# 論文　モルタル試験体の温度変化がブリーディングに及ぼす影響に関する実験的検討

川里　麻莉子[*1]・槙島　修[*2]・平間　昭信[*3]・加藤　佳孝[*4]

**要旨**：ブリーディングによる水の移動は，初期欠陥の発生や表層品質の低下の原因の一つとなっている。ブリーディングにおける水の挙動に関して多くの研究がなされているが，水の物性値やセメントの水和に影響を及ぼす温度とブリーディングを関連付けた研究は少ない。本研究では，モルタル試験体に温度変化を与え，温度変化がブリーディングに及ぼす影響について実験的に検討した。その結果，モルタル試験体に温度変化を与え，内外温度差を生じさせると最終ブリーディング量が減少すること，ブリーディング発生速度とブリーディング収束時間の 2 つの要因の影響度によって最終ブリーディング量が決定されることがわかった。

**キーワード**：温度，温度変化，ブリーディング，凝結特性，内外温度差

## 1. はじめに

コンクリート構造物の長期的な耐久性を確保するために，初期欠陥の抑制や表層品質の向上を目的とした取組みがなされている。コンクリートの品質に影響を及ぼす主な要因は，セメントや骨材の種類や水セメント比などの「材料および配合的要因」と，打込み，締固め，養生などの「施工的要因」に分類され，中でも養生は表層部の密実性に大きな影響を及ぼすことが知られている [1)]。施工時にコンクリートの表層で生じる初期欠陥には，沈下ひび割れや表面気泡，砂すじ，色むらがあり，その発生原因にブリーディングが含まれる。ブリーディングは，セメントや骨材などの固体粒子の沈降に伴い，水が上昇する現象である。コンクリートの打込みから凝結開始までの期間に，材料分離した水がフレッシュコンクリート中を移動するため，高さ方向において表層品質にバラつきが生じる [2)]など，品質の不均一性も確認されている。そのため，コンクリートの表層品質の向上につなげるためには，ブリーディングによる水の挙動を把握することが重要となる。

ブリーディングによる水の挙動に関しては，着色液により自由水の挙動を視覚的に評価した研究 [3),4)]や，粉体の沈降現象に加えて熱対流による影響を検討した研究 [5)]など多くの研究がなされているものの，発生機構については解明されていない部分が多い。また，水は温度によって物性値が異なることや，ブリーディング発生期間がセメントの水和の影響を受けることを考慮すれば，ブリーディングによる水の挙動を把握する上で，温度の影響を検討することは重要である。

本研究では，温度に着目し，コンクリートの表層品質を向上させるための一検討として，練上り温度と環境温度を変化させた条件で，モルタル試験体の温度変化がブリーディングに及ぼす影響について実験的に検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

実験では，ブリーディング量の確保と，粗骨材下面の水の滞留によるブリーディング量のばらつきの排除を目的としてモルタルを使用した。また，一定のブリーディング量を確保するため，試験練りにより配合を選定した。実験に使用した材料を**表－1** に，モルタルの配合を**表－2** に示す。なお，ブリーディング量は 0.6cm$^3$/cm$^2$ 程度であり，十分にブリーディング量を確保できている。

**表－1　使用材料**

| 材料 | 記号 | 物性値 |
|---|---|---|
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント，<br>密度 3.16g/cm$^3$ |
| 水 | W | 水道水 |
| 細骨材 | S | 千葉県富津産山砂，F.M. 2.63，<br>表乾密度 2.62g/cm$^3$，吸水率 1.84% |
| 混和剤 | Ad | AE 減水剤標準形，リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体，<br>密度（希釈液）1.04～1.08g/cm$^3$ |

**表－2　モルタルの配合**

| W/C (%) | S/C (%) | 単位量（kg/m$^3$） | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | C | W | S | Ad |
| 57.9 | 2.90 | 475 | 275 | 1377 | 3.56<br>（C×0.75%） |

