

論文 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

三田 勝也*1・加藤 佳孝*2

要旨: 複合材料であるコンクリートは、各材料間の密度差に起因して材料分離が生じるため、ブリーディング水が発生する。発生したブリーディング水は、硬化後のコンクリートの品質低下を引き起こすことが懸念されるにもかかわらず、発生機構に関しては解明されていない部分が多い。本研究では、型枠形状に着目し、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て、ペーストを用いてモデル実験を行った。その結果、型枠形状によってブリーディング水の発生量に差があること、その差に伴うブリーディング速度が型枠断面形状によって決定することが明らかとなった。

キーワード: 普通ポルトランドセメント, フライアッシュ, ブリーディング水, 材料分離, 自然沈降

1. はじめに

明治期に施工されたコンクリートは、硬練りが多かった。そのため、適切な締固めが行われていれば、ブリーディング水は、ほとんど発生しておらず、出来上がったコンクリートも、非常に品質の良いコンクリートであった。これに対して、現在施工されているコンクリートは、過去のコンクリートに比べ、使用材料の品質も大きく変わっており、また単位水量が多く流動性に富む配合となっている。さらに、ポンプ圧送をはじめとした施工方法の変遷ならびに配筋の高密度化が進んだ結果、材料分離を生じやすく、ブリーディング水が発生しやすくなった。

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内および表層部の品質を低下させる可能性がある。筆者らはこれまでにブリーディング水が、コンクリート表層部の品質を低下させる可能性があることを検討しており、コンクリート表層部に目視確認可能な欠陥が生じることや、劣化因子の侵入を容易にさせる脆弱な層を形成することがわかっている¹⁾²⁾。また、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³⁾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⁴⁾などが挙げられる。

ブリーディング水の挙動については、これまでにさまざまな検討が行われているが、そのほとんどは発生速度の評価に関する検討であり、多孔体中の表面張力による流れとして捉え、Darcy則を応用した速度論的解析⁵⁾や透水現象として取り扱う方法⁶⁾などが挙げられる。しかしながら、実施工では、ブリーディング試験で用いられている円柱形の型枠だけではなく、多種多様な型枠が用いられているのが現状である。しかし、型枠形状がブリー

ディング水の発生量に与える影響は検討されておらず、JIS A 1123 で規定されているようにブリーディング量あるいはブリーディング率によって評価されるため、コンクリート配合の影響のみが評価の中心となっていることが現状である。また、ブリーディング水はその性質上、セメントの凝結開始までにコンクリート中からの移動が終了しているはずである。しかし、打設から凝結開始までのブリーディング水の挙動については、未だ解明されておらず、硬化後の品質確保のためにもブリーディング水の挙動を明確に把握することは非常に重要だと考えられる。

本研究では、型枠形状の違いがコンクリート中から生じるブリーディング水に及ぼす影響を検討するために行った。実験では、ブリーディング水の挙動を単純化して検討する目的で、セメントペーストによるブリーディング試験を実施した。なお、速度論的な評価を行うために粉体粒子の沈降速度からブリーディング速度を検討する試みも行った。

2. ブリーディング水の発生パターンに関する実験

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/cm³, ブレーン比表面積:3440cm²/g)であり、粉体としての比較を行うためにフライアッシュ(密度:2.28g/cm³, ブレーン比表面積:3920cm²/g)のみでも検討を行った。試験はペーストを用いて行い、配合は水粉体比 55%とした。なお、それぞれの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、「PC グラウトの流動性試験方法 (JSCE-F 531-1994)」を参考に JP 漏斗による漏斗流下時間を計測した。結果はそれぞれセメントペーストがフロー値:

*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)

