)</sup>

6 に再掲したように、水セメント比やブリーディング量の値が大きくなると着色液の上昇距離も長くなる傾向がみられた。したがって、本実験で得られたフレッシュモルタルの透水係数は、ブリーディングによる自由水の上昇挙動と密接な関係があり、水セメント比やブリーディング量と相関のある値を示したといえる。

写真 - 2 に、硬化後の試料切断面を示す。写真(a)から分かるように、水セメント比が35%では、着色液は試料中を均一に浸透せず、試料厚さの中間から容器側面を移動経路とした形跡がみられる。また他の試料では、着色液はほぼ均一に浸透しており、容器側面による影響は明確にはみられなかった。したがって、水セメント比が35%の試料については、吸引圧を50kPaより大きな値として試験方法を検討する必要があるといえる。



写真 - 2 硬化後の試料切断面(実験2)

↓ 試料中を均等に浸透した着色液の浸透深さ

## 5. まとめ

フレッシュモルタルの透水試験方法を考案し、実験1として、水セメント比50%のモルタルを用い、吸引圧および試料厚さが透水係数に及ぼす影響について検討した。実験結果をまとめると、以下ようになる。

- 1) 透水量と透水時間の関係は線形関係にあり、全透水量と全排水量はほぼ一致した。
- 2) 透水係数は、水頭差(吸引圧)が30kPaでは試料厚さにより大きく異なる値を示すが、50kPaでは試料厚さによらずほぼ一定の値を示した。
- 3) 透水係数は、試料の基準厚さが10mmおよび15mmでは大きく異なる値を示したが、20mmでは吸引圧によらずほぼ一定の値を示した。
- 4) 浸透水は吸引圧が50kPa未満では、容器側面を移動経路とすることがある。
- 5) 考案したフレッシュモルタルの透水試験方法で、試料ごとに一定した値の透水係数を求めることが可能である。

また実験2として、配合(水セメント比)が透水係数に及ぼす影響について検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) 透水係数はブリーディングによる自由水の上昇挙動と密接に関係し、水セメント比やブリーディング量と強い相関関係にある。
- 2) 密実な試料を対象として透水試験を行う場合には、吸引圧を50kPaより大きな値とする必要がある。

今後は、フレッシュコンクリートの透水試験方法について検討を進めていく所存である。また、透水係数を応用し、ブリーディング量の推定や、透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善効果の推定を試みたいと考えている。

## 【謝辞】

本実験に際し、黒田萌さん(三重大学大学院生)のご助力を得た。また本研究費の一部は、平成16年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)(2)(研究代表者：畑中重光)によった。付記して謝意を表します。

## 【参考文献】

- 1) 河井 徹：モルタルおよびコンクリートの加圧脱水のメカニズムに関する研究，透水・脱水によるコンクリートの品質改善に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp. 307-314，2004.9
- 2) 犬飼利嗣，畑中重光，三島直生，金子林爾：視覚的評価方法によるコンクリート中のブリーディング挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp. 609-614，2004.7
- 3) 犬飼利嗣，畑中重光，三島直生，金子林爾：視覚的評価方法にもとづくモルタル中の自由水のブリーディング挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第590号，pp.1-7，2005.4
- 4) 犬飼利嗣，畑中重光，三島直生，張 珉秀：可視化手法に基づく透水・脱水コンクリート中の自由水の挙動評価に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.595-600，2005.6
- 5) 犬飼利嗣，和藤 浩，坂本英輔，三島直生，畑中重光，金子林爾：可視化手法に基づくコンクリート中の自由水の挙動評価に関する実験的研究，日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集，A-1，pp.515-518，2005.9
- 6) 平田隆祥，竹田宣典，十河茂幸：石灰石粉を用いたコンクリートのブリーディング水の移動機構と強度分布について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.501-506，1993.5