

論文 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

三田 勝也*1・加藤 佳孝*2

要旨：コンクリート表層部に生じる品質低下領域は、材料分離現象によって生じるブリーディング水が原因となって発生する可能性がある。しかしながら、そのようなブリーディング水の挙動について、未だ発生機構の解明ならびに定量的な評価に至っていないのが現状である。本研究では、型枠形状は一定で、底面寸法を変化させることによって、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実験を行った。その結果、底面寸法によってブリーディング水の発生量に差があること、粉体粒子の沈降現象ならびに型枠内の粒子の堆積構造によってブリーディング水を評価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、粉粒体、沈降、充填率

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の表層品質を定量的に評価する検討がなされており¹⁾、その中でも特に、養生による効果について多くの研究がなされている²⁾。しかし、コンクリートが打込まれてから硬化するまでの間で、すでに表層部の品質が低下しているならば、養生に期待される効果は十分に発揮されないと考えられる。

コンクリートを適切に施工することに関しては、未だ経験的な部分が多く、コンクリートの施工と構造物の品質に関する知見がほとんどないと思われる。特に近年のコンクリート配合は、単位水量が多く、ワーカビリティとコンクリート品質が両立されていないと考えられる。単位水量が多いコンクリートは材料分離が生じやすくなっており、材料分離によって発生するブリーディング水は、コンクリート構造物の表層部の品質を低下させる可能性がある。この点を検討するために、筆者らはこれまでに、ブリーディング水が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）が発生することおよび、目視確認できない場合であっても、物質透過性が高くなることを明かとしている^{3),4)}。

このことから、コンクリート構造物の維持管理の観点で、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る。

ブリーディング水の挙動に関しては、これまでにいくつかの検討がなされているが^{5),6),7)}、共通して言及されているのは、ブリーディング水の挙動は、対象とするコンクリートの内部を通過して、打込み面に生じる場合と、型枠側面との界面を通過して上昇する場合に大別されることである。現状としては、このように、定性的な検討のみがなされている。そのために筆者らはセメントペース

トを用いた実験で、ブリーディング現象を単純化して捉えて検討を行った⁸⁾。実施工ではJIS制定のブリーディング試験と違い、多様な形状の型枠が使われている。そこで型枠形状が、ブリーディング水の総量に及ぼす影響を検討した。その結果、ペーストと型枠が接する側面積によって最終的に測定されるブリーディング水量に差があることがわかった。すなわち、型枠界面から上昇するブリーディング水にペーストと接する側面積が影響する可能性を示せた。しかし、この検討では、型枠の底面積を一定として、底面積あたりのブリーディング量が同じになるように設定し、形状変化の影響のみを検討した。そこで本研究では型枠は同一形状のものを用いて、底面の寸法を変化させることで、底面積の変化がブリーディ

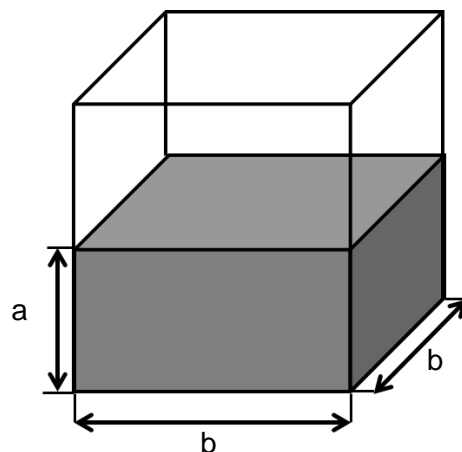


図-1 型枠形状

表-1 実験水準

	寸法(cm)
a	10,20,30
b	1,5,10,15,20,25,30

※1 東京理科大学 工学部土木工学科 助教 博士(工学) (正会員)