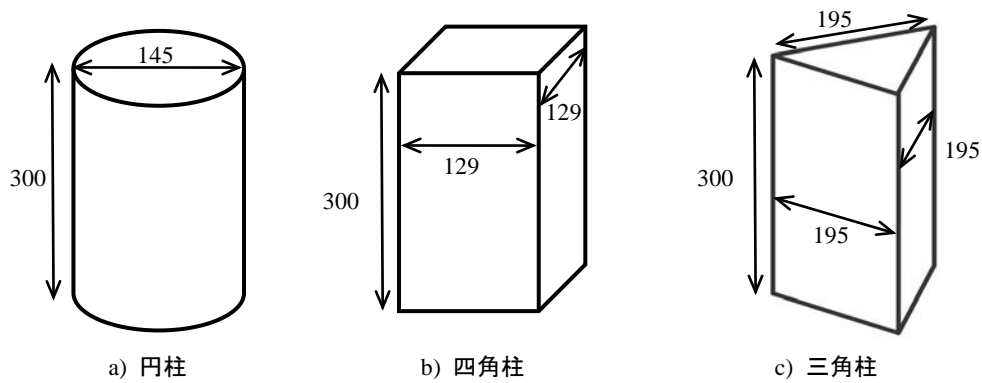


図-1 型枠形状 (単位:mm)

285mm および 6.44 秒, フライアッシュペーストがフロー値: 245mm および 6.63 秒であった。

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。

2.3 使用型枠

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板を使用した型枠に打込むこととした。図-1に型枠概要を示す。型枠の形状は図に示すとおり, 円柱, 四角柱および三角柱の3種類とした。なお, 各型枠の寸法は, 型枠の内寸を示しており, 底面積が全ての型枠でほぼ同一となるように決定した。打込み高さを底面から 10cm, 20cm および 28cm と変化させて, 打込み高さの変化によるブリーディング水の発生状況を検討した。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り混ぜた。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。

2.4 実験結果

(1) 打込み高さの影響

図-2, 図-3 および図-4 に, 円柱, 四角柱および三角柱の型枠で行ったブリーディング試験の結果を示す。なお, 打込み高さを 10cm, 20cm および 28cm の3種類に変化させた結果を示している。

図から, 打込み高さが高くなるほどブリーディング量は多くなっていく傾向があり, 一般的なブリーディング水の示す挙動と同じであった。しかし, 円柱の打込み高さ 20cm および 28cm においてはその傾向は異なっている

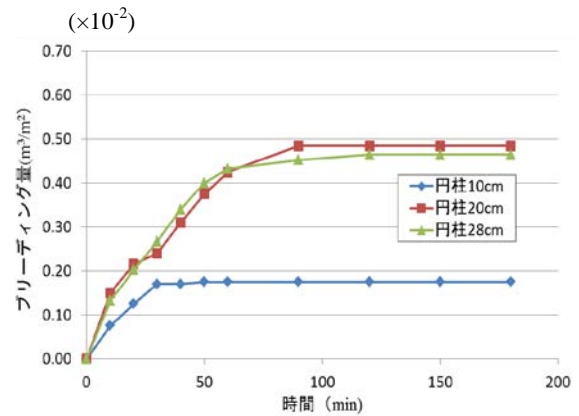


図-2 ブリーディング試験結果 (円柱)

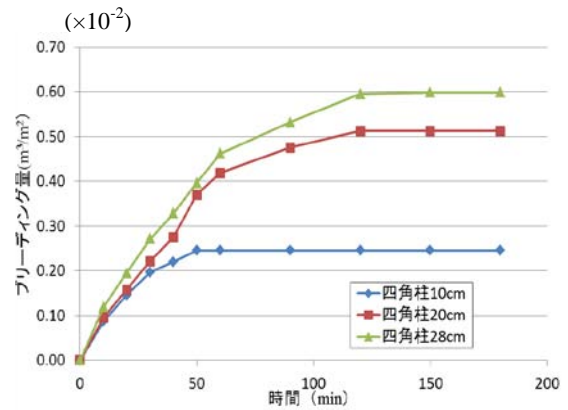


図-3 ブリーディング試験結果 (四角柱)

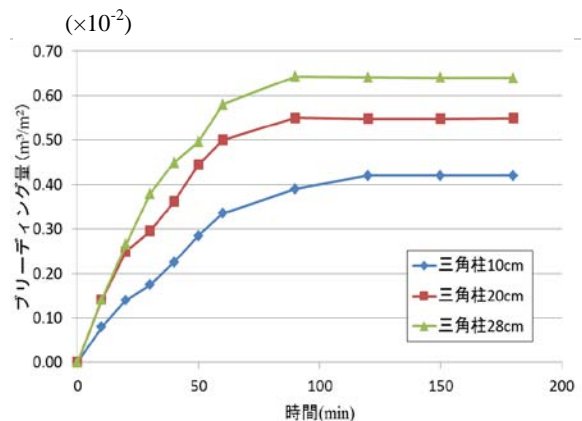


図-4 ブリーディング試験結果 (三角柱)