*1 飛島建設（株）　技術研究所　研究開発 G　第三研究室　副主任研究員　(正会員)
*2 飛島建設（株）　技術研究所　研究開発 G　第三研究室　室長　博（工）　(正会員)
*3 飛島建設（株）　技術研究所　研究開発 G　部長　(正会員)
*4 東京理科大学　理工学部　土木工学科　教授　博（工）　(正会員)

### 2.2 試験要因および試験水準

試験要因は，練上り温度および環境温度の 2 要因とした。モルタル試験体の中心部と表層部で温度差を生じさせるために，練上り温度と環境温度の組合せによって温度変化を与えた。温度変化は練上り温度と環境温度が等しい「温度一定」，練上り温度よりも環境温度が高い「温度上昇」，練上り温度よりも環境温度が低い「温度低下」の 3 種類を再現した。試験水準は，**表－3** の最左列に示す 7 水準とした。記号は「練上り温度－環境温度」を示している。例えば，20-20 は練上り温度 20℃，環境温度 20℃である。

### 2.3 練混ぜ方法

練混ぜには，公称容量 100ℓの強制二軸式ミキサを使用し，練混ぜ量は 90ℓとした。セメントと細骨材をミキサ内に投入し，30 秒間空練りし，水および混和剤を投入して 90 秒間練り混ぜた。

### 2.4 試験方法

#### (1) フレッシュ性状確認

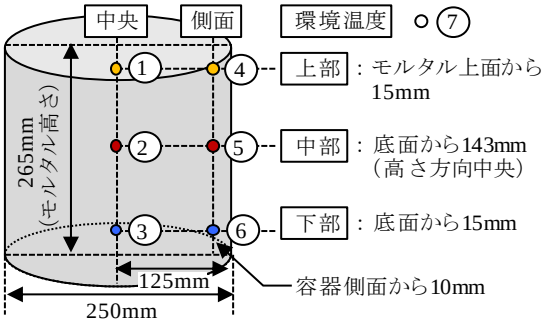
フレッシュ性状は，モルタル温度（JIS A 1156「フレッシュコンクリートの温度測定方法」に準拠），モルタルフロー（JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠），空気量（JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に準拠）を確認した。

#### (2) ブリーディング試験

JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に準拠した。

#### (3) モルタル温度測定

モルタル試験体内の温度分布を把握するために，ブリーディング試験と同じ容器（φ250×285mm）を用い，**図－1** に示すモルタル試験体の中央と側面の上・中・下部の合計 6 点と環境温度を T 型熱電対で測定した。測定期間はブリーディング試験終了時までとした。




**図－1　温度測定位置**

#### (4) プロクター貫入抵抗試験

JIS A 1147「コンクリートの凝結時間測定方法」に準拠した。

## 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュ性状確認

フレッシュ性状の確認結果を**表－3** に示す。0 打フローは 160±11mm，15 打フローは 250±7mm，空気量は 2.0～3.5%，練上り温度は目標値に対して±2℃の範囲内である。また，練上り温度 30℃は 10℃に比べ，空気量が少ない。これは水の粘性の低下によって，連行空気の保持性が低下したことに起因すると推察される。

**表－3　フレッシュ性状確認試験結果**

| 記号 | 練上り温度（℃） | | モルタルフロー（mm） | | | 空気量（%） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 目標 | 実測 | 0 打 | 15 打 | 増分 | |
| 10-10 | 10 | 11 | 156 | 243 | 87 | 3.2 |
| 10-20 | | 8 | 168 | 250 | 82 | 3.1 |
| 10-30 | | 10 | 167 | 253 | 86 | 3.5 |
| 20-20 | 20 | 20 | 164 | 247 | 83 | 2.9 |
| 20-30 | | 20 | 171 | 257 | 86 | 2.7 |
| 30-30 | 30 | 30 | 150 | 250 | 100 | 2.0 |
| 30-10 | | 28 | 164 | 247 | 84 | 2.0 |