※2 東京理科大学 工学部土木工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

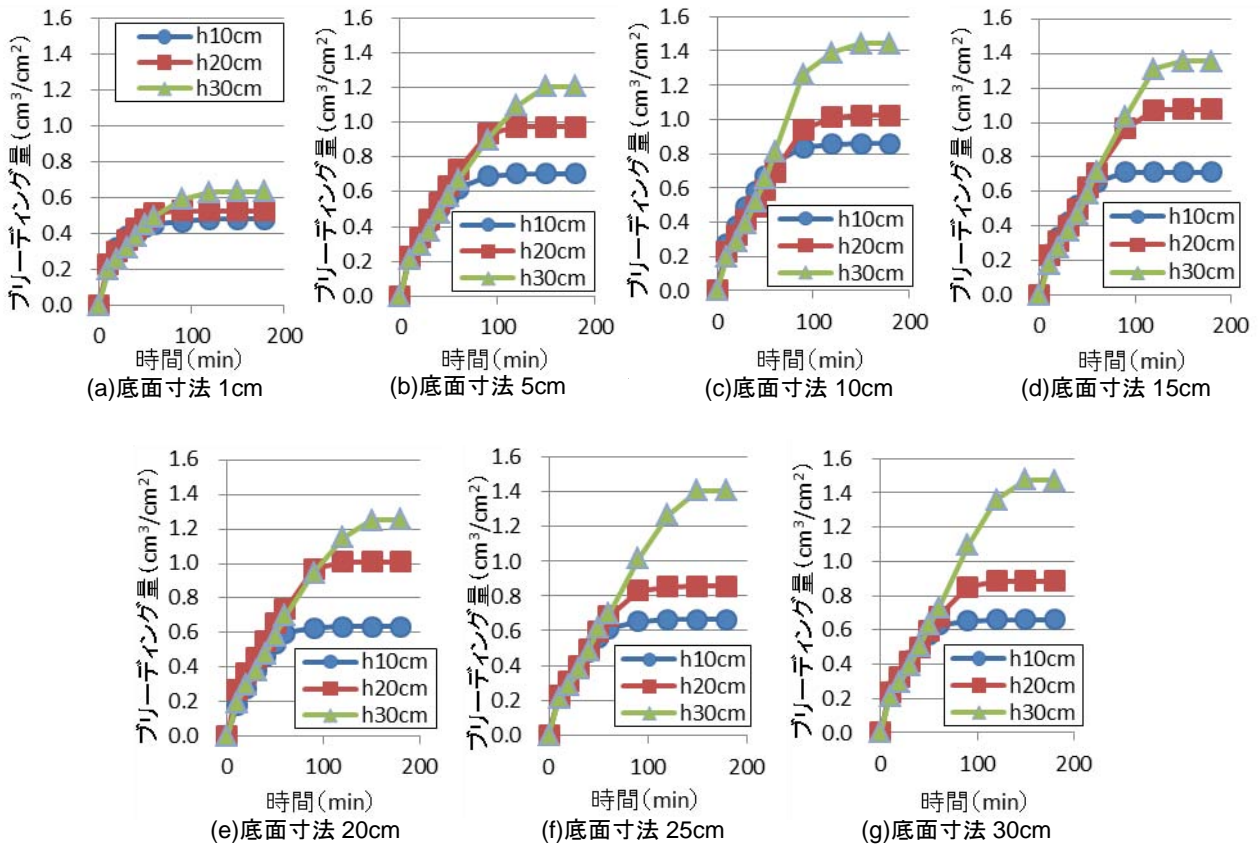


図-2 ブリーディング試験結果（打込み高さの影響）

ング水に与える影響を検討するものとする。

2. 型枠寸法と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/cm^3 、ブレン比表面積： $3440\text{cm}^2/\text{g}$ ）である。試験はペーストを用いて行い、配合は水粉体比55%とした。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、フロー試験はペースト作製の度に測定を行った。その結果、フロー値は $291 \pm 5\text{mm}$ の範囲であった。

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。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

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立方体とした。実験

水準は型枠の底面寸法ならびに打込み高さであり、表-1に示す通りである。なお、型枠の底面寸法は、内寸である。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