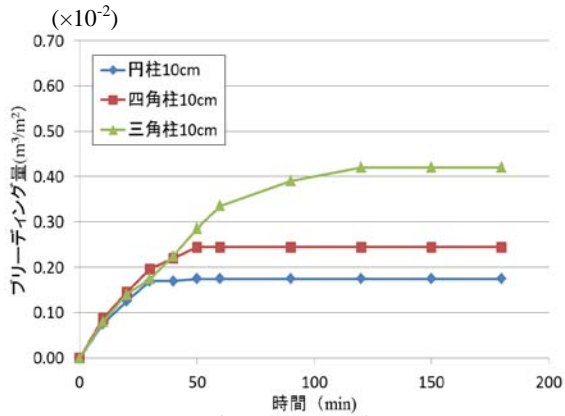


図-5 ブリーディング試験結果
(打込み高さ 10cm)

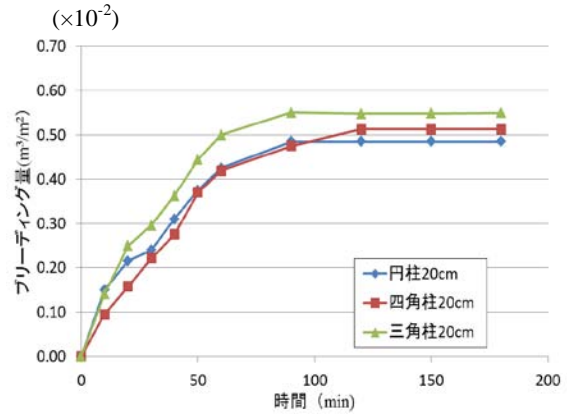


図-6 ブリーディング試験結果
(打込み高さ 20cm)

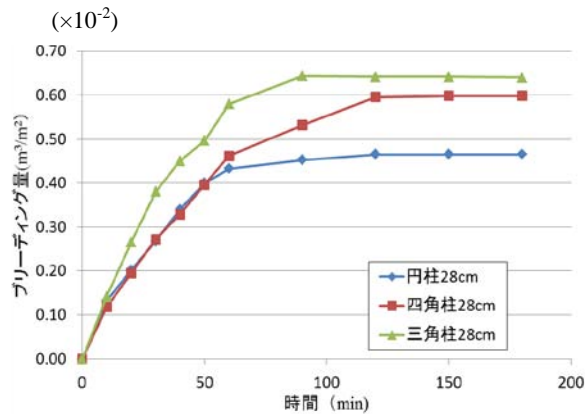


図-7 ブリーディング試験結果
(打込み高さ 28cm)

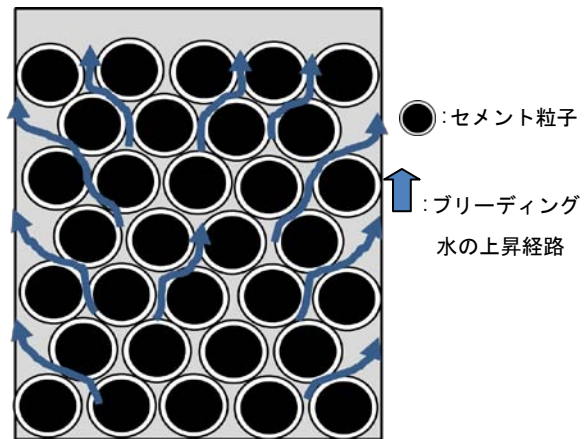


図-8 ブリーディング水上昇過程のモデル

ものの、差は僅かだった。四角柱および三角柱の型枠を用いた場合には、その挙動が明確に現れていたが、円柱の型枠を用いた場合の結果では、打込み高さが 20cm および 28cm の場合で、最終ブリーディング量に大きな差はなかった。