### 3.2 ブリーディング試験

#### (1) 練上り温度と環境温度が等しい場合

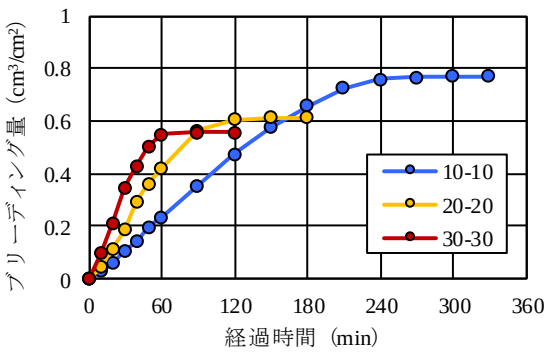
練上り温度と環境温度が等しい場合のブリーディング試験の結果を**図－2** に示す。温度一定の条件下では，低温である 10-10 のブリーディング量が最も多く，ブリーディング終了までの時間が長い。これは，温度が低いほど，ブリーディングは長く続き，ブリーディング量が多くなるという一般的な知見[6]と同様である。

#### (2) 練上り温度と環境温度が異なる場合

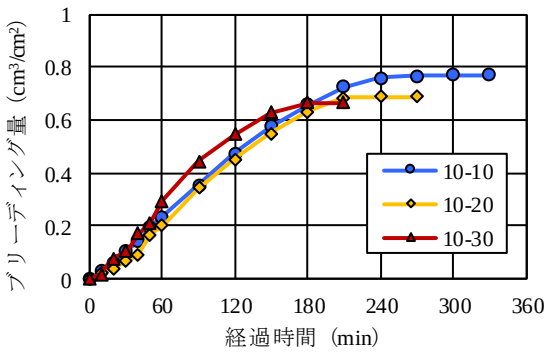
練上り温度と環境温度が異なる場合の練上り温度別のブリーディング試験の結果を**図－3**～**図－5** に，最終ブリーディング量を**図－6** に示す。温度変化を与えた場合，温度一定の場合よりもブリーディング量が少なくなる。その減少量は，0.08～0.18cm$^3$/cm$^2$ であり，20-30 が最も減少量が大きい。また，いずれの水準もブリーディング量は試験開始から直線的に増加し，やがて収束を迎える傾向が見られる。

#### (3) ブリーディング収束時間

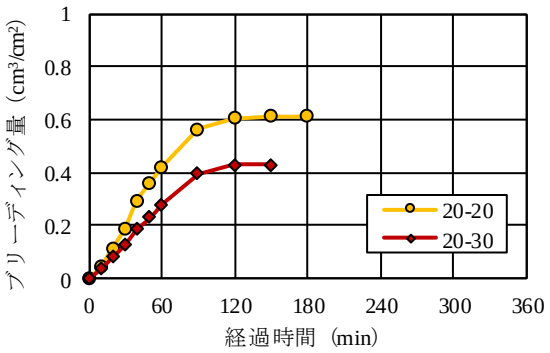
ブリーディング収束時間を**図－7** に示す。ここで，ブリーディング収束時間は，ブリーディング量の変化量が 0.01cm$^3$/cm$^2$ 以下となる時間とした。温度一定の場合，温度が高いほどブリーディング収束時間は短い。温度変化を与えた場合，温度上昇させた 10-20 および 10-30 は，温度の上昇に伴い，ブリーディング収束時間が短くなり，20-30 では差がない。温度低下させた 30-10 は，温度の低下により，ブリーディング収束時間が長くなっている。