各四角柱型枠で行ったブリーディング試験の結果を図-2に示す。なお、打込み高さを10cm、20cmおよび30cmの3種類に変化させた結果を併記している。

底面寸法を変化させたすべての型枠において、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った。また、各底面寸法で経過時間毎のブリーディング水量の変化をみると、最終ブリーディング量付近までのブリーディング量の増加する割合は、ほぼ同じ傾向で増加していることがわかる。これは型枠の底面寸法が異なった場合であっても、同様の傾向であった。このことから、セメントペーストのブリーディング挙動に関して、打込み高さの影響は最終的なブリーディング量に関係しており、ブリーディング速度に関しては、ほ

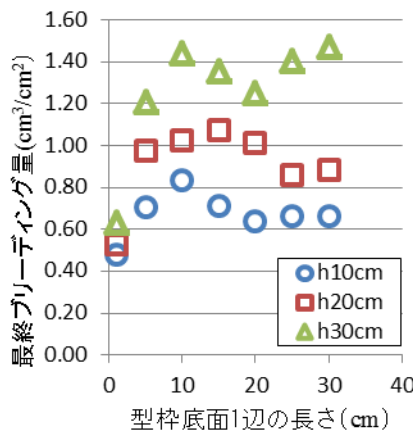


図-3 最終ブリーディング量と型枠底面1辺の長さの関係

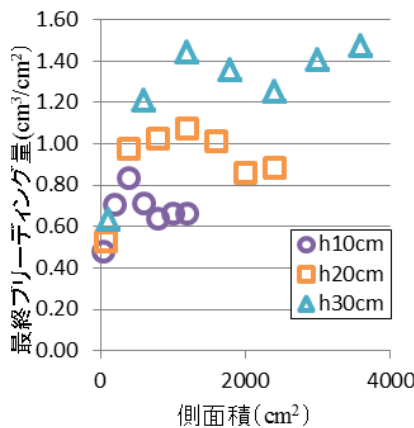


図-4 最終ブリーディング量とペーストが接する側面積との関係

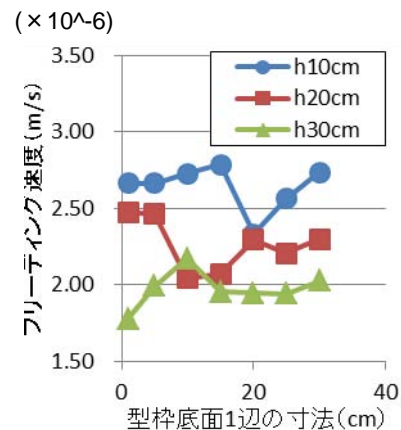


図-5 各底面寸法に対するブリーディング速度

ば一定になると考えられる。

(2) 底面寸法の影響

図-3は各打込み高さで底面寸法を変えた場合の最終ブリーディング量と底面1辺の長さとの関係である。なお、本検討では型枠寸法の代表的な値として底面1辺の長さを用いた。図から、全ての打込み高さにおいて、底面1辺の長さが10cmあるいは15cmまでは最終ブリーディング量が増加する傾向にあった。打込み高さ10cmでは、最終ブリーディング量が底面寸法10cm以降で低下し一定値になった。打込み高さ20cmでは、最終ブリーディング量が底面寸法15cmから低下し一定値になった。打込み高さ30cmでは、底面寸法10cm以降で最終ブリーディング量が低下する傾向にあった。

前報⁸⁾で、型枠形状を変えた場合のブリーディング水の挙動を検討した際に、セメントペーストが接する型枠の側面積が大きくなると、最終ブリーディング量が大きくなる傾向を示していた。本実験の場合、型枠側面積との関係を整理すると図-4のようになる。図から、全体的な傾向として、側面積の増加に伴い、ある程度までは最終ブリーディング量も増加しており、打込み高さ毎に最終ブリーディング量に変化が生じる側面積が異なっている。また、同じ側面積を持っている場合であっても、打込み高さが高い方は最終ブリーディング量が多かった。つまり、打込み高さが異なっている場合は側面積が同じであっても、打込み高さの大小で最終ブリーディング量が決定されると考えられる。

