

論文 領域分割による型枠界面のブリーディング水計測に関する実験的検討

三田 勝也*¹・加藤 佳孝*²

要旨: 型枠界面を上昇する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。本研究では、ペーストを用いたブリーディング試験で、ペースト上面を内部と外部に強制的に分けることで、型枠近傍を上昇するブリーディング水の挙動を検討することを目的とした。その結果、本実験の条件（粉体種類および W/C）では、分割した外側のブリーディング量が多くなる結果となった。また、この試験方法で、断面内部のブリーディング量の分布を測定することで、型枠界面のブリーディング水の挙動を評価し、断面内部のブリーディング量の分布が対流現象によって生じる可能性を示した。

キーワード: ブリーディング水, 型枠界面, 沈降現象, 水和反応, 対流現象, 領域分割

1. はじめに

コンクリートは、密度の異なる材料によって構成される複合材料である。そのため、フレッシュ状態のコンクリートでは、材料分離が生じやすくなる。材料分離に伴うブリーディング水は、コンクリートの品質低下の一要因となることが知られている¹⁾。ブリーディング水は骨材や鉄筋の下部に溜まりやすく、硬化後、空隙を形成する²⁾と考えられている。また、型枠界面を上昇することが知られており、その結果、ブリーディング水が原因となる初期欠陥や、W/Cの上昇³⁾といったコンクリート表層部の品質低下を引き起こすと考えられている。

現在、コンクリート構造物の表層品質が注目されており⁴⁾、コンクリート表層部の品質確保が重要となっている。コンクリートの養生条件が同じで、表面欠陥が生じていない場合、表層品質は、型枠界面に生じるブリーディング水の挙動に強く依存すると考えられる。

ブリーディング水の挙動に関する既往の研究では、ブリーディング現象を粉体粒子の沈降現象として捉えている研究⁵⁾、骨材や混和剤の種類の影響を検討した研究⁶⁾、構成要素中の粉体に着目した研究⁷⁾、視覚的評価によってブリーディング水の挙動を検討した研究^{8),9)}、など様々な方法で検討されてきた。多くの研究で言及されているのは、ブリーディング水の移動経路は、コンクリートの内部を上昇する場合と、型枠との界面を上昇する場合に分けられることである。しかし、ブリーディング試験によって測定されるのは、上面に生じるブリーディングの総量であり、全体のブリーディング水に占める内部あるいは型枠界面のブリーディング水を定量的に評価するまでには至っていない。

既往の研究を踏まえて著者らは、ペーストを用いた単

純な系で、型枠形状や底面寸法を変化させて、型枠界面のブリーディング水の挙動を検討してきた^{10),11)}。断面積を一定として、断面形状を変化させた場合、型枠側面積が大きいほど、最終ブリーディング量が多くなる結果に対して、型枠界面に生じるブリーディング水の移動経路が多くなるためと結論づけた。また、ブリーディング量（単位:cm³/cm²）は、断面積で正規化した値であるため、打込み高さや型枠形状が同じであれば、底面寸法を変化させても一定となるはずであるが、異なる結果を得た。この実験結果に基づき、断面内部にブリーディング水の発生量の異なる3つの領域が存在する仮説を立てた。具体的には、型枠界面近傍に発生量が少ない領域が存在し、型枠界面から0.5~4.0cmの領域が最もブリーディング水の発生が多く、それ以深では平均的にブリーディング水が発生する領域が存在する。この様な仮説を立てることで、底面寸法の変化に伴うブリーディング水量の変化を説明してきたが、型枠界面のブリーディング水を直接計測するまでには至っていない。

既往の研究では、コンクリート内外のブリーディング量を直接計測している例は少ない^{例えは¹²⁾}。また、いずれも型枠内部の試料を乱しており、適切に内部と型枠界面のブリーディング水の評価できていないと考えられる。

本研究では、型枠界面のブリーディング水の直接計測を目的として、型枠内部の試料の乱れを極力少なくした、領域分割ブリーディング試験を実施した。ペーストを対象とした実験から、型枠界面のブリーディング水を直接計測し、型枠寸法を変化させて分析した間接的な実験結果と比較検討を行う。