(2) 型枠形状の影響

図-5、図-6 および図-7 は型枠形状を変化させた場合のセメントペーストのブリーディング試験結果を示している。

図から、ブリーディング初期段階での発生速度に関して、円柱および四角柱に関してはほとんど同じであったが、三角柱の場合では打込み高さが大きくなるにつれて、傾きが大きくなっている傾向が見られた。また、最終ブリーディング量を比較すると、円柱、四角柱および三角柱の順に大きくなる傾向が見られた。

型枠形状によるブリーディング量の相違が発生する理由について、本実験では同水セメント比のセメントペーストによる実験であり、使用材料の相違はないため、型枠条件の影響が大きいと考えられる。ここで、型枠条件の違いについて検討を行う。

ブリーディング水のような浸透流は、粒子間をもっと

も通過しやすい経路を選択して上昇していくため、セメントペーストから生じるブリーディング水は図-8 のようにセメントペースト内部のみならず、型枠の側面との境界部分を通してしながら上昇していくことが考えられる⁷⁾。また、ペースト内部では粒子がブリーディング水の上昇を妨げることが予想されるため、ブリーディング水にとって通りやすい型枠との界面が主な上昇経路であると考えられる。以上のことから、各打込み高さに対して、型枠側面にペーストが接する面積を算出すると表-1 となる。これを見ると、円柱、四角柱、三角柱の順に、ペーストに接する型枠側面の面積が増加していることがわかる。型枠側面の面積と最終ブリーディング量との関係は図-9 のようになり、同じ打込み高さで比較した場合、ペーストに接する型枠側面の面積が増加するに従って、最終ブリーディング量が増加する傾向にあることがわかる。また、型枠界面からブリーディング水が上昇しやすいことを考慮すると、本実験で用いた3種類の型枠の最終ブリーディング量が異なっている理由について説明可能となる。図-10 に本実験で使用した型枠の断面形状を示す。ブリーディング水が型枠側面から上昇しやすいことを考えると、もっとも型枠界面から距離が

表-1 型枠側面積 (打込み高さ)

	打込み高さ		
	10cm	20cm	28cm
円柱	471	942	1319
四角柱	516	1032	1445
三角柱	585	1170	1638

(単位:cm²)

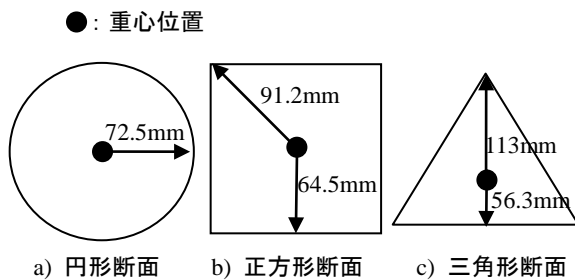


図-10 断面形状と重心位置

遠い地点として、各断面の重心を考える。今、重心部分に存在するブリーディング水を仮想的に考えると、重心地点から型枠界面に到達する水平距離が最も短いものは、三角柱となり、続いて四角柱、円柱という順番に距離が長くなる。この順番は最終ブリーディング量が多い順番である。以上の結果から、最終ブリーディング量は型枠内部に存在するペーストの量が各打込み高さで一定だったとしても、ペーストが接する側面積が大きく、かつ型枠断面形状の重心位置から型枠側面までの最短距離が短いほど大きくなると考えられる。

(3) 粉体種類の影響

図-11は、フライアッシュのペーストでブリーディング試験を行った結果である。グラフにはセメントを用いた場合の結果も併記してある。なお、型枠は3種類全てを用いた場合であり、打込み高さは28cmの時の結果である。セメントペーストの場合は、型枠によらず、ブリーディング試験開始からおよそ150分の段階でブリーディング水の上昇が終了し、一定値となった。これに対して、フライアッシュペーストを用いた場合は、すべての型枠で試験開始から360分まで、ブリーディング水が継続して発生した。このようにブリーディング発生速度の相違が生まれる理由として、セメントの場合、粒子の沈降と共に水和反応が生じることで、セメント粒子間にブリーディング水が取り込まれているためだと考えられる。対して、フライアッシュでは水和反応は生じずにブリーディング水は粒子の沈降と共に上昇するものと考えられる。また、フライアッシュペーストに関しては、