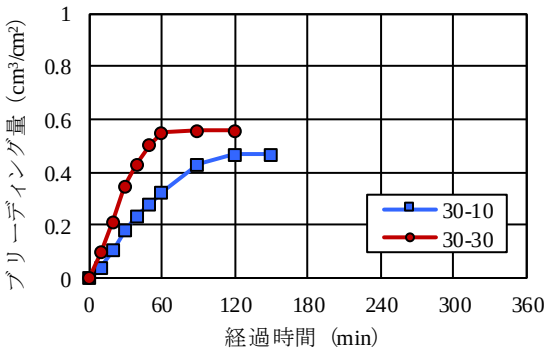

図－2　ブリーディング試験結果（温度一定）




図－3　ブリーディング試験結果（練上り温度 10℃）



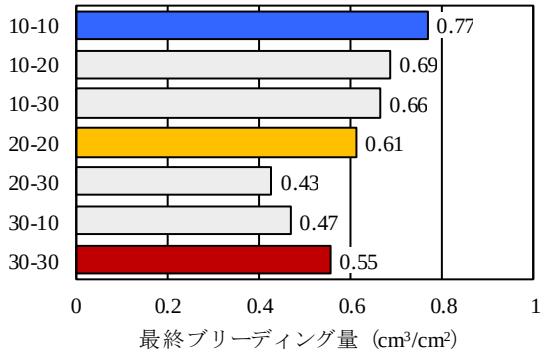

図－4　ブリーディング試験結果（練上り温度 20℃）



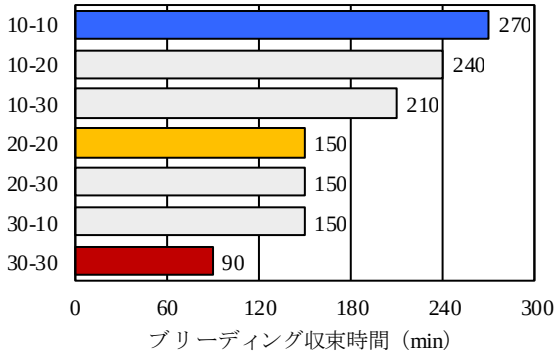

図－5　ブリーディング試験結果（練上り温度 30℃）

(4) ブリーディング発生速度

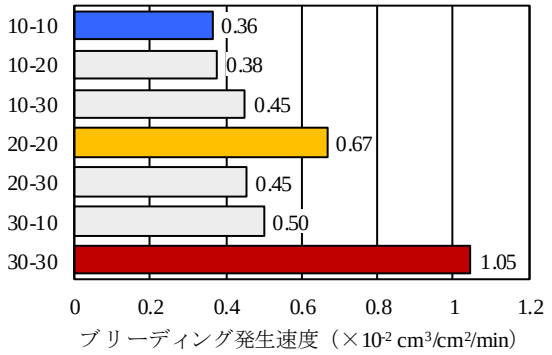
ブリーディング発生速度を図－8 に示す。ここで，ブリーディング収束時間の二つ前の測定時間までのブリー




図－6　最終ブリーディング量




図－7　ブリーディング収束時間




図－8　ブリーディング発生速度

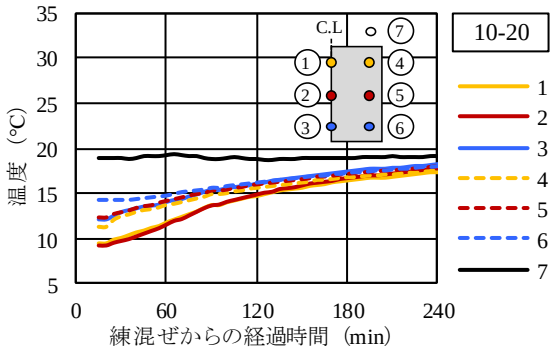
ディング量の経時変化に対して，直線近似したときの傾きをブリーディング発生速度とした。温度一定の場合，温度が高いほどブリーディング発生速度は大きくなる。温度上昇させた 10-20 および 10-30 は，温度の上昇に伴い，ブリーディング発生速度はわずかであるが大きくなっている。温度低下させた 30-10 では，温度の低下に伴い，ブリーディング発生速度は小さくなっている。一方で，20-30 は傾向が異なり，温度の上昇に伴い，ブリーディング発生速度は小さくなっている。