2. 実験概要

※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）

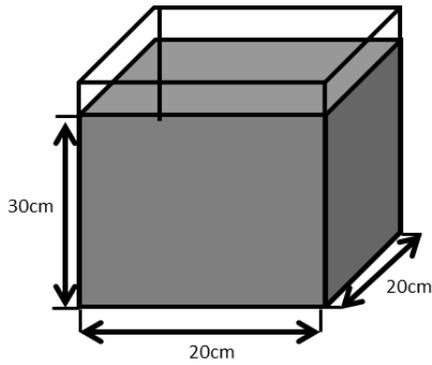


図-1 型枠形状

本実験では、現象を単純化する目的で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した。水和反応の影響を見るために、石灰石微粉末も用いて検討した。

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(以下 OPC, 密度:3.15g/cm³, ブレーン比表面積:3440cm²/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(以下 LS, 密度:2.71g/cm³, ブレーン比表面積:3500cm²/g)も用いた。OPC の配合は、W/C55,65,85 および 100%, LS を用いたペーストは、水粉体比を 64%とした。これは、OPC ペーストの W/C55%と比較するために、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、305mm, 391mm, 545mm および 580mm となった。LS では、445mm となった。

2.2 使用型枠および練混ぜ方法

本実験では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。型枠の底面寸法は、これまでの検討¹¹⁾を参考に、断面内部の3つのブリーディング量(少ない, 多い, 平均的)が、同時に存在する寸法として 20cm を採用した。ペーストはオムニ式ミキサーを用いて練り混ぜた。ペースト作製手順は、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、かき落としを行った後、高速で1分間練混ぜた。ペーストの打込みは、打込み高さ 30cm までを一層で打ち込み、打込み後、付き棒で5回突いた。

2.3 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。これまでの検討^{10),11)}では、上面に生じたブリーディング水の高さを計測しブリーディング量を算出していた。本

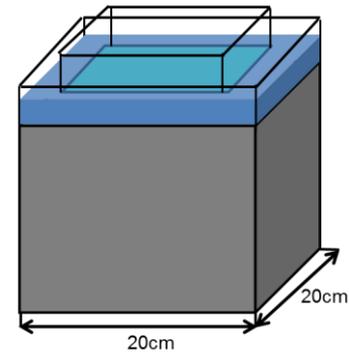


図-2 領域分割 BL 試験型枠外観

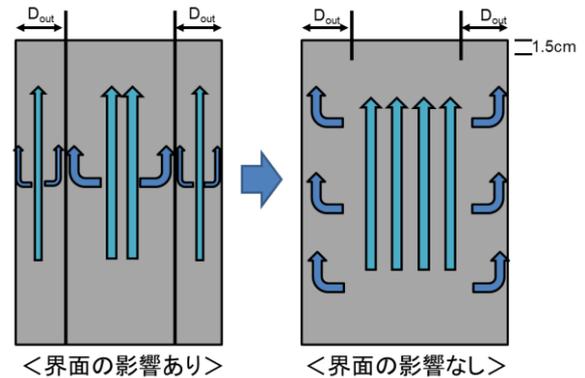


図-3 領域分割の概要

実験では、内外のブリーディングを分離するための仕切りによって、内側の高さを計測することができなかったので、上面に析出したブリーディング水を取水する方法とした。なお、試験は2回実施し、結果は2回の平均値とした。

2.4 領域分割ブリーディング試験

本研究で実施した、領域分割ブリーディング試験の概念図を図-2 に示す。外側の型枠よりも小さい型枠を内部に設置することで、上面に発生するブリーディング(以下 BL)量を分割した。既往の研究¹⁰⁾を踏まえて、内側の型枠は、上面から常に 1.5cm の深さになるように調整している。これは、図-3 に示すように、内側の型枠を深く挿入すると型枠界面の影響が生じるため、型枠界面の影響を極力排除することを目的としている。本試験の妥当性を検証するために、外側の型枠内面から内側の型枠外面までの距離(以下 D_{out})を 3.0cm として試験した。W/C55%を対象とした、領域分割 BL 試験の結果を図-4 に示す。図には、通常の BL 試験の結果も併記したが、内部 BL 量(以下 BLin)と外部 BL 量(以下 BLout)の平均的な量となっていることがわかる。BLout と BLin を比較すると、試験開始から 20 分までは両者ともにほぼ同じ割合で増加しており、その後、60 分まで BLoutの方が若干多くなっていた。最終的に BLout が BLin の 1.4 倍となっていた。以上のことから、この試験方法によって、内部と外部の BL 水を分割できると考えられる。

