

# 論文 型枠界面に生じるブリーディング水に及ぼす配合の影響に関する実験的検討

三田 勝也\*1・加藤 佳孝\*2

**要旨:** ブリーディング水の挙動を把握することは、コンクリート表層部の品質を把握する上で重要である。これまでペーストを用いることで現象を単純化し、型枠形状一定で、底面寸法を変化させることで、ブリーディング水の発生量が異なることを明らかとした。本研究では、W/C および粉体種類を変化させて、型枠界面のブリーディング水の発生機構を理解することを目的とした。その結果、セメント粒子の水和反応が型枠界面近傍のブリーディング水発生に関係する可能性があることを明らかとした。また、粉体粒子の沈降現象によってブリーディング現象を説明できる可能性があることを明らかとした。

**キーワード:** ブリーディング水, 材料分離, 型枠界面, 沈降現象, 水和反応

## 1. はじめに

材料分離の結果生じるブリーディング水は、硬化後のコンクリートの品質を低下させると考えられている。ブリーディング水が硬化後のコンクリートに及ぼす影響について検討を行っている例はいくつか存在し、打込み高さ方向に対する水セメント比の変化<sup>1)</sup>や、骨材下部にブリーディング水が停留しやすいために生じる強度の異方性<sup>2)</sup>などが挙げられる。ブリーディング水の挙動に関して、これまでに様々な検討がされている<sup>3),4),5)</sup>が、共通している知見は、上面に生じるブリーディング水は、コンクリート内部を通過するものと、型枠界面を通過するものに大別されるという点である。これらの知見は、硬化コンクリートの品質低下が、内部と外部(型枠界面)で生じる可能性を示している。

著者らは、ブリーディング水が、コンクリート表層部の品質に与える影響を実験的に検討しており、その結果から目視確認可能な欠陥(例えば砂すじ)を生じる場合があること、および欠陥が目視確認不可能な場合でも、物質透過性が高い脆弱な層を形成することを示した<sup>6),7)</sup>。近年、コンクリート構造物の表層品質が重要視されており、定量的に評価する試み<sup>8)</sup>がなされているが、コンクリート構造物の維持管理の観点から、表層品質の低下を推定するためには、ブリーディング水の発生機構を理解する必要があると考えられる。また、JIS A 1123で規定されている試験方法では、円柱容器を用いており、形状および寸法の異なる型枠が用いられる実構造物との適合性を把握する必要がある。以上を踏まえて、著者らは、セメントペーストを用いて、ブリーディング現象を単純化し、型枠形状および寸法を変化させて実験を行った。その結果、同一のW/Cであっても最終ブリーディング量が異なることがわかった<sup>9)</sup>。また、実験結果の分析から、

ブリーディング量の発生が、①型枠面の摩擦により緩やかに発生する領域、②型枠界面近傍で急速に発生する領域および③内部における平均的に発生する領域が存在することを示した<sup>10)</sup>。この検討結果は、ブリーディング現象が容器形状および寸法によって、異なることを示すものである。

一般的にブリーディング水は、配合の影響を大きく受ける。例えば、W/Cの増加によって、ブリーディング水の発生量は増加する。これはペースト中の粉体容積が異なっているからだと推定できる。

ブリーディング現象は、ペーストのような単純な系では、重力による粉体粒子の沈降によって生じる固液の分離現象である。ブリーディング水の通り道となる「水みち」は、沈降中の粒子間および壁面と粒子の間に生じる空間と考えられる。粉体濃度が異なった場合、型枠内に存在する粒子数が異なるため、内部(上記③)および界面(上記①および②)におけるブリーディング水の発生も異なる可能性がある。また、セメント系材料を用いると、粉体は水和反応を生じる。その結果、粒子径が変化するため、単純な沈降現象とはならず、粉体濃度の変化と同様にブリーディング水の発生に変化が生じる可能性がある。本研究では、型枠界面(上記①および②)に生じるブリーディング水の発生機構を検討するために、容器内部のペーストの配合および粉体種類を変化させて検討を行った。

