型枠界面に生じるブリーディング水の挙動に関する実験的検討

三田 勝也¹・加藤 佳孝²

¹正会員 佐賀大学助教 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地)

E-mail: mita@cc.saga-u.ac.jp

²正会員 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: katoyosh@rs.tus.ac.jp

コンクリート表層部の品質低下は、型枠界面のブリーディング水が原因となる可能性があるが、その発生機構は十分な検討がなされていない。本研究はブリーディング水の発生機構の理解を目的とし、影響要因として、粉体種類、粉体濃度、打込み高さおよび配合を変化させて実験的に検討した。その結果、ブリーディング水の発生量の異なる領域が最低限3つ存在し、型枠面から0.5cm幅の領域でブリーディング水が最少で、そこから概ね3.0～4.0cm幅の領域で最も多かった。また、水和反応による熱対流や粉体濃度の変化による水の体積割合の変化が、各領域のブリーディング量を変化させる可能性があること、打込み高さの増加に伴い各領域のブリーディング量の増加割合は異なること、および骨材の存在によって領域間のブリーディング水の差が減少することが分かった。

Key Words : *bleeding water, powder concentration, hydration reaction, height of placing, mold dimensions, convection phenomenon*

1. はじめに

コンクリート構造物の外的な劣化因子はコンクリート表面から浸透することから、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行われている¹⁾。表層品質を低下させる要因の1つに、型枠との界面に生じるブリーディング水が考えられる²⁾。ブリーディング水は、コンクリート内部の粗骨材や鉄筋下面に滞留し、強度の異方性³⁾をはじめとしたRC構造物の品質低下をもたらし、上層部の水セメント比を上昇させること⁴⁾が知られている。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、その結果から砂すじなどの目視確認可能な欠陥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^{5,6)}。このことから、ブリーディング水の挙動を知ること、は、コンクリート構造物内部のみならず、表層品質の評価を行うために非常に有効であると考えられる。

ブリーディング水の挙動に関しては、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⁷⁾、骨材や混和剤の種類の影響を検討した研究⁸⁾、構成要素中の粉体に着目した研究⁹⁾、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^{10,11)}、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。

コンクリート構造物の表層品質低下には、型枠界面を上昇するブリーディング水が大きく影響する可能性がある。これまでに著者らは、型枠界面を上昇するブリーディング水に着目して、型枠断面形状が型枠界面のブリーディング水に及ぼす影響について検討した¹²⁾。その結果、ペーストと型枠が接する側面積が増加すると最終ブリーディング量も増加する傾向があり、同配合であっても、型枠界面として存在する領域の大小が、最終ブリーディング量に影響を及ぼすことを明らかにしたが、そのメカニズムを定量的に理解するまでには至っていない。

本研究では、ブリーディング水の発生機構を明らかにすることを目的とした。ブリーディング水の発生に影響する要因として、内部試料の性質と試料容積に着目し、

図-1 型枠形状

表-1 実験水準

W/C (%)	a:打込み高さ (cm)	b:底面寸法 (cm)
55	10,20,30	1,5,10,15,20,25,30
65	10	1,10,30
85	10	1,10,30
100	10	1,10,30
LS	10,20,30	1,10,30

使用材料, 配合, 底面寸法および打込み高さを変化させて, 発生するブリーディング水量を測定した. 得られた結果から, 型枠界面および内部から生じるブリーディング水の発生領域を定量的に評価した.

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

本実験では, ペーストおよびモルタルを用いて検討した. 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, ペーストのブリーディング現象に影響を及ぼす要因としては, 粉末度⁷⁾, 水粉体比⁷⁾, 粉体種類⁹⁾, 水和反応¹³⁾, 試料容積¹²⁾等が考えられる. 本研究では, これらの要因のうち, 水粉体比, 水和反応および試料容積に着目し, 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を用いたペーストの配合は, W/C55, 65, 85, 100%とし, LSを用いたペーストは水粉体質量比を64%とした. これは, OPCペーストのW/C55%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, 0打フロー試験の結果は, 3回の平均値とした. 0打フロー値はW/Cの順に, 293mm, 398mm, 515mmおよび550mmとなった. LSでは470mmとなった.

図-2 領域分割 BL 試験概要

モルタルはOPCのみを用いた. 細骨材に富士川産川砂(以下S, 密度2.60g/cm³, 粗粒率2.74, 微粒分量1.0%)を使用した. 配合は, W/Cを55%で一定とし, S/Cを0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0および3.0と変化させた. ペーストの場合と同様に, フロー試験の結果は3回の平均値とした. モルタルの性状を考慮して, S/C=2.0および3.0では, 15打フローも実施した. 0打フロー値は, それぞれ326mm, 310mm, 298mm, 255mm, 188mm (263mm), 110mm (192mm)である. なお, 括弧内は15打フロー値の結果を示している.

(2) ブリーディング試験

ブリーディング (以下BL) 試験はJIS A 1123を参考に実施した. 本実験では, BL水の挙動を理解することを目的としたために, 通常のBL試験とは異なり, 各測定時間で打込み面に生じたBL水を取水することなく, 生じたBL水の高さを測定した. なお, 試験は3回実施し, 結果は3回の平均値とした.