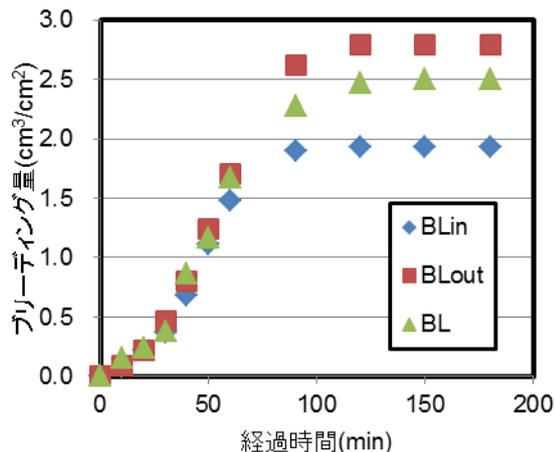


図-4 領域分割 BL 試験測定例 (W/C55%)

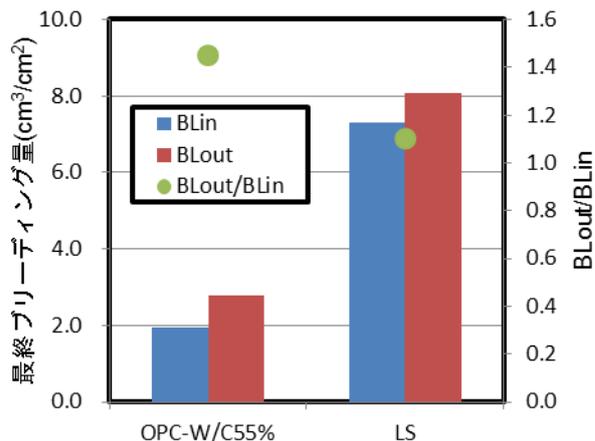


図-5 領域分割 BL 試験結果 (水和反応の影響)

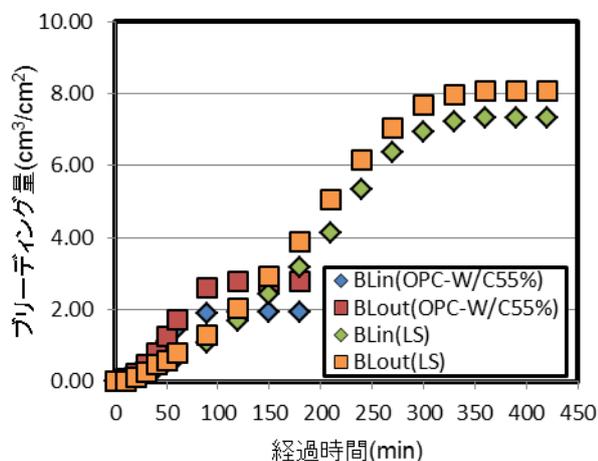


図-6 領域分割 BL 試験結果 (LS)

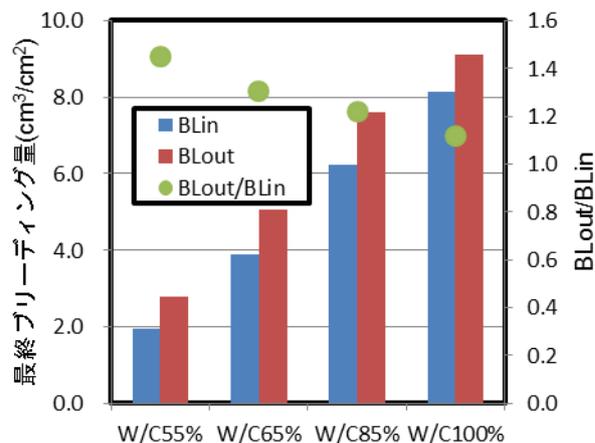


図-7 領域分割 BL 試験結果 (W/C 影響)

3. 実験結果および考察

3.1 水和反応の影響

図-5 は、粉体種類を変化させた場合の領域分割 BL 試験の結果である。水和反応の有無によらず、最終 BLin より最終 BLout の方が大きくなった。最終 BLout/最終 BLin の比率は、LS の方が小さくなり、1.0 に近づく結果となった。粉体濃度が同じでも、水和反応を生じる粉体では、内部より外部の BL 量が多くなり、水和反応を生じない粉体では、外部と内部に生じる BL 量はほぼ同じになっていた。