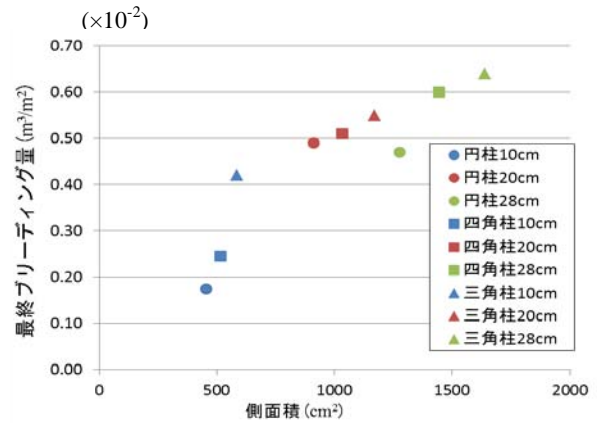


図-9 最終ブリーディング量と型枠側面積との関係

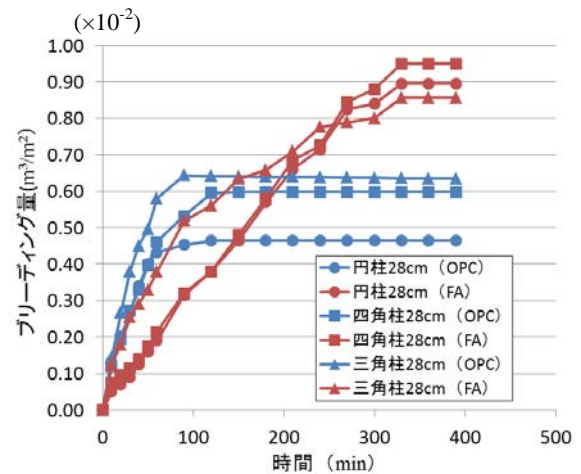


図-11 ブリーディング試験結果(粉体)

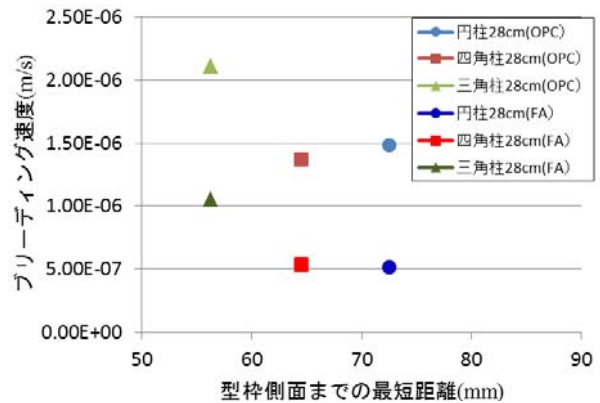


図-12 ブリーディング速度と型枠側面までの最短距離との関係

最終ブリーディング量に型枠形状の違いがほとんどなく、セメントペーストでみられた型枠形状の影響が見られなかった。ブリーディング水が上昇する速度は、セメントに対してフライアッシュの方が小さかったが、初期のブリーディング速度に関しては、大きさこそ違うものの三角柱のみ大きくなるという傾向がフライアッシュの場合でも見られた。図-12は、後述する実験結果から算出したブリーディング速度と重心から型枠側面までの最短距離の関係を示したグラフである。図より、セメ

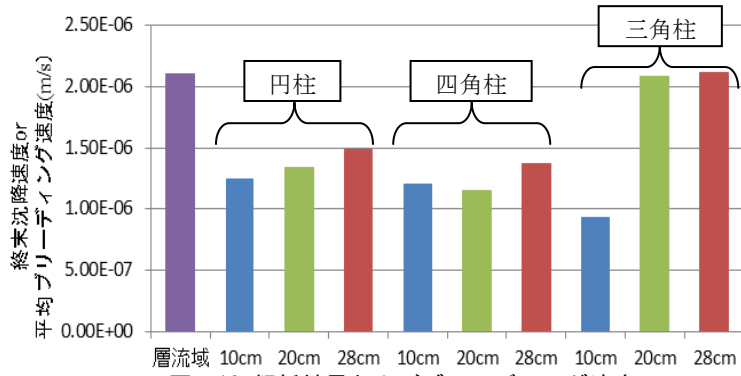


図-13 解析結果およびブリーディング速度
(セメントペースト)