(3) 使用型枠および練混ぜ方法

本実験では上記BL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. ペーストを用いた場合の型枠底面寸法ならびに打込み高さを表-1に示す. なお, 底面寸法は内寸である. モルタルの実験では, 打込み高さ10cmとして, 底面寸法は1, 5, 10および30cmのものとした. なお, S/C=2.0, 3.0は, 底面寸法1cmの型枠に試料が打ち込めなかったため, 検討から除外した.

ペーストは, 練混ぜ水をオムニ式ミキサーに投入後, 粉体を投入し1分間低速で練り混ぜ, かき落とした後, 高速で1分間練り混ぜて作製した. 所定の打込み高さまで1層で打ち込み後, 突き棒で5回締め固めた.

モルタルもオムニ式ミキサーを用いた. OPCおよび細骨材を投入し30秒練り混ぜてからかき落とし, 練混ぜ水

図-3 底面寸法と最終BL量との関係
(W/C55%, h10cm)

を投入して1分間練り混ぜた後にかき落とし、再度1分間練り混ぜた。所定の高さまで1層で打ち込んだ後、底面寸法1cm以外の型枠では、JIS A 1132を参考に、突き棒を用いて10cm²に1回の割合で締め固めた。

(4) 領域分割ブリーディング試験

型枠界面のBL水の発生状況を確認するための検証実験として、領域を分割したBL試験を実施した。試験概要を図-2に示す。底面寸法20cmの型枠を用いた。高さ10cmの亚克力製の仕切りを用いて、試料を打込んだ型枠から3.0cmの位置に設置し、仕切りの内部と外部に析出するBL水をそれぞれ取水した。なお、仕切りの位置は、3. (3) a)の実験結果から、BL量が最も析出する範囲である型枠面から0.5～4.0cmの範囲を含むように決定した。既往の研究を踏まえて¹²⁾、界面の影響を極力減らす目的で、試料上面から常に1.5cmの深さまで挿入するようにした。この検証実験では、スポイトを用いてBL水を採水しており、ペースト内部のBL水を吸引しているために、BL水の高さを測定する方法よりも多いBL量となることが考えられる。そのため本実験では、仕切りの内部と外部のBL量 (BLinおよびBLout) の比から、界面近傍のBL水の挙動を評価する。

3. 実験結果および考察

(1) 底面寸法の影響

図-3は、打込み高さ（以下 h ）10cm、OPCペースト、W/C55%の場合の底面寸法ごとの最終BL量との関係である。図から、底面寸法が10cmまでは最終BL量が増加し、底面寸法10cm以降で低下し、その後一定値となる傾向にあった。最終BL量は、断面積で正規化した物理量であるため、配合および打込み高さが一定であれば、底面寸法によって変化しないと考えられるが、実験結果から、

図-4 3層構造概念図

明らかに底面寸法の変化に伴い最終BL量に変化しており、BL水の発生は底面寸法の影響を受けると考えられる。型枠界面の領域が最終BL量に影響する場合、底面寸法の増加に伴い型枠界面領域の割合が減少するため、その影響度は低下すると考えられる。実験結果を見ると、底面寸法20cm以降は最終BL量の変化がほとんどなく、セメントペースト内部を上昇するBL量が支配的になっていると考えられる。そこで、底面寸法20cm以降を基準に底面寸法が小さい場合について考えると、底面寸法1cmでは約0.7倍の発生量、底面寸法10cmでは約1.3倍の発生量であった。このような最終BL量と底面寸法の関係を説明するためには、内部を上昇するBL水に加えて、単位面積当たりのBL量が内部を上昇するBL水に比べて少ない領域と、多い領域の2つの領域の存在が必要となる。

ここで、粉体を充填した容器（粉体充填層）の内部の流体の流れに対する検討¹⁴⁾を参考にすると、容器断面方向に流速分布が生じるとの報告がある。具体的な検討では、粉体充填層の空隙率が50%程度の場合、容器壁面から内部に向けて、低速、高速および平均的な速度領域に分類でき、空隙率が80%程度の場合は、低速は同様の傾向であるが、高速領域と平均的な速度領域の差は小さくなる。この粉体工学の既報と本研究の実験結果を基に考えると、単位面積当たりのBL量が異なる3つの領域が存

図-5 外部と内部に領域分割した BL 量
(W/C55%, $h=30\text{cm}$, 底面寸法 20cm)

図-6 3層構造によって計算した最終 BL 量と実験値との比較

表-2 各領域の BL 量および領域 2 の計算結果

BL 量 (cm³/cm²)			領域 2
BL ₁	BL ₂	BL ₃	
0.48	0.90	0.50	3.0cm

在すると仮定することができる (図-4参照)。3層はそれぞれ、領域1: 型枠界面に生じるBL水の発生が少ない領域 (以下, 発生量をBL₁)、領域2: 界面近傍にあるBL水の発生が多い領域 (以下, BL₂)、領域3: 領域1および領域2より内部にある平均的にBL水が生じる領域 (以下, BL₃) の3つである。以上のことから、以降の検討では、単位面積当たりのBL量が異なる3つの領域が存在するとの仮説に基づき考察を進める。