本実験では、OPC-55%および LS は、同じ 36.6%の粉体濃度に調整して実験を行ったが、水和反応を生じている粉体では、水和生成物の影響も考えられる。既往の研究をもとに、OPC-W/C55%の場合の水和生成物による体積増加を算出する。OPC-W/C55%ペーストの水和率に関して、既往の研究¹²⁾を参考にすると、水和開始から3時間で水和率が約5%となる。Powers のモデル¹³⁾を活用すると、水和率および W/C によって、水和生成物量(水和物とゲル空隙)を算出でき、水和率5%の場合の水和生

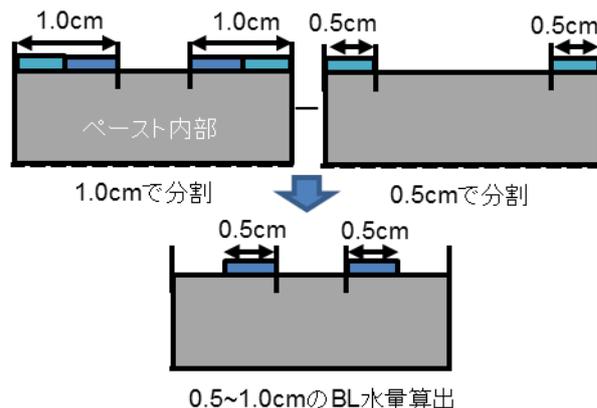


図-8 型枠面からの距離における BL 量算出の考え方 (0.5~1.0cm の例)

成物量は、 $3.9 \times 10^{-3} \text{cm}^3$ となる。これは粉体濃度で 0.3% の変化であり、試験時間の間では、粉体濃度はほとんど変化がなく、初期の水和反応と型枠界面の BL 量には影響がないと考えられる。図-6 は、LS を用いた場合の領域分割 BL 試験の結果である。OPC-W/C55%の結果と比

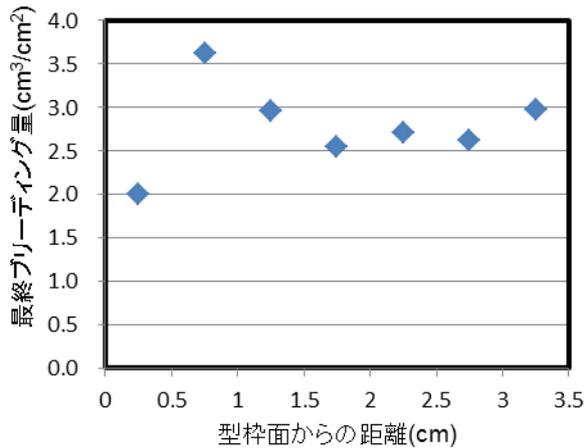


図-9 領域ごとの最終 BL 量分布 (W/C55%)

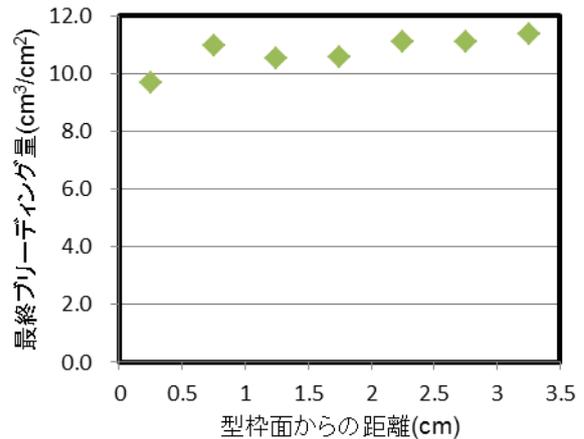


図-10 領域ごとの最終 BL 量分布 (W/C100%)