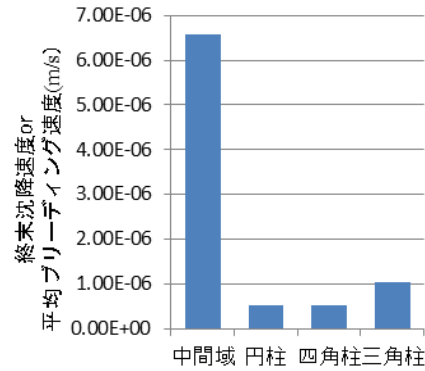


図-14 解析結果およびブリーディング速度
(打込み高さ 28cm, フライアッシュ)

ントおよびフライアッシュの両方において、重心から型枠側面までの最短距離が長くなるとブリーディング速度が減少する傾向にあった。また、距離が 60mm より大きくなるとブリーディング速度はほぼ一定となることがわかる。これは、ペースト内部から型枠側面に向かってブリーディング水が発生することを意味しており、また、ブリーディング速度が上昇するのは、断面重心から型枠側面までの距離がおよそ 60mm までであると考えられる。すなわち、ブリーディング速度に関して、型枠側面の影響を多く受ける可能性が示された。

3. 粉体の沈降現象とブリーディング現象

粉体工学の観点から見ると、セメントペーストは高濃度懸濁液として捉えることが可能であり、材料分離は液体中に懸濁している粒子群が沈降現象によって分離することに他ならない。ここでは、実験で使用したペーストのブリーディング現象を粉体工学上の沈降現象と捉え、解析的な検討を行う。

一般的に、広い静止流体中で 1 個の粒子が他の粒子からの影響を受けずに自由沈降する時、その運動方程式は、粒子に作用する重力、浮力並びに抵抗力を考えることで立式される。この運動方程式から算出された終末沈降速度算定式は、粒子レイノルズ数によって以下の 3 つの領域に分けられる。

$$u_t = \frac{x^2(\rho_p - \rho_f)g}{18\mu_f} \quad (R_{ep} \leq 2) \quad (1)$$

$$u_t = \left\{ \frac{4}{225} \frac{(\rho_p - \rho_f)^2 g^2}{\rho_f \mu_f} \right\}^{\frac{1}{3}} x \quad (2 \leq R_{ep} < 500) \quad (2)$$

$$u_t = \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_f)g}{0.33\rho_f}} x \quad (500 \leq R_{ep} < 10^5) \quad (3)$$

ここで、 x : 粒子直径 (m) , ρ_p : 粒子密度 (kg/m^3) , ρ_f : 流体密度 (kg/m^3) , g : 重力加速度 (m/s^2) , μ_f :

表-2 解析に用いた値

粉体種類	C	FA
粒子直径: x (m)	6.57×10^{-6}	1.12×10^{-6}
粒子密度: ρ_p (kg/m^3)	3150	2280
流体密度: ρ_f (kg/m^3)	998.2	
重力加速度: g (m/s^2)	9.806	
流体粘度: μ_f ($Pa \cdot s$)	0.001002	
空隙率*: ε (-)	0.50	

*空隙率として仮定
流体粘度 ($Pa \cdot s$) , u_t : 終末沈降速度 (m/s) , R_{ep} : 粒子レイノルズ数である。なお、上記 3 つの状態は、式(1)が層流域 (ストークス域) , 式(2)が中間域 (アレン域) , 式(3)が乱流域 (ニュートン域) となる⁸⁾。なお、本実験では粒子レイノルズ数の測定は行っていないため、3 つの領域それぞれの解析結果から検討を行う。また、式(1)から式(3)は、前述したとおり 1 個の粒子がほかの粒子から影響を受けずに自由沈降する場合を想定している。これに対して、実際のペーストは粒子濃度がかなり大きく、粒子は互いに影響を及ぼし合いながら干渉沈降し、沈降速度は自由沈降の場合より小さくなる。この場合の沈降速度を u_h (m/s) とすると、粒子群の空間部分の容積濃度として定義される空隙率 ε (-) の関数となり、次式で表すことができる⁸⁾。

$$u_h = \frac{u_t}{F(\varepsilon)} \quad (4)$$

この時の $F(\varepsilon)$ は空隙率関数と定義され、白井⁹⁾の示した次式を用いる。

$$F(\varepsilon) = \frac{6(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (0.3 < \varepsilon \leq 0.7) \quad (5)$$