(2) 型枠界面を考慮した最終ブリーディング量算定手法

図-5は、上記仮定を検証するために実施した領域分割したBL試験の結果である。実験結果から、BL量は内部よりも外部の方が多い結果となった。実験では、仕切りを試料上面から1.5cmまで挿入しているため、仕切りが無い通常の場合とは厳密には異なるかもしれないが、実験結果から明らかに内部と外部のBL量は異なっており、前記したBL水の発生が多い領域が存在することは確かめられたと考える。

各領域の面積およびBL量をそれぞれ A_i (cm²)および BL_i ($i=1\sim3$) (cm³/cm²)とすると、断面全体としての最終BL量 (cm³/cm²)は式(1)のように記述できる。

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

式(1)を用いて、 $h=10\text{cm}$ を対象として、実験結果を再現するようなBL量および領域を計算する。底面寸法1cmの時、領域2および領域3は存在せずに領域1のみが寄与

図-7 底面寸法と最終 BL 量の関係 (粉体種類の影響)

表-3 各領域の BL 量および領域 2 の計算結果
(粉体種類の影響)

	BL 量 (cm³/cm²)			領域 2
	BL ₁	BL ₂	BL ₃	
OPC - W/C 55%	0.48	0.90	0.50	3.0
LS	2.14	2.43	2.35	3.0

し、3つの領域のBL量の大きさは $BL_1 < BL_3 < BL_2$ であると仮定して、各BL量および領域を算出した。各領域に関しては、前記した粉体工学の既往の検討を参考に、型枠界面からの距離で算出した。なお、これ以降領域を表現する数値は、領域の幅を示している。領域1に関しては、0.5cm以下となる可能性があるが、実験的に1cm以下の寸法での測定が困難なため、本研究ではすべての条件

で0.5cm一定とした。領域2については、底面寸法1cm以上から発生すると仮定し、領域3については、領域1および領域2が決定した段階で、残りの領域が領域3になると考えた。以上の仮定を基に、 BL_2 、 BL_3 および領域2を変化させ、実験値との残差の平方和が最小となる組み合わせを求めた。算出した結果を表-2に、実験結果との比較を図-6に示すが、実験値の傾向を再現できていることがわかる。

(3) 型枠界面を上昇するブリーディング水の挙動に及ぼす要因について

a) 粉体種類の影響

図-7は、OPC-W/C55%およびLSの最終BL量と底面寸法との関係である。同じ粉体濃度でも、水和反応を生じないと最終BL量は増加する結果となった。

LSの場合でも、3つの領域が存在するとして、BL量および領域2を算出した結果を表-3に示す。また、 BL_3 を基準とした BL_1 および BL_2 の比率も示している。計算の結果、すべての領域でLSを用いた場合は、OPC-W/C55%に比べてBL量が大きくなった。また、領域2は、OPC-W/C55%、LSともに3.0cmであったが、 BL_2/BL_3 は1.03となり、OPC-W/C55%に比べて非常に小さな値となった。

図-8に検証実験の結果を示す。左軸に内部と外部の最終BL量、右軸に内部と外部の最終BL量の比をプロットしている。OPC-W/C55%およびLS共に、内部より外部の最終BL量が大きくなる結果となった。比率はLSの方がOPC-W/C55%より1.0に近く、表-3の結果と同様な傾向を示している。

以上の結果から、粉体濃度が一定の場合、水和反応を生じない粉体では、水和反応を生じる場合よりも、BL量が多く発生し、 BL_2/BL_3 は1.0に近づき、領域2が明確に存在しなかった。以上を踏まえて、水和反応の影響を検討する。

本実験では、OPC-55%およびLSは、粉体濃度を36.6%に調整しているが、水和反応を生じているOPCでは、水和生成物による固体相増加の影響も考えられ、この結果、粉体体積が増加することで、BL水が移動可能な領域が減少した可能性が考えられる。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¹⁵⁾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¹⁶⁾を活用すると、水和率およびW/Cから水和生成物量（水和物とゲル空隙）を算出でき、水和率5%の場合の水和生成物量は、 $3.9 \times 10^2 \text{ cm}^3$ となる。これは粉体濃度で0.3%の変化であり、ブリーディング試験の間では、粉体濃度はほとんど変化がなく、初期の水和反応による固体相増加と型枠界面のBL量には影響がないと考えられる。

図-8 各粉体における外部と内部の最終BL量
($h=30\text{cm}$, 底面寸法 20cm)

図-9 領域分割BL試験の結果（粉体種類の変化）

図-9に、OPC-W/C55%とLSの検証実験のBL量の経時変化を示す。図より、OPC-W/C55%では60分付近からBLinとBLoutの差が生じ、120分でBL量がほぼ一定になっている。LSでは、90分付近からわずかにBLinとBLoutに差が生じ、360分付近でBL量がほぼ一定となっている。BLinおよびBLoutともに経過時間が120分まではLSよりもOPC-W/C55%の方が大きくなっていた。自然沈降では、粒子径が同じ場合、沈降速度は密度の影響を受ける。密度の小さいLSは沈降速度がOPC-W/C55%と比較して小さいため、120分までのBL量はOPC-W/C55%の方が大きくなったと考えられる。粉体粒子は、沈降後、堆積層を形成する。粒子間付着力が小さい粒子の場合、堆積層の体積が最密充填されるため小さく、粒子間付着力が大きい粒子の場合は綿状構造を持つために大きくなることが知られている¹⁷⁾。LSは、OPC-W/C55%よりも粒子間付着力が小さい粉体¹⁸⁾であるために沈降後の粉体層が密に充填されるとともに、前記したように沈降速度が遅いことも