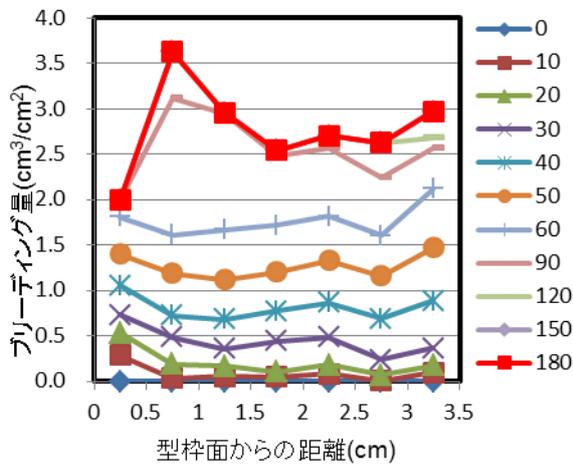


図-11 領域ごとの BL 量の時間変化 (W/C55%)

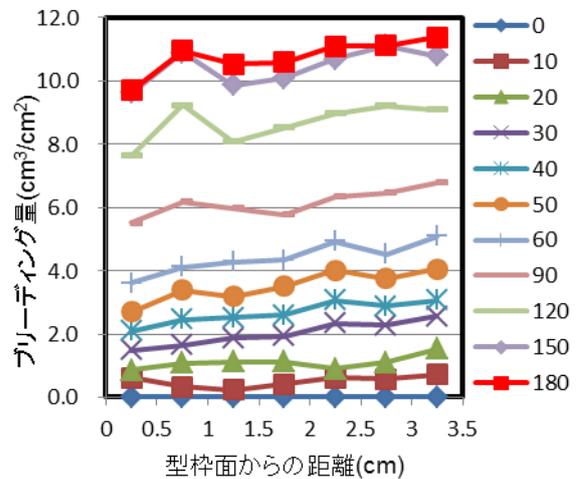


図-12 領域ごとの BL 量の時間変化 (W/C100%)

較すると、BLin および BLout とともに、経過時間が 120 分まで、OPC-W/C55%の方が大きくなっていた。また、BL 量が一定値となる時間は、OPC-W/C55%では、120 分であり、LS では 360 分だった。自然沈降では、粒子径が同じ場合、密度の小さい LS は、沈降速度が小さくなるためである。その後、時間と共に、OPC-W/C55%では BLin と BLout の差が生じており、LS では差がほとんど見られない結果となっている。LS の場合を粒子の単純な沈降現象と仮定すると、OPC-W/C55%では単純な沈降現象とはならない可能性がある。これらの違いについては、4.2 で考察する。

3.2 W/C の影響

図-7 は、W/C を変化させた場合の領域分割 BL 試験の結果である。すべての W/C で最終 BLin より最終 BLout の方が大きくなる結果となった。また、最終 BLout と最終 BLin の比を見ると、W/C の増加によって、比が 1.0 に近づき、最終 BLout と最終 BLin がほぼ等しくなっていた。W/C が増加すると、粉体濃度が低下する。その結

果、内部からも BL 水が上昇しやすくなると考えられる。

4. プリーディング水の発生領域について

4.1 実験方法

D_{out} を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5cm と変化させることで、詳細に領域ごとの BL 量を把握した。実験結果から、図-8 に示す考え方で各領域の BL 水量を計算した。例えば、0.5~1.0cm に発生した BL 水量は、領域 1.0cm に発生した BL 水量から、0.5cm の領域に発生した BL 水量を差し引くことで算出した。逐次、3.5cm までの領域で同様に処理することで、型枠界面から 0.5cm 間隔の領域に生じる BL 水量を求めた。図-9 および図-10 に、W/C55%および W/C100%の結果を示す。W/C55%の場合、0.5cm から 1.0cm の範囲で、最終 BL 量が増加し、1.0cm から 1.5cm で低下し、それ以深の領域では最終 BL 量は、ほぼ同程度になっていた。W/C100%では、0.5cm の領域で最終 BL 量は最も小さかったが、領域の増加と共に緩やかに増加する傾向にあった。打込み高さ 30cm、

W/C55%の場合、これまでの3層構造分析の結果¹¹⁾では、BL量が小さい領域(領域①):型枠面から0.5cm, BL量が多い領域(領域②):0.5~1.9cm, 平均的にBL量が発生する領域(領域③):断面中心までの残りの領域であった。本実験の結果から、最終BL量は、0.5cmの領域が最も小さかったため、領域①相当と考えられる。また、0.5~1.5cmまでの間で、最終BL量のピークが存在しており、領域②に相当すると考えられる。