図-5は、各底面寸法の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打込み高さ毎に示している。なお、ブリーディング速度に関しては既往の研究⁹⁾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。図より、実験結果から算出されたブリーディング速度は、打込み高さによって差があ

表-2 解析に用いた値

粉体種類	C
粒子直径: x (m)	6.57×10^{-6}
粒子密度: ρ_p (kg/m ³)	3150
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 · s)	0.001002
空隙率*: ε (-)	0.50

*空隙率として仮定

り、概ね打込み高さが高くなる程、速度は減少する傾向にあった。また、底面寸法で見ると、打込み高さ10cmでは底面寸法が15cm、打込み高さ20cmでは底面寸法5cm、打込み高さ30cmでは底面寸法10cmまでブリーディング速度が上昇する傾向にあった。

3. 型枠界面を考慮したブリーディング水の発生機構

ペーストを用いたブリーディング試験の状況観察から、打込み直後のペースト高さと、試験終了後の最終ブリーディング水量およびその時点のペースト高さの和はほぼ同じである。このことから、ペーストのブリーディング現象は水が上昇するのではなく、セメント粒子が沈降・堆積した結果生じる上澄み水として捉えることが妥当だと考える。これを踏まえ、本章では、粉体の沈降・堆積の観点からブリーディング現象を検討する。

3.1 セメント粒子の沈降挙動

これまでに粉体工学の観点から検討した結果⁸⁾、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ることがわかった。このことから、既報⁸⁾と同様にペースト中のセメント粒子の沈降現象を検討する。

これまでの検討から⁸⁾、型枠静置後のセメントペーストの沈降挙動は層流域の沈降速度と近似していることがわかっているため、本実験においても層流域として、

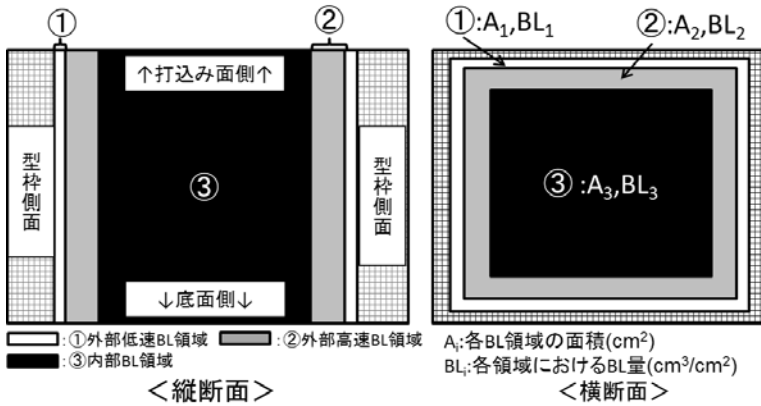


図-6 型枠界面を考慮したブリーディング水発生モデル

算出する。高濃度における粒子間干渉を考慮した層流域の終末沈降速度式は、以下の通りである。

$$u_h = \frac{u_t}{F(\varepsilon)} \quad (1)$$

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

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

ここで、 x : 粒子直径(m), ρ_p : 粒子密度(kg/m³), ρ_f : 流体密度(kg/m³), g : 重力加速度(m/s²), μ_f : 流体粘度(Pa・s), u_t : 終末沈降速度(m/s), R_{ep} : 粒子レイノルズ数である。

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⁹⁾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。算出したセメント粒子の終末沈降速度は 2.10×10^{-6} (m/s) となり、図-5 における各底面寸法の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と比較すると、絶対値としては差があるものの、オーダーは同じ結果となっていた。本検討は、セメント粒子の物性値を基に単一粒径の粒子が平均的に沈降した場合を想定している。検討結果と実験値に差が生じた理由としては、単純な沈降現象ではブリーディング現象を説明することはできないということであり、型枠壁面の影響を表現できていないと考えられる。

3.2 型枠界面におけるブリーディング水のモデル化

平均的な沈降現象では、型枠界面のブリーディング水の挙動を表現することはできなかった。型枠界面の影響を定量的に評価するために、最終ブリーディング量をモデル化することを試みる。図-3 の最終ブリーディング量の結果から、ペースト内部には発生するブリーディング量(以下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ブリーディング量が少ない領域(外部低