## 2. 実験概要

本実験では、ペーストを用いたブリーディング試験を行う。粉体濃度の影響を見るために、ペーストのW/Cを変化させた場合で検討を行う。水和反応の影響を見るために、石灰石微粉末を用いた検討を行う。石灰石微粉末

\*1 東京理科大学 理工学部土木工学科 助教 博士(工学)(正会員)

\*2 東京理科大学 理工学部土木工学科 准教授 博士(工学)(正会員)

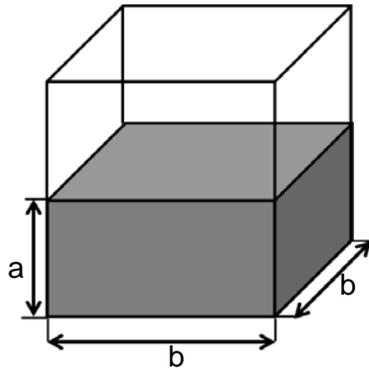


図-1 型枠形状

を用いた実験では、粒子の沈降距離および堆積が、ブリーディング水に及ぼす影響を検討するために、打込み高さを変化させた場合も検討する。

### 2.1 使用材料

本実験で使用したセメントは、普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm<sup>3</sup>, プレーン比表面積:3440cm<sup>2</sup>/g)である。また、水和反応の影響を検討するために、石灰石微粉末(密度:2.71g/cm<sup>3</sup>, プレーン比表面積:3500cm<sup>2</sup>/g)も用いた。セメントペーストの配合は、W/C=55,65,85,100%, 石灰石微粉末を用いたペーストは、水粉体比を64%とした。セメントペーストのW/C=55%との比較を行うために、粉体体積割合が同じとなるように決定した。フレッシュ性状として、「セメントの物理試験方法(JIS R 5201)」を参考に0打フロー値を計測した。なお、フロー試験は3回の平均値とした。フロー値はW/Cの順に、293mm, 398mm, 515mmおよび550mmとなった。石灰石微粉末では、470mmとなった。

### 2.2 ブリーディング試験

ブリーディング試験はJIS A 1123を参考に実施した。本実験では、ブリーディング水の挙動を理解することを目的としたために、通常のブリーディング試験とは異なり、各測定時間で打込み面に生じたブリーディング水を取水することなく、生じたブリーディング水の高さを測定することとした。測定は室温20℃, 湿度50~60%の環境下で行い、ブリーディング水の蒸発を防ぐため、型枠の解放部をシールした。なお、試験は3回実施し、結果は3回の平均値とした。

### 2.3 使用型枠および練混ぜ方法

本実験では上記ブリーディング試験を実施する際に、アクリル製型枠を使用した。型枠の形状は、図-1に示す通りであり、底面が正方形である直方体とした。型枠の寸法は、表-1に示す通りである。ペーストの打込みに関しては、所定の打込み高さまで一層で打ち込むものとした。ペーストはオムニ式ミキサーを用いて練混ぜた。ペースト作製手順としては、練混ぜ水をミキサーに投入後、粉体を投入し1分間低速で練混ぜ、かき落とし

表-1 実験水準

W/C(%)	a:打込み高さ (cm)	b:底面一辺の寸法 (cm)
55	10,20,30	1,5,10,15,20,25,30
65	10	1,10,30
85	10	1,10,30
100	10,20,30	1,10,30
石灰石微粉末	10,20,30	1,10,30

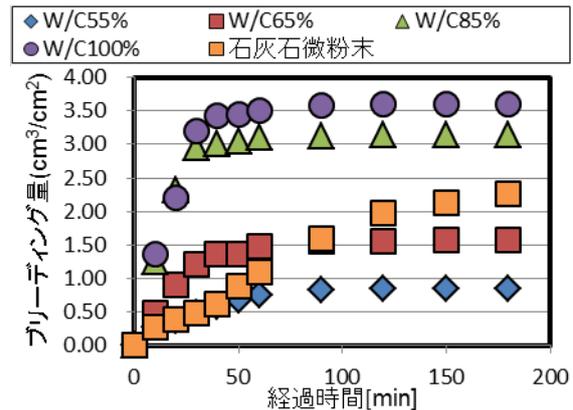


図-2 ブリーディング試験結果  
(底面寸法および打込み高さ 10cm)