図-10 型枠内部の対流現象

図-11 対流を考慮した型枠内の粒子沈降概念図

加わり、OPC-W/C55%に比べて長時間BLが発生したと考えられる。

反応しないLSは、粉体工学的には粒子の単純な沈降現象であると考えられるが、水和反応を生じるOPC-W/C55%は、粉体工学的には単純な沈降現象で議論できない可能性がある。沈降現象では、粒子が重力によって沈降し、水は静止状態と仮定しているが、OPCが反応性粒子であることを踏まえると、反応によって生じる熱によって水が移動（熱対流）している可能性が考えられる。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。式(2)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¹⁷⁾の算出式である。

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T x^3}{\nu\alpha} \quad (2)$$

ここに、レイリー数 Ra 、重力加速度 $g=981.6$ (cm/s²)、熱膨張係数 $\beta=0.00021$ (1/°C)、液体表面と液体内部の温度差 ΔT (°C)、代表長さ x (cm)、動粘性係数 $\nu=0.01004$ (cm²/s)、熱

図-12 断熱材の有無による外部と内部の最終BL量
(W/C55%, $h=30$ cm, 底面寸法 20cm)

拡散率 $\alpha=0.0014$ (cm²/s)である。各種物性値に関しては、温度20°Cの水のものとした。なお、代表長さは、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、既往の研究では、いくつかの測定結果が示されている^{例えは19),20)}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(2)に代入すると、 $\Delta T=2.8\times 10^6$ (°C)となる。既往の研究²¹⁾に基づき、W/C50%のコンクリート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°Cの上昇となる。既往の研究ではコンクリートであり、本研究の対象としているセメントペーストとは異なるが、今回のBL試験では、対流は必ず生じていると考えられる。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り、この密度差によって対流を生じる。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が、相対的に上面と型枠側面では、周辺環境 (20°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 (図-10)。これらの対流による流れと粒子沈降を考慮すると、図-11に示ようになる。水の密度よりも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、水和熱を生じないが、粉体 (固体) は液体と接触することで、化学反応が生じない場合であっても発熱を生じる。これを浸漬熱²²⁾といい、固体を液体中に浸漬した際の固体表面の消失と、それと同時に起きる固-液界面の生成に伴うエネルギー変化によって生じる熱である。ここで既往

図-13 底面寸法と最終 BL 量との関係 (W/C の影響)

図-14 内部と外部の最終 BL 量

(W/C の影響, $h=30\text{cm}$, 底面寸法 20cm)

表-4 各領域の BL 量および領域 2 の計算結果 (W/C の影響)

W/C	BL 量(cm^3/cm^2)			BL_1/BL_3	BL_2/BL_3	領域 2 (cm)
	BL_1	BL_2	BL_3			
0.55	0.48	0.90	0.50	0.96	1.80	3.0
0.65	1.26	1.70	1.40	0.90	1.21	3.1
0.85	2.76	3.10	2.90	0.95	1.07	2.2
1.00	3.37	3.70	3.50	0.96	1.06	2.3

の文献²³⁾²⁴⁾から、本実験で用いた粉体の浸漬熱を、OPC が $0.76\text{J}/\text{m}^2$ 、LS が $0.54\text{J}/\text{m}^2$ として、型枠内の粉体が水に与える温度上昇を算出すると、OPC で 0.11°C 、LS で 0.07°C となる。OPC では、水和熱による温度上昇に対して影響は小さいが、LS の場合は、レイリー数から算出した、対流発生条件となる温度差と比較すると、対流を発生させる可能性がある。ここで、熱対流による影響を検証するために、OPC-W/C55%を用いて、型枠の側面および底面に厚さ 3cm の断熱材を貼り付けた状態で領域分割 BL 試験を実施した。試験結果を図-12 に示す。断熱材を用いたことで、外部の BL 量が著しく低下しており、内部と外部の比は LS の場合と同程度となっていた。これは、断熱材を用いたことで、型枠側面における外環境との温度差がほぼ無くなったため、セメント粒子が比較的均等に沈降していたためであると考えられる。また、断熱材を用いても、わずかに内部と外部で差が生じていたのは、前述の粉体充填層における議論も踏まえると、内部よりも外部のほうが BL 水の上昇がしやすかったためと考えられる。すなわち、LS の場合、浸漬熱に伴う対流によって内部と外部の差が生じた可能性も現時点では否定できないが、OPC-W/C55%の断熱材を用いた検討結果を踏まえると、LS の場合に生じた内部と外部の差も、前述の粉体充填層における議論（内部よりも外部の方が

図-15 BL_1/BL_3 , BL_2/BL_3 および領域 2 と粉体濃度の関係

BL 水の上昇がしやすい) の影響の可能性も考えられる。

b) W/C の影響

図-13 に W/C を変化させた場合の最終 BL 量と底面寸法との関係を、表-4 に 3 つの領域の BL 量、領域 2、および BL_3 を基準とした BL_1 および BL_2 の比率を算出した結果を示す。すべての W/C で底面寸法 1cm から 10cm で増加傾向を示していた。W/C55% および 65% では 10cm から 30cm にかけて明確に低下していたが、W/C85% および 100% で最終 BL 量はわずかな低下だった。領域 2 は W/C の増加に伴い小さくなる傾向だった。