### 3.3 モルタル温度測定

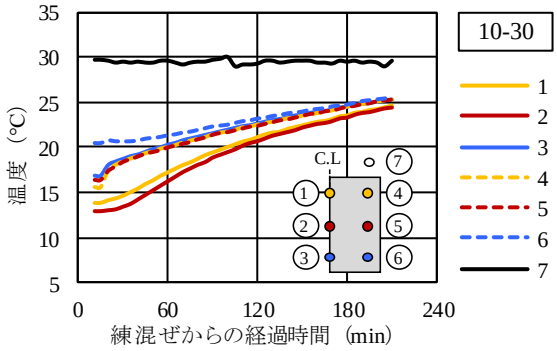
ブリーディング収束時間までのモルタル温度の測定結果の一部を図－9～図－12 に示す。温度一定の場合，図には示していないが，容器内の全 6 点の温度差が約 1℃以下であり，容器内は一定温度に保たれていた。また，

練上り温度 30℃（30-30）では 90 分経過時で約 1℃温度が上昇していた。

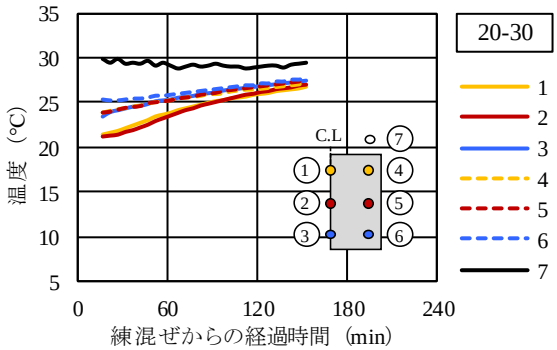
モルタルの温度は，いずれの測点においても時間の経過とともに環境温度に近づいている。測定開始時に中央と側面の温度が異なるのは，容器が環境温度の影響を受け，環境温度と同等になっていたためであると考えられる。また，6 点の試験体温度のうち，側面下部（測点 6）の温度が最も環境温度の影響を受けており，次いで，中央下部，側面上部，側面中部（測点 3～5）の 3 点が影響を受け，同等の温度履歴を示している。一方で，中央上部（測点 1）と中央中部（測点 2）は，練上り温度と環境温度の温度差が 10℃の場合は同等の温度履歴を示し，温度差が 20℃の場合は両者の差は大きくなる。