を行った後、高速で1分間練混ぜるものとした。打込みに関しては所定の高さまで1層で打込んだが、打込み後、付き棒で5回突いた。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ブリーディング試験結果

図-2は、ブリーディング試験結果である。例として、打込み高さ10cm, 型枠底面寸法10cmの結果を示す。W/Cが大きくなるとブリーディング(以下、BL)量は多くなる結果となった。なお、底面の寸法が変化していても同じ傾向となった。

石灰石微粉末を用いた場合、同じ粉体容積であるW/C=55%の結果と比較すると、初期の40分まではBL量は同程度であったが、それ以降では、石灰石微粉末の方がBL量は大きくなっていた。また、BL量が一定値となるまでの時間は、石灰石微粉末を用いた場合は210分、セメントを用いた場合では、W/C=55%で120分となっており、石灰石微粉末の方が長かった。石灰石微粉末は、セメントのように水和反応を生じない。水和反応を生じた場合、時間と共にセメント粒子の周りに水和生成物が生じ、周辺のセメント粒子と団粒を形成しながら、沈降すると考えられる。石灰石微粉末の場合、凝集はするものの、反応で粒子径が変化することはないと考えられる。その結果、BL終了までの時間が長くなったと考えられる。これらの検討から、同一寸法および打込み高さの場

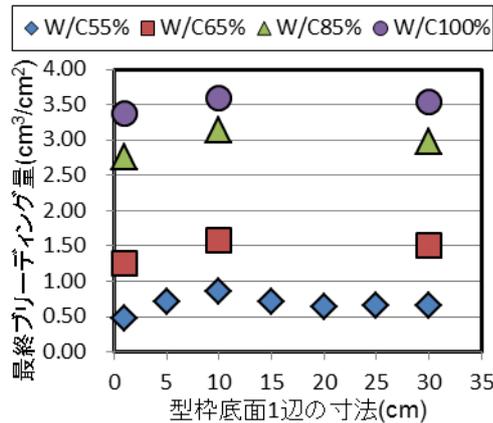


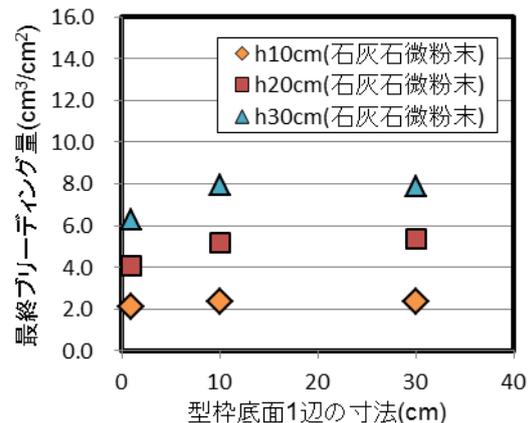
図-3 最終ブリーディング量と型枠底面1辺の長さの関係(W/C変化)