表-3 打込み高さ別 BL 量および領域面積

打込み高さ	BL 量(cm ³ /cm ²)		
	10cm	20cm	30cm
BL ₁	0.48	0.53	0.63
BL ₂	0.90	1.20	1.60
BL ₃	0.50	0.60	1.30
領域①	0.5cm		
領域②	3.0cm	4.5cm	3.0cm

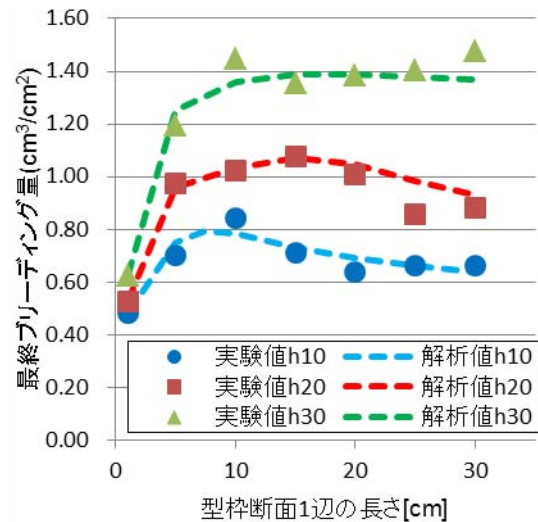


図-7 実験値および解析値の比較

速BL量), ②型枠界面から僅かに内部に存在し, 最もブリーディング量が多い領域(外部高速BL量), ③型枠の影響を受けずにペースト内部から上昇するブリーディング量(内部BL量)の3つである。これをモデル化すると図-6 のようになる。各領域面積およびBL量をそれぞれ A_i および BL_i ($i=1\sim 3$) とすると, 断面全体としてのBL量は以下の式(4)のように記述できる。

$$BL = \sum \frac{BL_i \cdot A_i}{A_i} \quad (i=1,2,3) \quad (4)$$

各打込み高さで3層のBL量並びに領域面積を算出すると表-3 のようになる。各BL量ならびに領域面積は, 底面寸法1cmの時, 領域②および③は存在せずに①の領域のみが寄与し, 3つの領域のBL量の大きさは $BL_1 < BL_3 < BL_2$ であると仮定した。各領域は, 型枠側面からの距離を基に, 底面寸法1cmの時に領域①のみが寄与していることから, 型枠界面より0.5cmまでが領域①として固定した。以上の仮定を基に, BL_2 および BL_3 を0.1 (cm³/cm²) ずつ, 領域②を0.5cmずつ変化させ, 実験値との残差の平方和が最初となる組み合わせを選択した。なお, 領域③に関しては, 型枠側面から領域①+領域②分内部に存在することになり, 底面寸法および打込み高

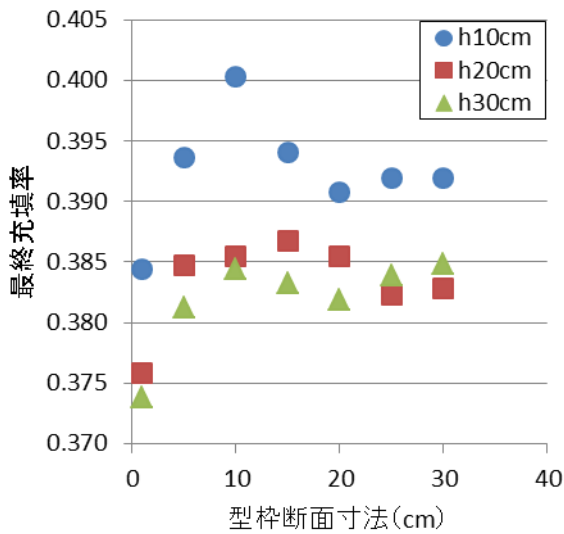


図-8 各底面寸法に対する最終充填率との関係

さによって変動するため、表には記載していない。実験値との比較を図-7に示す。算出結果を比較すると、概ね実験値の傾向を再現できていると考えられる。すなわち、最終ブリーディング量は型枠界面の影響を受けた領域とペースト内部から生じる領域との平均的な量として生じると考えられる。