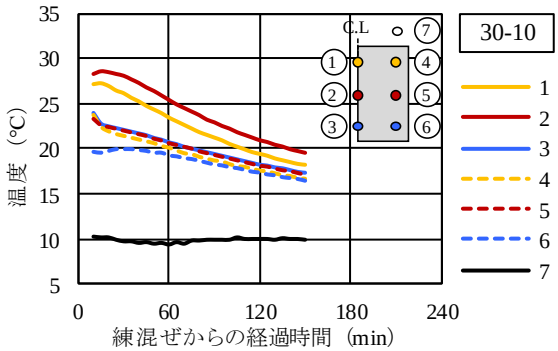

図－9　温度測定結果（10-20）




図－10　温度測定結果（10-30）



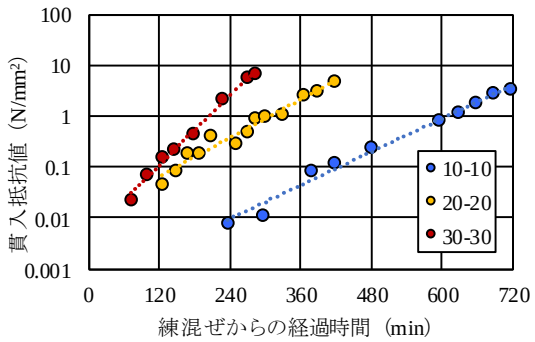

図－11　温度測定結果（20-30）



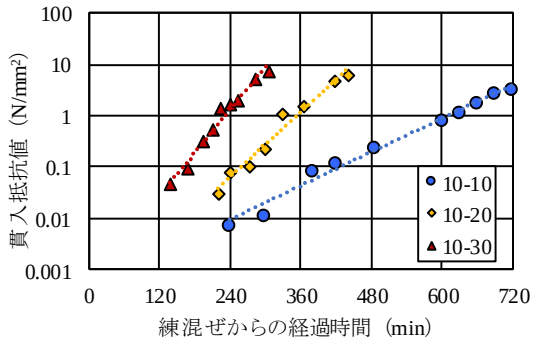

図－12　温度測定結果（30-10）

### 3.4 プロクター貫入抵抗試験

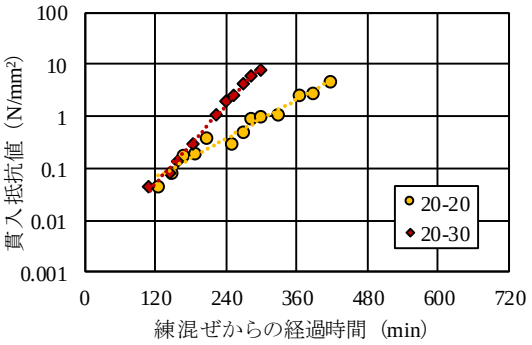
プロクター貫入抵抗試験の結果を**図－14～図－17** に示す。コンクリートの凝結時間は，プロクター貫入抵抗値（以下，貫入抵抗値とする）が 3.5N/mm$^2$ に到達するまでの時間（始発時間）と 28.0N/mm$^2$ に到達するまでの時間（終結時間）で評価される。そのため，グラフに示す近似直線の傾きは貫入抵抗値の経時変化を表す指標となり，傾きが大きいほど，貫入抵抗値の増加速度は大きいと判断できる。温度一定の場合，温度が高いほど，貫入抵抗値の傾きが大きい。温度変化を与えた場合も同様に，環境温度が高いと傾きは大きく，環境温度が低いと小さくなる。これは，練上り温度と養生温度が等しい場合，貫入抵抗値の経時変化は時間と温度によって支配され，練上り温度よりも養生温度の影響が卓越するという報告[7]と一致する。



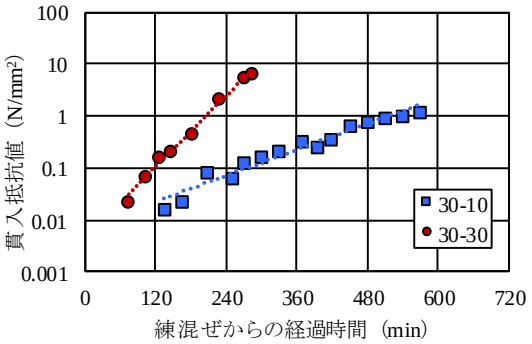

図－14　貫入抵抗試験結果（温度一定）




図－15　貫入抵抗試験結果（練上り温度 10℃）




図－16　貫入抵抗試験結果（練上り温度 20℃）




図－17　貫入抵抗試験結果（練上り温度 30℃）

## 4. 温度がブリーディングに及ぼす影響に関する考察

### (1) 平均内外温度差と最終ブリーディング量の関係

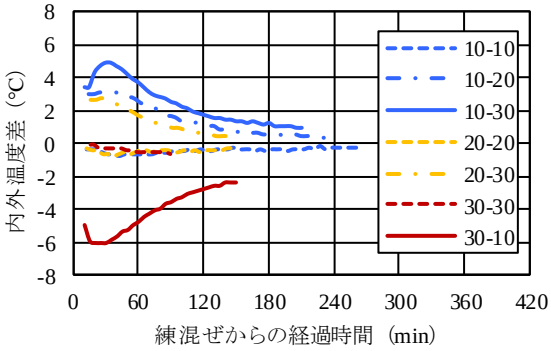
ブリーディング収束時間までのモルタル試験体の内外温度差の経時変化を図－18 に示す。試験体の内外温度差は，中央中部（測点 2）と側面中部（測点 5）の差とした。ブリーディング収束時間までの内外温度差の平均値（以下，平均内外温度差とする）と最終ブリーディング量の関係を図－19 に示す。モルタル試験体に内外温度差が生じた場合，平均内外温度差の増減にかかわらず，ブリーディング量は小さくなる。