図-14 は、検証実験として実施した領域分割した BL 試験の結果である。すべての W/C で内部より外部の方が最終 BL 量は大きくなる結果となった。また、外部と内部の最終 BL 量の比を見ると、W/C の増加とともに 1.0 に近づいており、表-4 の結果と同様の傾向を示していた。

図-15 は、粉体濃度に対する BL_1/BL_3 および BL_2/BL_3 の比率と領域 2 の関係を示している。領域 2 は、粉体濃度の低下に伴い小さくなっていく傾向にあり、 BL_2/BL_3 は

図-16 底面寸法と最終 BL 量 (OPC-W/C55%)

図-17 底面寸法と最終 BL 量 (LS)

W/C85%以降では割合が1.0に近くなることからわかる。粉体濃度が低くなるほど、内部と外部からほぼ同じBL量が生じており、その結果、領域2が小さくなっていると考えられる。W/Cの増加に伴い全体的なBL量が上昇するのは、粉体濃度が低下することでペースト中の空隙率（水の体積割合）が上昇するためと考えられる。断面内部のBL量の分布が変化するのは、粉体濃度の低下による空隙率の増加と対流現象によるものと考えられる。W/Cが増加することで粉体濃度が低下し、空隙率が上昇する。図から、W/C100%では粉体濃度が約24%であり、空隙率が約76%となる。これは前述の粉体充填層の検討から、空隙率が高く、高速領域と平均的な領域の差がほとんどなくなっている状態と考えられる。その結果、領域2が小さくなり、内部と外部のBL量の差が小さくなる。また、W/Cの増加に伴い水和熱は低下し、温度差が生じにくくなるため、対流の範囲もW/Cの増加に伴い小さくなる。粉体濃度と対流の影響により、断面内のBL量の分布が小さくなると考えられる。

c) 打込み高さの影響

図-16および図-17は、OPC-W/C55%およびLSの打込み

表-5 打込み高さごとの各領域のBL量および領域2の計算結果 (OPC-W/C55%)

h (cm)	BL量(cm^3/cm^2)			BL_1/BL_3	BL_2/BL_3	領域 2 (cm)
	BL_1	BL_2	BL_3			
10	0.48	0.90	0.50	0.96	1.80	3.0
20	0.53	1.20	0.60	0.88	2.00	4.4
30	0.63	1.60	1.40	0.45	1.14	1.9

表-6 打込み高さごとの各領域のBL量および領域2の計算結果 (LS)

h (cm)	BL量(cm^3/cm^2)			BL_1/BL_3	BL_2/BL_3	領域 2 (cm)
	BL_1	BL_2	BL_3			
10	2.14	2.45	2.35	0.91	1.03	3.0
20	4.05	5.44	5.43	0.75	1.00	3.0
30	6.27	8.42	7.80	0.80	1.08	2.9

高さごとの最終BL量と底面寸法の関係であり、表-5および表-6は、3つの領域のBL量、領域2、および BL_3 を基準とした BL_1 および BL_2 の比率を算出した結果である。OPC-W/C55%の場合、すべての打込み高さで底面寸法10cmまでは最終BL量が増加しており、打込み高さの増加に伴い増加割合は大きくなっていた。底面寸法30cmでは、h20cmまでは断面寸法10cmから最終BL量は明確に低下していたが、h30cmではわずかな低下であった。LSの場合も、すべての打込み高さで底面寸法10cmまでは最終BL量は増加していたが、OPC-W/C55%と比較するとわずかであり、底面寸法30cmでは BL_2/BL_3 が1.0に近く、断面寸法10cmに対する最終BL量の差は非常に小さかった。 BL_1/BL_3 はOPC-W/C55%およびLSともに、打込み高さの増加に伴い低下していたが、OPC-W/C55%の方が顕著な傾向だった。

ペースト中の水は、セメント粒子に拘束される拘束水と、BL水として移動することが可能な自由水に分けられる。一般に、拘束水はW/Cに依存する²⁾ため、W/Cが一定であれば打込み高さの増加に伴い拘束水も自由水も比例的に増加すると考えられる。図-18および図-19に打込み高さごとの各領域から生じるBL量との関係を示す。なお、 $h=10\text{cm}$ を基準として、打込み高さの増加に伴い比例的に最終BL量が増加すると仮定して算出した各領域の最終BL量の結果も図中に示した。図より、LSの場合は、打込み高さの増加に伴ってほぼ比例的に増加していることがわかる。一方でOPC-W/C55%の場合は、打込み高さの増加に対して、 BL_3 のみがほぼ比例的に増加しているが、 BL_1 および BL_2 の算定値の傾きは単純に比例した場合の2割および4割であるが、打込み高さの増加に伴う各BL量の変化は直線的に増加していることがわかる。

図-18 各打込み高さと同領域のBL量 (OPC-W/C55%)

図-19 各打込み高さと同領域のBL量 (LS)