合、最終BL量およびBL速度は、粉体濃度および水和反応の有無により変化することがわかった。次節から、型枠底面寸法によって変化するか検討を行う。

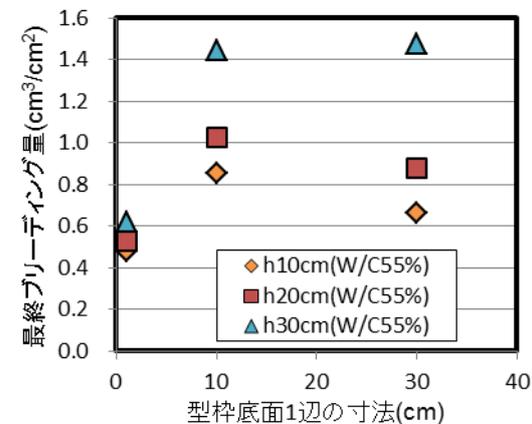
### 3.2 型枠底面寸法と最終ブリーディング量

図-3は、W/Cを変化させた場合の最終BL量と型枠底面寸法の関係である。縦軸を最終BL量、横軸を型枠底面1辺の寸法とした。W/C=55%の場合に関しては、これまでの検討結果<sup>10)</sup>から、他の底面寸法の結果も記載している。W/Cが変化しても、型枠底面の寸法が変化することで、最終BL量に差が生じている。その傾向は、すべてのW/Cで、底面寸法1cmから10cmで増加傾向を示し、10cmから30cmにかけて低下していた。W/C=100%では、わずかに低下の傾向は見られるものの、ほとんど差はなかった。

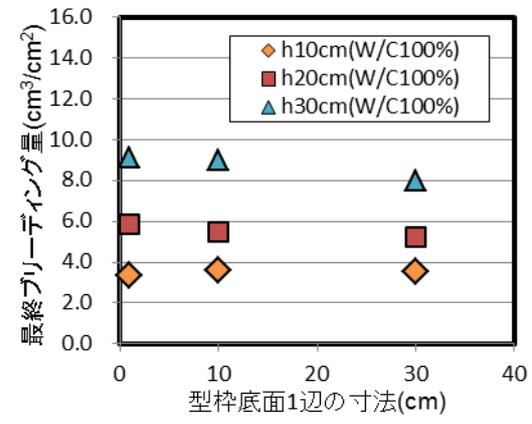
図-4(a)は、石灰石微粉末を用いた場合のBL試験における、打込み高さごとの最終BL量と型枠底面寸法の関係である。図-4(b)および図-4(c)は、W/C=55%および100%の場合における、同様の関係を示している。石灰石微粉末を用いた場合、すべての打込み高さで、底面寸法1cmから10cmは増加していたが、10cmから30cmでは同程度であった。W/C=55%の場合、底面寸法10cmまでは最終BL量が増加しており、その後若干低下する傾向にあった。W/C=100%の場合、最終BL量は、打込み高さ10cmの場合で若干増加していたが、20cmおよび30cmでは最終BL量の増加は見られなかった。各型枠底面寸法における最終BL量と打込み高さの関係を見ると、石灰石微粉末の場合、打込み高さの増加に伴い、最終BL量も、ほぼ同じ割合で増加している。W/C=55%では、その傾向は見られなかった。また、W/C=100%は、W/C=55%よりも、石灰石微粉末の傾向に近くなっていた。セメント粒子の場合、粒子沈降中も水和反応によって粒子径が大きくなる。粒子径の増加によって、単純に粒子が堆積した場合よりも、堆積物の容積が増えるものと考えられる。



a)石灰石微粉末



b)W/C=55%



c)W/C=100%

図-4 最終ブリーディング量と型枠底面1辺の長さの関係(粉体変化)

### 3.3 型枠底面寸法と平均ブリーディング速度

粉体濃度が大きい場合や水和反応を生じた場合ではペースト内部で粒子間の衝突が起こりやすくなり、粒子沈降の妨げになることが考えられる。結果として、BL速度が変化する可能性がある。また、W/C一定で底面寸法が変化すると、粉体濃度が同じであっても、型枠内部の粒子数が変化するため、沈降過程が異なっている可能性がある。ブリーディング試験結果から平均BL速度を算出した。平均BL速度は、既往の研究<sup>9)</sup>を参考に、最終BL量の50%に相当する量を経過時間で除した値として算出