4.2 型枠界面のブリーディング現象のメカニズム

図-11および図-12に、W/C55%およびW/C100%の、各領域から生じるBL量の時間変化の結果を示す。W/C55%の場合、BL量は発生から60分までは、他の領域と比べて、 $D_{out}=0.5cm$ および $D_{out}=3.5cm$ の領域で、増加する傾向にあった。また、60分以降では、 $D_{out}=0.5cm$ のBL量がほとんど増加しておらず、その他の領域は上昇していた。特に $D_{out}=1.0cm$ の領域では、最もBL量が発生する領域となっていた。W/C100%の場合、試験開始直後から20分までは、領域間は、ほぼ同一のBL量となっていたが、時間の経過とともに、内部に向かってBL量が増加する傾向にあった。また、時間ごとのBL量の増加割合は、ほぼ同程度となっていた。

実験結果から、W/C55%において、90分以降の各層のBL量の変化は、単純な沈降現象では説明できない。沈降現象では、水は静止状態と仮定しているが、結果を踏まえると、水が移動(対流)している可能性が考えられる。粒子の沈降にともない、水が対流するため、内部で沈降速度の分布が生じると考えられる。本実験条件で、対流現象が生じるか検討する。対流現象は、一般的には温度による流体の密度の変化が原因となる(熱対流)。式(1)は、流体力学の分野で、流体中の伝熱にかかわる無次元数である、レイリー数¹⁴⁾の算出式である。

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T x^3}{\nu\alpha} \quad (1)$$

ここに、レイリー数 Ra 、重力加速度 $g=981.6(cm^2/s)$ 、熱膨張係数 $\beta=0.00021(1/^\circ C)$ 、液体表面と液体内部の温度差 $\Delta T(^\circ C)$ 、代表長さ $x(cm)$ 、動粘性係数 $\nu=0.01004(cm^2/s)$ 、熱拡散率 $\alpha=0.0014(cm^2/s)$ である。各種物性値に関しては、温度 $20^\circ C$ の水のものとした。なお、代表長さとは、本実験での打込み高さとなる。

流体が対流し始める時のレイリー数が限界レイリー数であり、既往の研究でいくつか測定結果が示されている^{例えは^{14),15)}}が、型枠上面を自由表面、型枠底面を固定面とした場合、 $Ra=1108$ となる。この数値を式(1)に代入すると、 $\Delta T=2.8\times 10^{-6}(^\circ C)$ となる。数値から、通常のBL試験の条件では、対流は必ず生じていると考えられる。対流の発生状況は、定量的に解明できていないが、定性