3.3 セメント粒子の堆積構造

セメントペーストのブリーディング現象について、本節では粒子の液中での物理的現象として検討する。型枠内では、物理現象としてセメント粒子の沈降が生じていると考えられることから、沈降の結果として生じる、セメント粒子の型枠内への堆積構造を考える。これはブリーディング水が間隙を通過しながらセメント粒子が沈降すること、すなわちブリーディング水の通過しやすい経路の検討に繋がると考えられる。

椿ら¹⁰⁾は、スラリー中の粒子の充填性を可能な限り短時間で評価するための簡便な技術として、粒子の沈降過程で容器底部の液圧を測定する手法を提案している。

本実験では、液圧の測定を行っていないため、最終ブリーディング量をペースト界面の最終沈降深さとして、堆積層の最終充填率を式(4)より算出した。

$$\phi = \frac{m}{\rho_p V} \quad (4)$$

ここで、 m ：充填された粉体質量(kg)、 ρ_p ：粒子密度(kg/m³)、 V ：粉体層の見かけ体積(m³)である。

本実験で用いた型枠底面の寸法と最終充填率との関係を図-8に示す。算定結果から、最終充填率と型枠底面寸法との関係をみると、最終ブリーディング量と型枠底面寸法との関係と同じ傾向を示していた。しかしながら、打込み高さ毎の変化を見ると、最も打込み高さが小さい10cmの時に最終充填率は最も大きくなっていた。椿らに

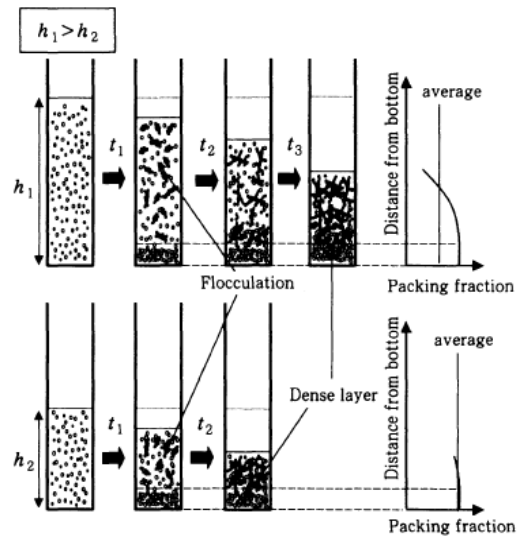


図-9 充填率に及ぼす初期高さの影響¹¹⁾

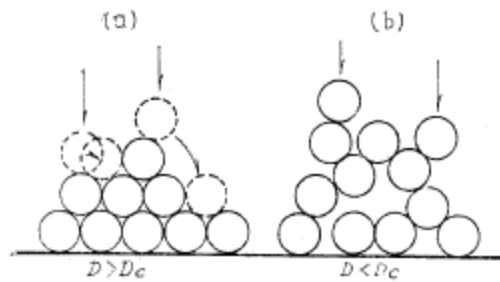


図-10 粒子堆積構造のモデル¹²⁾

よれば、沈降開始直後の容器内では、どの打込み高さに対しても、粒子は分散状態から沈降を開始する。その後、粒子は凝集して、凝集体単位で沈降し、堆積層が形成されると考えられる。打込み高さが高くなることは、沈降にかかる時間が長くなるということであり、その分沈降している凝集体の割合が多くなる。その結果、図-9¹¹⁾に示すように打込み高さが大きい方が堆積層に凝集体の占める割合が大きくなり、堆積層全体の平均充填率が減少すると考えられる。充填率の減少は、空隙率の増加を意味する。これは空隙を通過するブリーディング水量の増加に繋がると考えられる。実際に実験値を見ると、同じ底面寸法では、打込み高さが高くなるとともに、最終ブリーディング量が大きくなっている。また、ブリーディング水発生モデルから算出された3つの領域のBL量を見ると、全ての領域で打込み高さが増えると共にBL量は増加している。特に、打込み高さ20cmから30cmになるとBL₃の増加量が著しい。算出されたBL量は高さ方向全域の平均的なBL量であること考慮すると、打込み高さが高くなるにつれ、打込み面方向へ空隙が多く存在すると考えられる。次に底面寸法に対する影響を検討する。液中で凝集を生じた粉体は、一次粒子から二次粒子へと変化する。つまり、見かけ上粒径が大きくなる。粒子が