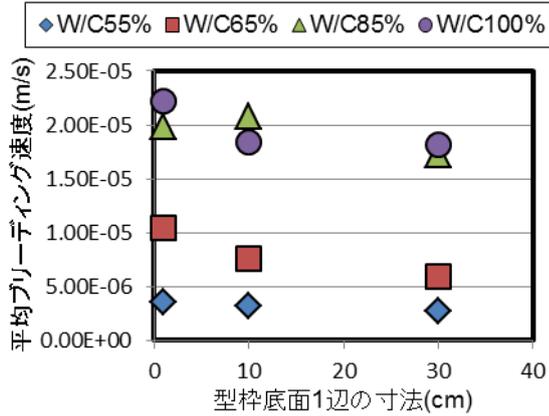


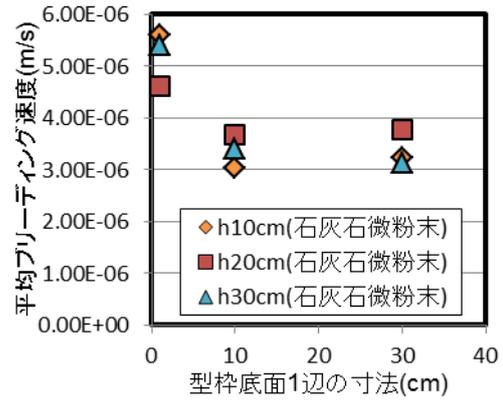
図-5 型枠底面寸法と平均ブリーディング速度

した。なお、算出したBL速度は、断面内での平均的なBL速度である。図-5は、W/Cを変化させた場合における、平均BL速度と型枠底面寸法の関係である。W/Cが高くなる程、平均BL速度は大きくなる傾向にあった。型枠底面寸法ごとに見ると、寸法が大きくなる程、平均BL速度は低下する傾向にあった。また、W/C=55%の場合は、平均BL速度の低下割合は小さかったが、その他のW/Cでは、大きかった。図-3の最終BL量との関係を見ると、底面寸法1cmでは、どのW/Cでも、最終BL量は最も小さかったが、平均BL速度は最も大きい傾向になった。底面寸法1cmの場合は、他の型枠と比べて、沈降現象が他の底面寸法と異なっている可能性がある。

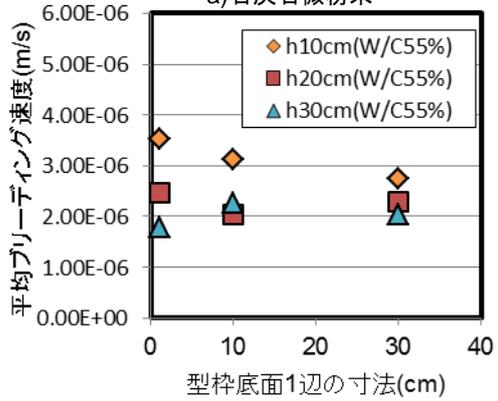
図-6(a)は、石灰石微粉末を用いた場合における、平均BL速度と型枠底面寸法の関係である。図-6(b)および図-6(c)は、W/C=55%および100%の場合における同様の関係を示している。石灰石微粉末の場合、各打込み高さで、底面寸法1cmが最も速く、10cmおよび30cmで速度は低下し、ほぼ同じになっていた。W/C=55%では、底面寸法および打込み高さの影響は見られなかったが、底面寸法1cmでは、打込み高さ10cmおよび20cmで若干速度が上昇していた。W/C=100%では、打込み高さ10cmの場合、全ての底面寸法で平均BL速度は最も大きい。打込み高さが増加すると、底面寸法によらずほぼ一定で、石灰石微粉末と同じ傾向となっていた。底面寸法1cmにおける速度の上昇は、水和反応の有無によらず発生するが、水和反応がないか、または粉体濃度が低い方がその程度が大きいことが分かった。

### 3.4 ブリーディング水の3層構造解析

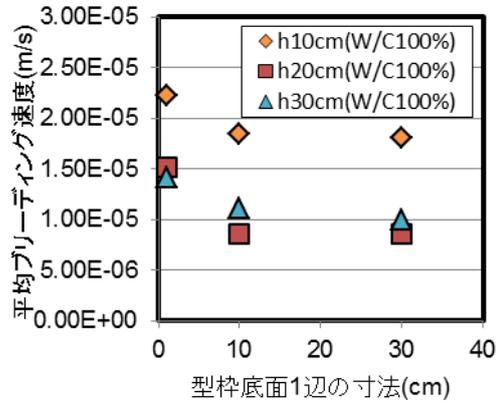
型枠底面寸法と最終BL量との関係を、これまでの検討<sup>10)</sup>と同様に、BL量の異なるいくつかの領域の平均値として評価した。図-7に示すように、ペースト内部には、BL量の異なる3つの層が存在することが予測できる。それぞれ、①型枠面の摩擦抵抗を受けて他の領域と比べてBL量が少ない領域(領域①, BL<sub>1</sub>)、②型枠界面から僅かに内部に存在し、最もBL量が多い領域(領域②, BL<sub>2</sub>)、



a) 石灰石微粉末



b) W/C=55%



c) W/C=100%

図-6 平均ブリーディング速度と型枠底面1辺の長さの関係(粉体変化)