BL₂は、型枠界面近傍を上昇するBL量であるため、前述した対流の影響によってBL₃とは異なる挙動を示したと考えられる。今回の条件では、打込み高さの増加に伴って側面積は増加するが上面の面積は一定であるため、 $h=10\text{cm}$ と比較して $h=20\text{cm}$ 、 $h=30\text{cm}$ では温度低下が生じ難くなり、結果として上面の対流は発生し難くなると考えられる。打込み高さの増加に伴ってBL₂が $h=10\text{cm}$ を基準とした単純な比例にならなかったのは、打込み高さの増加に伴い上面での対流が発生し難くなり、型枠側面での対流現象のみが生じたためと考えられる。

BL₁は型枠界面を上昇するBL量である。打込み高さの増加に伴って型枠側面積も増加するため、単位面積当たりの壁面摩擦は変化せず、側面の対流の状況も変化しないため、BL₁は $h=10\text{cm}$ を基準として比例的に発生すると考えられる。これまでの検討では、打込み高さ一定で試料の種類や濃度を変化させたが、打込み高さの検討では1種類の試料を対象に、試料の体積を変化させている。

そのために圧密等の影響もあり、粒子の堆積構造が変化することも考えられるが、領域1は壁効果等の影響によって、打込み高さが増加しても空隙率は高いと考えられる。以上を踏まえ、型枠界面の領域1を径の極めて小さい管路として扱うことを考える。水理学における管路流れでは、流速分布は、壁面摩擦によって管路壁面が低速になるような放物線になる。管路の長さが短い場合、摩擦の影響が十分ではないために内部との流速の差が小さく、十分に管路を移動した段階で明確に差が生じると考えられる。管路流れでは、管内の速度分布が放物線で一定となるまでの距離を助走距離 X (m) として、管路直径 D (m) およびレイノルズ数 Re (無次元数) を用いると、式(3)のような関係がある²⁰。

$$\frac{X}{D} \geq 0.065 Re \quad (3)$$

ここで管路流れは、流体の流線が常に管路の軸と平行になっているために層流である。領域1は、型枠界面のBL水の領域であり、セメント粒子等が障害とならず、壁面近傍とある程度平行に上昇すると考えられるために、管路流れと考えることができる。ここで、水理学における層流限界のレイノルズ数 Re は、およそ2000である。 Re が大きくなると乱流に近づき、流線が平行にならずに擾乱され、流れが乱れる。今回の場合、セメント粒子が存在することで障害となり、内部は乱流状態となるため、壁面近傍でも乱流状態に近いと考えられる。そのために領域1においては、レイノルズ数は2000に近いと考えられる。そこで、計算ではレイノルズ数 $Re=2000$ と仮定した。管路直径 D は、管路流れの領域として仮定できるBL₁の領域1である0.5cmすると、助走距離は65.0cmである。助走距離に至るまでは、BL₃との差が増加しつつ、緩やかにBL₁自体も増加し、打込み高さが増加すると、BL₁は変化しなくなると考えられる。このことから、打込み高さの増加に伴って、BL₁が $h=10\text{cm}$ を基準とした比例的な増加とならなかったのは、BL水の移動距離が増加するために壁面摩擦の総和が増加し、内部よりも発生量の増加が緩やかだったためと考えられる。なお、BL₃は、対流の影響を受けないため自然沈降の影響が強く、打込み高さの増加に伴って発生量も単純に比例したと考えられる。本実験ではアクリル型枠を用いているが、実現場の型枠は、鉄や合板などが用いられており、壁面摩擦係数が異なっていると考えられる。流体力学では、管路における壁面粗度とレイノルズ数から壁面摩擦係数を算出できる²⁰。アクリル型枠を基準とした場合、鉄と合板の摩擦係数はそれぞれ1.7倍、1.5倍となる。鉄と合板はほぼ同程度の壁面摩擦となっており、アクリルよりもBL₁の発生量は穏やかになる可能性が考えられる。

図-20 S/Cと最終BL量の関係

領域2に関して、OPC-W/C55%の場合、 $h=20\text{cm}$ まではその範囲が増加しているが、 $h=30\text{cm}$ では $h=10\text{cm}$ よりも減少している。 $h=20\text{cm}$ までは、型枠面の温度低下によって温度差が領域2の範囲まで及んでいるが、 $h=30\text{cm}$ では、内部の熱量の増加が型枠面からの温度低下よりも大きいため、温度差が生じる範囲が狭くなり領域2が小さくなったと考えられる。

ここまでの検討を踏まえて、ペーストのBL現象をまとめると、次のようになる。

1) 粉体種類を変化させた検討から、型枠寸法の影響は水和反応の有無によらず同じ傾向になったが、OPCよりLSの方がBL量の発生時間も長く、最終BL量も大きかった。LSの場合、OPCよりも密度が小さいために密度の影響を受ける沈降速度が小さく、BL量の発生時間が長かった。LSのように粒子間付着力の低い粒子の場合は型枠内で密に充填できるが、OPCのように粒子間付着力の高い粒子では、堆積層が綿状構造になるために、LSと比べると型枠内で充填が粗になる。その結果、最終BL量はLSの方が大きくなると考えられる。なお、試験終了後までの3時間程度でOPCの水和反応による粉体濃度の増加割合から、粒子径の変化に伴う粒子沈降速度の変化はほとんどないものと考えられる。