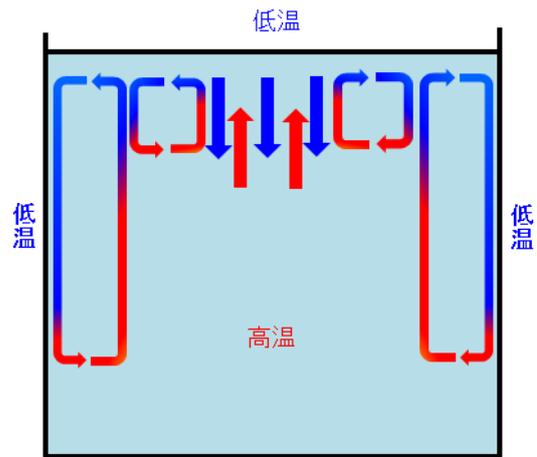


図-13 型枠内部の対流現象

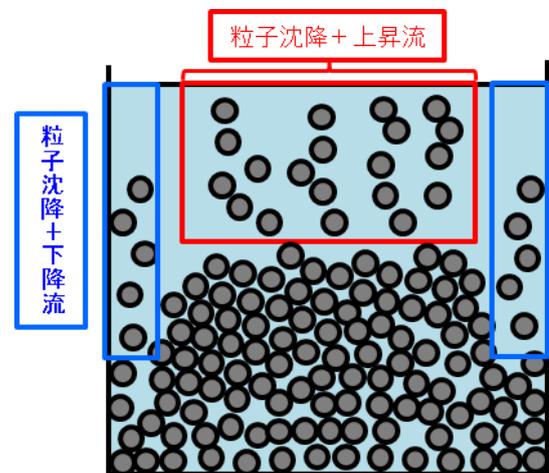


図-14 対流を考慮した型枠内の粒子沈降概念図

的に図-13ように発生すると考えられている。液体は温度が上昇すると密度が低くなり、温度が低下すると密度が高くなる。この密度差によって、図のような対流を生じる。BL試験では、セメント粒子の水和反応によって生じる水和熱が、熱源となって、内部の温度が上昇する。なお、既往の研究¹⁶⁾に基づき、W/C50%のコンクリートの場合の水和に伴う温度上昇量を算出すると、BL終了までの3時間程度で、約 $3.6^\circ C$ の上昇となる。相対的に上面と型枠側面では、周辺環境($20^\circ C$)によって温度が低下する。その結果、内部から上昇した水は、上面で温度が低下して下降する。その際に型枠側面では、さらに温度低下が生じ、内部よりも下降流は早くなると考えられる。これらの対流による流れと粒子沈降を考慮すると、図-14に示すようになる。水の密度よりもセメント粒子の密度の方が大きいために、粒子自体は沈降するが、水の対流による上昇・下降させる力によって、上面では、沈降が遅くなり、型枠界面では、沈降が速くなると考えられる。水和反応を生じない粒子(LS)を用いた場合、限界レイリー数の検証から、水和熱を生じないために、

対流が発生せずに自然沈降になると考えられる。粉体濃度が小さくなる場合については、セメント粒子数が少なくなるため、水和熱が減少することで、対流の程度が緩やかになっていると考える。つまり、OPC-W/C55%の場合よりも均等に沈降しやすい可能性がある。

5. まとめ

本実験の結果、得られた知見を以下に示す。

- (1)領域分割ブリーディング試験を用いて、発生するブリーディング量を、内部領域と外部領域に分割することができた。
- (2)領域分割ブリーディング試験を用いて、水和反応の有無、W/Cの変化に対する影響を評価することができた。水和反応を生じない場合や、粉体濃度が低い場合では、内部と外部のブリーディング量の差が小さくなる結果となった。
- (3)型枠面から0.5cm単位の領域から析出する最終ブリーディング量の測定結果から、W/Cによってブリーディング量の分布が異なることが明らかとなった。
- (4)ブリーディング水の挙動は、粉体の沈降現象に加えて、水和熱による対流現象を考慮する必要がある。

本検討を踏まえ、コンクリートに関して、検討を行う必要がある。コンクリートでは骨材があるため、対流現象に及ぼす骨材の影響を検討する必要があると考えられる。

謝辞：本研究の一部は土木学会吉田論文奨励賞の研究奨励によるものであることを付記する。

参考文献

- 1) 権代由範, 月永洋一, 庄谷征美, 阿波稔: コンクリート部材の断面厚さの相違が表層部脆弱層の形成に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.391-397, 2010.
- 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) 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.
- 4) 社)土木学会: 構造物表面のコンクリート品質と耐久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.
- 5) Powers T.C.: The Properties of Fresh Concrete, John Wiley and Sons, Inc.pp.604-652, 1968.
- 6) 石川潤, 小川裕平, 阿部道彦: モルタルのブリーディングに及ぼす細骨材の種類の影響, 日本建築学会関東支部研究報告集, 第81号, pp.5-8, 2011.
- 7) 加藤佳孝, 魚本健人: セメントペーストの凝集構造がブリーディング現象に与える影響, 土木学会論文集, Vol.39, No.592, pp.121-129, 1998.
- 8) 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.
- 9) 犬飼利嗣, 畑中重光, 三島直生, 金子林爾: 視覚的評価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.
- 10) 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.
- 11) 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報告集, Vol.35, No.1, 2013.
- 12) 丸山一平, 野口貴文, 松下哲郎: ポルトランドセメントの水和反応モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第593号, pp.1-8, 2005.
- 13) Powers, T. C.: The non-evaporable water content of hardened Portland cement paste: its significance for concrete research and its method of determination, ASTM Bulletin, No.158, pp.68-76, 1949.
- 14) Lord Rayleigh: On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side, Philosophical Magazine Series 6, Vol.32, pp.529-546, 1916.
- 15) 望月貞成, 村田章 『伝熱工学の基礎』日新出版, 1994.
- 16) 田中敏嗣, 下山義秀, 富田六郎, 西岡耕一郎: 水和熱による温度上昇の推定に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.913-918, 1990.