沈降し、堆積していく過程で生じる堆積層について、荒川¹²⁾は、図-10のようにモデル化している。この分類は粒子径と凝集力に関係している。粉体が堆積する過程で粒子間に作用する凝集力に比べて粒子が十分に重ければ(a)のように転がり落ちて一番安定な位置に落ち着くため、常に一定の密充填構造を形成するが、粒子が小さくなり軽くなると、粒子間の凝集力によって支持されて、(b)のように空隙に富む構造となる。この堆積構造の違いは粉体の限界粒子径によって決定される。限界粒子径とは粒子間凝集力と重力が釣りあう粒子径であり、ブリーディング現象を粒子の沈降と捉える場合、沈降の過程で生じる凝集の構造や割合によって決定されると考えられる。本実験で、底面寸法によって最終ブリーディング量に差が生じた理由として、図-8のように最終充填率に差が生じていることから、堆積構造が異なっているためであると考えられる。特に壁面近傍の堆積構造が原因と考えられる。表-3において、すべての打込み高さで、領域③より領域②の方がBL量は多くなることから、壁面近傍ではブリーディング水が移動しやすい空間に富む構造となっていることが考えられる。以上の堆積構造の違いから、型枠界面におけるブリーディング水の発生量に違いが生じると考えられる。本実験では、凝集力や正確な粒子径ならびに充填構造を測定できていないため、今後の検討課題である。

4.まとめ

ブリーディング水の挙動について、型枠底面寸法を変化させた型枠を用いて、ペーストを用いた試験から検討した結果、以下の知見を得た。

- (1)セメントペーストの打込み高さが高くなると最終ブリーディング水量が大きくなる傾向にある。
- (2)型枠底面寸法が変化することで、最終ブリーディング水量に変化が見られた。本実験の範囲では底面寸法が10cmもしくは15cmまでは増加する傾向にあり、それ以降はほぼ一定値になるか、減少する傾向にあった。
- (3)型枠界面近傍において、ブリーディング量の異なる層が存在すると仮定し、ブリーディング現象を3つの領域から生じる異なるブリーディング量の平均的な量として表現できることを示せた。この領域が生じる理由として、セメント粒子の堆積構造による可能性が高い。

今後の課題として、モルタルならびにコンクリートのようにセメントペーストに比べて粒度の幅が広くなり、型枠内の充填率が大きくなるような場合であっても、上記モデルが適用可能であるか検討する必要がある。

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) (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，2012.7
- 2) 家辺麻里子，秋山仁志，蔵重勲，岸利治：表層透気試験による養生条件を変化させた中規模柱試験体の表層品質詳細把握，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.659-664，2011.7
- 3) 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
- 4) 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
- 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) 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，Vol.34，No.1，pp.1198-1203，2012.7
- 9) 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
- 10) 椿淳一郎，久納聖史，稲嶺育恵，宮沢正徳：液圧測定による高濃度スラリーの沈降堆積過程の解析，粉体工学会誌，Vol.40，No.6，pp.432-437，2003.4
- 11) 森隆昌，伊藤誠，杉本理充，森英利，椿淳一郎：液圧測定によるスラリー評価-沈降挙動に及ぼすスラリー初期高さの影響-，粉体工学会誌，Vol.41，No.7，pp.522-528，2004.4
- 12) 荒川正文：粒子の付着・凝集性と粉体の性質—二三のモデル実験による考察—，粉体工学研究会誌，Vol.7，No.3，pp.209-219，1970