2) OPCのように水和反応を生じる粉体では単純な自然沈降とはならず、水和熱による水の対流現象が生じているために、型枠内部の粒子の沈降速度に分布が生じていると考えられる。LSのように水和反応を生じない粉体の場合では、浸漬熱によって生じた型枠外部とのわずかな温度差で対流が生じること、および粉体工学における粉体充填層の流速分布の発生の影響が考えられる。

3) W/Cの増加（粉体濃度の低下）に伴う最終BL量の増加は、ペースト中の空隙率（水の体積割合）が増加するためである。W/C85%以上の配合では、 BL_2 と BL_3 のBL量の比がほぼ1.0となった。粉体濃度が低いと空隙率が大き

図-21 底面寸法と最終BL量の関係

表-7 領域のBL量と領域2の幅

S/C	BL量(cm^3/cm^2)			BL_1/BL_3	BL_2/BL_3	領域2 (cm)
	BL_1	BL_2	BL_3			
0.00	0.48	0.90	0.50	1.0	1.8	3.0
0.25	0.66	0.80	0.67	0.8	1.4	6.5
0.50	0.51	0.72	0.58	1.0	1.2	4.0
0.75	0.42	0.78	0.67	0.9	1.2	4.4
1.00	0.37	0.64	0.60	0.6	1.2	4.0
2.00	0.22	0.38	0.33	0.6	1.1	4.5
3.00	0.14	0.27	0.26	0.7	1.2	2.9

きくなるため、内部と外部の差が小さくなると考えられる。

4) 打込み高さの増加に伴い、LSおよび BL_3 では比例的に増加していたが、 BL_1 および BL_2 は $h=10\text{cm}$ を基準とした単純な比例とはならなかった。 BL_2 は打込み高さの増加によって、上面の対流現象が生じ難く、型枠側面でのみ対流現象が生じたためであり、 BL_1 は、壁面の移動距離が増加することで壁面摩擦の総和が増加したために、単純な比例とはならなかったと考えられる。

d) 骨材の影響

図-20にS/Cと最終BL量の関係を示す。図は底面寸法ごとにまとめたものである。図より、S/Cの増加に伴い最終BL量が低下していることがわかる。これは、S/Cの増加に伴う単位水量の減少のためと考えられる。図-21に底面寸法と最終BL量の関係を示す。図は、S/Cごとにまとめたものである。図より、S/Cの増加に伴い、特にS/C=2.0, 3.0の場合に底面寸法ごとの最終BL量の差が小さくなっている。これは、S/Cの増加がモルタルのBL水発生機構に何らかの影響を与えているものと考えられる。全体的な傾向としては、型枠底面寸法が10cmまでは増加して、その後低下する傾向にあったため、OPCペース

(a) $S/C=1.0$ 以下 (b) $S/C=2.0$ 以上

図-22 モルタル内部の概念図

(黒色：細骨材，灰色：セメント粒子)

トの場合と同様に，3層構造分析を行った．本実験は， W/C および打込み高さを一定としているため，この計算から，細骨材量が各領域のBL量に与える影響を評価できると考えられる．

表-7に3つの領域のBL量，領域2および BL_3 を基準とした BL_1 および BL_2 の比率を算出した結果を示す．表より， S/C の増加に伴い各領域のBL量の減少傾向が見られた．特に $S/C=1.0$ から $S/C=2.0$ へ増加した際に，各領域のBL量の減少が著しかった． BL_1/BL_3 はペーストの場合と同様の傾向が見られ，型枠から生じる摩擦力等の影響が考えられる． S/C の増加に伴い BL_2/BL_3 は $S/C=0.25$ 以外で，1.2倍とほぼ同じ割合となっていた．細骨材量が増加すると各領域のBL量は減少するが，内部から発生するBL量に対する型枠界面から生じるBL量の割合は同程度になることが確認された．これは，ペースト+細骨材で構成されるモルタルでも，BL現象の基本はペーストの挙動と同じ，すなわちペーストで生じた対流現象ならびに自然沈降が生じている可能性が考えられる．

図-22は， $S/C=1.0$ 以下および 2.0 以上におけるモルタル内部の概念図である． S/C の増加に伴い領域2の幅が減少していた理由を，OPCペーストの結果から考察すると次のように考えられる．

$S/C=1.0$ 以下の場合，モルタル中の細骨材量が少なく，ペーストで生じたセメント粒子の自然沈降および対流現象と，骨材の沈降現象が生じると考えられる．この場合，領域2の範囲はセメントペーストの場合と同様に，水和熱による対流現象によって決定され则认为られる．OPCペーストの場合は，粉体濃度が低下すること，および対流の生じる範囲が狭まることで，領域2が減少していた．セメント粒子と比較すると，細骨材は密度が小さい．対流によって粒子に生じる力は，浮力と同様に流体との密度差によって生じるものと考えられる．モルタルでは，セメント粒子に比べて流体との密度差が小さい細骨材に生じる対流の影響は少なく，自然沈降が卓越すると考えられる．

$S/C=2.0$ 以上の場合は細骨材量が多く，この状態では細骨材はほとんど沈降しないとされる．細骨材量が多いことから，相対的にペースト量が少なく，単位体積当たりの水和熱が減少するため，ペーストの対流する領域が減少する．これらの要因により，領域2の幅が減少し， BL_2 も減少すると考えられる．