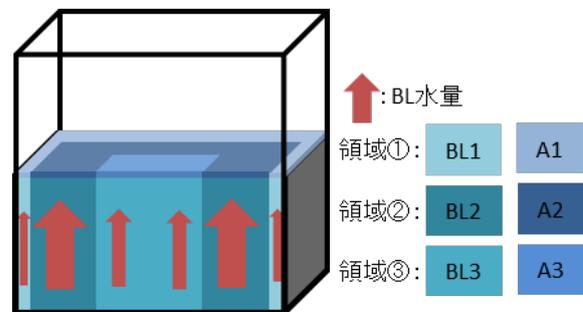


図-7 型枠界面を考慮したBL水の発生概念図

③型枠の影響を受けない領域(領域③, BL<sub>3</sub>)の3つである。3つのBL量の大きさはBL<sub>1</sub> < BL<sub>3</sub> < BL<sub>2</sub>であると仮定した。各領域面積およびBL量をそれぞれA<sub>i</sub>(cm<sup>2</sup>)および

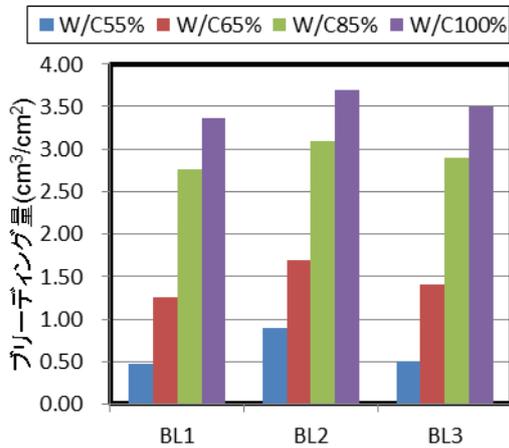


図-8 各領域のブリーディング量 (W/Cの影響)

び $BL_i$ ( $cm^3/cm^2$ ) ( $i=1\sim3$ ) とすると、断面全体としてのBL量は以下の式(1)のように記述できる。

$$BL = \frac{\sum (BL_i \cdot A_i)}{A_i} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

W/Cごとに各領域のBL量を算出した結果を図-8に示す。領域①に関しては、0.5cmで一定とした。領域②および③は、式(1)から算出される算定値と実験値との誤差が最小になるように決定した。その結果、領域②は、W/C毎に、3.0, 3.1, 2.2および2.3cmとなり、領域③は底面寸法によって変化するため、底面寸法10cmの場合を示すと、1.5, 1.4, 2.3および2.2cmとなる。なお、領域は、図-7における片側側面からの距離である。W/Cが大きくなると領域②は小さくなる傾向があり、逆に領域③は大きくなる傾向になった。W/C増加に伴い、粉体濃度は低下する。領域③は、ペースト内部を通過するBL水の領域と捉えると、粉体濃度が低いことから、BL水が粒子間を通過しやすくなると推察できる。

図-9および図-10は、W/C=55%および石灰石微粉末を使用した場合の算出結果である。打込み高さ10cmを基準として、打込み高さ20cmおよび30cmにおける領域のBL量を比較すると、W/C=55%の場合は、 $BL_1$ で1.1, 1.3倍、 $BL_2$ で1.3, 1.8倍、 $BL_3$ で1.2, 2.8倍となっており、石灰石微粉末の場合では、 $BL_1$ で1.9, 2.9倍、 $BL_2$ で2.2, 3.4倍、 $BL_3$ で2.3, 3.3倍となった。石灰石微粉末を用いた場合は、各領域のBL量の増加割合が、打込み高さの増加割合とほぼ等しかった。この時、打込み高さ毎の領域②は、セメントを用いた場合で、3.0, 4.4および1.9cmであり、石灰石微粉末を用いた場合は、3.0, 3.0および2.9cmとなり、打込み高さが大きくなると、水和反応によって型枠界面近傍の空間が狭くなっていると考えられる。つまり、BL水が通過する経路が変化していると考えられる。