セメントおよびフライアッシュペースト内の粉体粒子の空隙率を測定することは今後の課題ではあるが、本研究では便宜的にセメント粒子の空隙率 (=100 - 実積率) として解釈し、50%として仮定して検討を行う。

表-2 に本解析に用いた各数値を示す。なお、セメントの粒子直径は既往の研究¹⁰⁾から練混ぜ後のペースト

(W/C=50%)の平均粒径として測定した値を用いることとした。フライアッシュについては、密度ならびにブレン比表面積より算出した。

図-13 および図-14 は、セメントならびにフライアッシュの終末沈降速度と各型枠で行ったブリーディング試験結果から算出したブリーディング速度を示している。ブリーディング速度に関しては既往の研究⁸⁾を参考に、最終ブリーディング量の50%に相当する量を経過時間で除した値として平均ブリーディング速度を算出した。また、中間域および乱流域の算定結果は、セメントの場合、それぞれ 5.46×10^{-5} (m/s) および 8.55×10^{-4} (m/s) となり、フライアッシュの場合、層流域および乱流域の算定結果がそれぞれ 3.64×10^{-8} (m/s) および 2.72×10^{-4} (m/s) と実験より算出したブリーディング速度と1~2 オーダーの違いが見られたため図化していない。

図より、セメントペーストでは層流域、フライアッシュは中間域での粒子沈降速度が最もブリーディング速度に近いという結果となった。これは、理論上の沈降速度算出に用いる値に関して、フライアッシュの場合、粒子密度ならびに粒子直径がセメントよりも小さくなるため、計算上3つの領域で速度のオーダーが下がったため、中間域に近くなったと考えられ、実際はフライアッシュにおいても層流域である可能性が考えられる。これには、本検討ではセメントの空隙率を用いているために、フライアッシュの適切な空隙率の算出を行う必要があると考えられる。以上の検討は、粒子の沈降速度をブリーディング水としてペースト内部から上昇する水の速度として評価できる可能性があることを示している。しかし、本解析では、粉体粒子の単純な沈降速度を基にブリーディング水の発生速度の検討を行ったものであるため、粉体が沈降した結果生じたブリーディング水がペースト内部から生じたものか、型枠界面から生じたものかという評価をすることはできなかった。また、実現象を考慮すると、セメントの場合では水和反応による粉体性質の変化を考慮する必要がある。また、本検討で解析に用いた数値には、仮定としたものが多く、多粒子系の沈降速度として算出する際の空隙率関数 $F(\epsilon)$ の選定およびセメント粒子の空隙率の測定によって、予測精度が向上することが考えられる。

4. まとめ

ブリーディング水の挙動について、ペーストを用いた試験から検討した結果、以下のことがわかった。

(1)型枠形状によってブリーディング水の発生パターンに違いが見られた。これは型枠断面の重心位置から型枠側面までの最短距離の大きさによって異なることがわかった。

(2)フライアッシュペーストおよびセメントペーストのブリーディング水は同じ水粉体比であっても水和反応の有無ならびに沈降速度の違いから、発生量ならびに速度に大きな違いが見られた。

(3) ブリーディング水の時間当りの発生量(速度)は、粉体粒子の静止流体中における沈降速度として評価可能であることが示された。

以上のペーストを用いた実験から、コンクリート中から生じるブリーディング水は、型枠側面の影響を受けることが考えられる。すなわち、コンクリートのブリーディング水を考える際に、内部から打込み面へと上昇する場合と型枠側面へ到達してから上昇する場合に分けて検討を行う必要があると考えられる。

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) 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
- 2) 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, 2011.7
- 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) 十和田知三: コンクリートの引張異方性におよぼす調査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
- 5) 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, 1990.7
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 粉体工学会編: 粉体工学叢書4「液相中の粒子分散・凝集と分離操作」, 日刊工業新聞社, pp.124-126, 2010
- 9) 白井隆: 「流動層」, 科学技術社, pp. 112, 1958
- 10) 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, No.592, V-39, pp.121-129, 1998.5