モルタルの実験結果より，骨材の影響は各領域のBL量を減少させるのみで，内部と外部との比率は同程度となった．これはモルタルやコンクリートのBL現象は，ペーストのBL現象で説明することができる可能性を示している．

4. 結論

本研究から得た知見を次に示す．

- 1) 底面寸法を変化させた，セメントペーストのブリーディング試験の結果から，同じ W/C であっても，最終ブリーディング量に変化が生じていることがわかった．上面に生じるブリーディング水は，型枠の摩擦力によってブリーディング水の発生量が少ない領域，その領域よりもわずかに内側に存在するブリーディング水の発生が多い領域，2つの領域よりも内部の平均的にブリーディング水が発生する領域，の3層で構成されている可能性を示した．
- 2) OPCのように水和反応を生じる粉体では，水和熱によって生じる対流が原因となり，セメント粒子が単純沈降とならずに沈降速度に分布が生じることによって，ブリーディング水の発生が多い領域と平均的な領域の差が大きくなる可能性がある．
- 3) W/C が大きい場合は粉体濃度が低下するため，ペ

ースト中の水の体積割合が増加し、ブリーディング水の発生が多い領域と平均的な領域の差が少なくなっていた。

- 4) 打込み高さの増加に伴い最終ブリーディング量も大きくなった。内部のブリーディング量は、打込み高さ10cmを基準とした場合、打込み高さの増加と共に比例的に増加するのに対して、型枠界面の2つの領域のブリーディング量は少なくなった。

ブリーディング水の発生が多い領域では、打込み高さの増加に伴い、対流現象が上面で起こり難く型枠側面での対流現象のみとなるため、打込み高さ10cmを基準とした比例的な増加と考えると考えられる。

ブリーディング水の発生が少ない領域では、打込み高さの増加に伴い、ブリーディング水の移動距離が長くなることで壁面摩擦が増加したため、打込み高さ10cmを基準とした比例的な増加とならなかったと考えられる。

- 5) S/Cを変化させたモルタルの実験結果から、S/C=1.0以下の場合、ペーストで行った結果と同じ傾向であったが、S/C=2.0以上のように骨材量が多くなると、型枠界面の影響は小さいことがわかった。

謝辞：本研究を実施するにあたり実験を手伝って頂いた、元東京理科大学成瀬令紀君に感謝の意を表します。なお、本研究の一部は、土木学会吉田研究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) (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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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) Powers, T. C. : *The Properties of Fresh Concrete*, John Wiley and Sons, pp. 604-652, 1968.
- 8) 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.
- 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, Vol.39, No.592, pp.121-129, 1998.
- 10) 大飼利嗣, 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.
- 11) 大飼利嗣, 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.
- 12) 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.
- 13) 中川好正, 藤井真二郎, 吉岡一弘, 田澤栄一：ダブルミキシングがセメントの初期水和反応に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.51-56, 2007.
- 14) 辻拓也, 成田英嗣, 田中敏嗣：高濃度粒子を含む流れに壁面が与える影響について, 粉体工学学会誌, Vol.48, No.12, pp.847-858, 2011.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 粉体工学会：液相中の粒子分散・凝集と分離操作(粉体工学叢書), 日刊工業新聞社, 2010.
- 18) 荒川正文：粒子の付着・凝集性と粉塵の性質—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.
- 19) Rayleigh, L.: 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.
- 20) 望月貞成, 村田章：伝熱工学の基礎, 日新出版, 1994.
- 21) 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.
- 22) 松井久仁雄, 荒木徹：熱量測定による軽量気泡コンクリートの表面性状と水分由来の体積変化に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.32, No.1, pp.587-592, 2010.
- 23) Mikhail, R. S. and Abo-El-Enein, S. A. : Studies on water and nitrogen adsorption on hardened cement pastes. II-Thermodynamics of adsorption, *Cement and Concrete Research*, Vol.3, pp.93-106, 1973.
- 24) Douillard, J. M. : Immersion Phenomena, In: *Interfacial Dynamics*, Marcel Dekker, pp. 313-349, 1999.
- 25) 太田顕, 名和豊春, 大沼博志：セメント粒子の凝集構造とセメントペーストの流動性の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, pp.271-276, 2001.
- 26) 細井豊：水力学—基礎と演習, pp.97-98, 東京電機大学出版局, 1985.

(2015. 5. 12 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF BLEEDING WATER OCCURRING IN THE MOLD INTERFACE

Katsuya MITA and Yoshitaka KATO

The occurrence of bleeding water at the interface between formwork and concrete is one cause of deterioration of the concrete surface layer. However, the bleeding water mechanism has not been fully examined. This study was carried out to better understand the bleeding water mechanism as affected by experimental factors such as powder type, powder concentration, the height of placing and mix proportions. It was found that that at least three locations had areas with different volumes of bleeding water present. In addition, the amount of bleeding water was the least in the area 0.5 cm from the mold surface, and the greatest in the area from 0.5 to 4.0 cm from the surface. It was understood that the change in bleeding amount in each region may be due to the convection phenomenon caused by the hydration reaction as well as changes in powder concentration, that the increasing rate of the bleeding amount is different with an increase in the placement height, and that the areas of bleeding water are different depending on the presence of aggregates.