#### 4. 型枠界面のブリーディング水上昇について

上面へのBL水の発生は、Powersの研究<sup>11)</sup>でペースト中のセメント粒子の沈降によって生じるとされている。こ

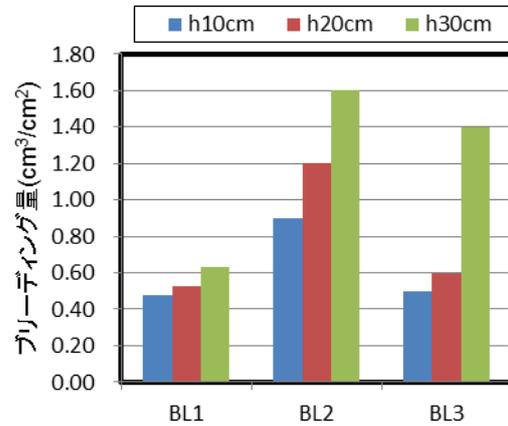


図-9 各領域のブリーディング量 (打込み高さ別, W/C=55%)

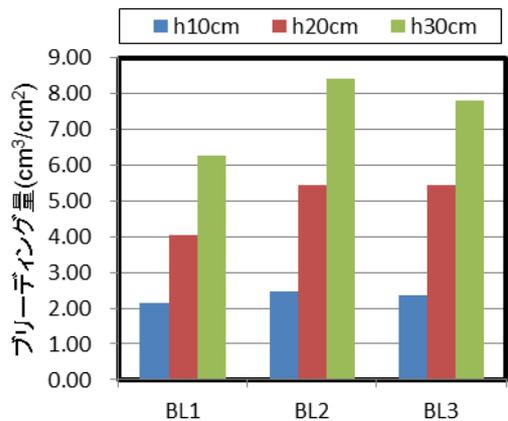


図-10 各領域のブリーディング量 (打込み高さ別, 石灰石微粉末)

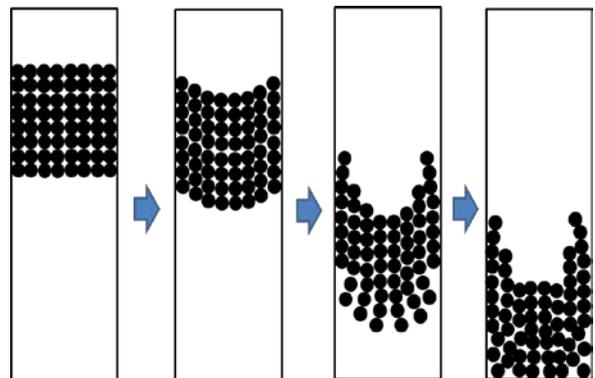


図-11 容器内部における粒子沈降・堆積の概念図

の時、水の移動は、粒子の沈降との相対的な運動として捉えられる。粒子1個が沈降する時、流体は粒子に押しつけられることで、相対的な速度を持つものと考えられる。

粒子の自然沈降では、流体から形状による抗力や浮力の他に、粒子が沈降方向と平行に置かれた壁面の間を沈降する場合、潤滑力を受けると考えられている。潤滑力とは、粒子が周りの流体を押しつける、あるいは引き込むことによって生じる力のことであり、粒子が受ける抗力の一種である。潤滑力は、壁面からの距離に反比例することが知られている<sup>12)</sup>。潤滑力によって、粒子沈降速

度は壁面に近いほど遅くなる。すなわち、図-11のように相対的に内部の粒子は早く沈降することになる。その結果、型枠底面に堆積する粒子は内部の粒子の割合が多いと考えられる。本実験で底面寸法 1cm と短い場合、潤滑力が働く範囲が底面寸法に対して大きい。そのため、型枠中央を沈降する粒子の堆積が生じやすく、3.3 節に示すように、底面寸法 1cm では、平均的な BL 速度は大きくなるが、最終 BL 量は小さくなると考えられる。

図に示すように粉体粒子群が沈降すると、押しのけられた流体は、粒子間を通過する場合と型枠面に向かうものに分かれると考えられる。

粉体濃度 (W/C) を変化させた場合、型枠内部の粒子間距離は、濃度が低くなるほど大きくなると考えられる。その結果、3.4 節に示すように、粒子間を通過する水 (BL3) と型枠界面を通過する水 (BL2) は、同程度になる。

水和反応が生じることで、粒子径が時々刻々と変化する。沈降中においては、粒子間を通過する水の経路が狭くなることが考えられる。その結果、型枠内部から生じる BL 水 (BL3) が小さくなる。セメントを用いた場合、打込み高さの増加と等倍に、最終 BL 量が増加しなかったのは、粒子沈降・堆積過程において、水和生成物が堆積物の空隙を埋めたためと考えられる。

## 5. まとめ

本実験の結果、得られた知見を以下に示す。

- (1)セメントペーストの W/C を変化させても、最終ブリーディング量および平均ブリーディング速度が、型枠底面寸法によって異なることがわかった。
- (2)石灰石微粉末を用いた実験から、水和反応を生じない場合では、型枠底面寸法の影響は少ないことがわかった。しかし、底面寸法が小さい場合は、型枠壁面からの潤滑力が大きく働き、最終ブリーディング量が低下する傾向にある。
- (3)水和反応を生じない粉体を用いた場合でも、型枠の影響を考慮した 3 つの領域 (①低ブリーディング水発生領域、②高ブリーディング水発生領域および③型枠の影響を受けない領域) から生じるブリーディング量は、ほぼ等しい結果となった。セメント粒子との比較から、領域の大きさには水和反応が関係している可能性が高いことが考えられる。
- (4)打込み高さを変化した場合の最終ブリーディング量の変化は、粉体濃度および水和反応の有無による粒子堆積構造が異なるために生じる。

謝辞：本研究の一部は科研費 (23360189) の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 神田衛, 吉田八郎: コンクリート打込み後の柱断面における水セメント比の分布性状, セメント・コンクリート, No.342, pp.27-32, 1975.
- 2) 十和田知三: コンクリートの引張異方性におよぼす調合および粗骨材の影響, 日本建築学会論文報告集, No.235, pp.1-7, 1975.
- 3) 沢出稔: ブリーディング水の発生に関する速度論的解析, 材料, Vol.39, No.442, pp.182-193, 1990.
- 4) 犬飼利嗣, 三島直生, 坂本英輔, 畑中重光: フレッシュモルタルの透水係数に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1109-1114, 2006.
- 5) 犬飼利嗣, 畑中重光, 三島直生: 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.
- 6) 三田勝也, 加藤佳孝: ブリーディング水がコンクリート表層部の品質に与える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.33, No.1, pp.1385-1390, 2011.
- 7) 早川健司, 加藤佳孝: 材料分離がコンクリートの表層透気性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.647-652, 2011.
- 8) (社) 土木学会: 構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証研究小委員会 (335 委員会) 成果報告集およびシンポジウム講演概要集, 2012.
- 9) 三田勝也, 加藤佳孝: 型枠形状の違いがブリーディング水の発生機構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.34, No.1, pp. 1198-1203, 2012.
- 10) 三田勝也, 加藤佳孝: ブリーディング水の発生機構に型枠断面寸法が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.35, No.1, pp. 1207-1212, 2013.
- 11) Powers T.C.: The Properties of Fresh Concrete, John Wiley and Sons, Inc, pp.604-652, 1968.
- 12) Happel, J. and Brenner, H.: Low Reynolds Number Hydrodynamics, Martinus Nijhoff Publishers, pp.322-331, 1983.