### (2) 平均内外温度差と凝結特性の関係

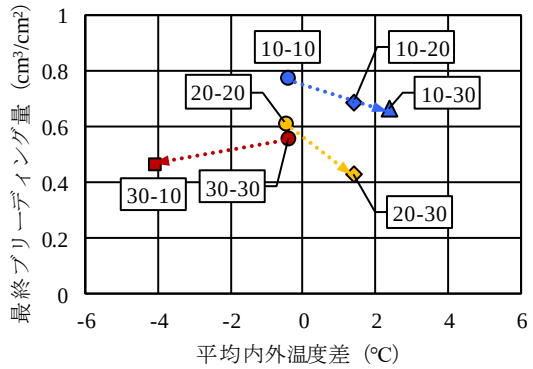
平均内外温度差と始発時間の関係を図－20 に示す。温度上昇による平均内外温度差の増加に伴い，始発時間は短くなる。一方，温度低下による平均内外温度差の減少に伴い，始発時間は長くなる。また，始発時間は練上り温度に関係なく，養生温度に支配されていると考えられる。

### (3) 温度変化がブリーディング量に及ぼす影響

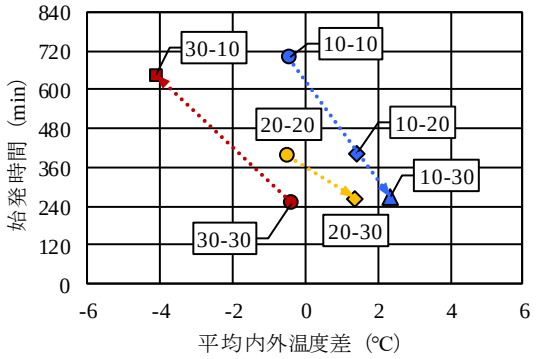
ブリーディング量の大小を決める要因として，ブリーディング発生速度とブリーディング収束時間が考えられる。ブリーディング発生速度が大きいほど，ブリーディング収束時間が長いほど，ブリーディング量は多くなる。液体の性質は，温度が上昇すると，密度・粘性ともに小さくなる。反対に，温度が低下すると，密度・粘性ともに大きくなる。これをフレッシュコンクリート中の自由




図－18　内外温度差の経時変化




図－19　平均内外温度差と最終ブリーディング量の関係




図－20　平均内外温度差と始発時間の関係

水の挙動に置き換えると，密度は水の上昇しやすさ（固体粒子の沈降しやすさ），粘性は水の動きにくさ（抵抗）の目安になると考えられる。温度が上昇した場合，水の密度が小さくなるため，固体粒子が沈降しやすくなる。また，水の粘性が小さくなると，固体粒子の沈降に対する抵抗力が小さくなるため，水が上昇しやすくなる。そのため，この 2 つの要因がブリーディング発生期間の水の上昇しやすさにつながっていると推察される。

ブリーディング収束時間は，セメントの水和が関係していると考えられる。セメントの水和反応速度は温度の影響を大きく受け，温度が高いほど，水和が促進されるため，セメント水和物の生成も進行する [8]。水和の進行とともに生成された水和物によって粒子間の間隙が小さくなり，自由水の上昇する経路が塞がれていくものと考

えられる。したがって，温度が上昇した場合，活発な水和の進行に伴い，粒子間の間隙の減少が進むため，ブリーディング収束時間が短くなると考えられる。

今回の実験結果より，練上り温度 10℃（10-20，10-30）の場合，温度上昇による平均内外温度差の増加に伴い，ブリーディング発生速度は増加，ブリーディング収束時間は短縮し，最終ブリーディング量は減っている。温度変化によるブリーディング発生速度の変化量は小さいため，ブリーディング収束時間が最終ブリーディング量の主因であると考えられる。次に，練上り温度 20℃（20-30）の場合，ブリーディング発生速度は減少，ブリーディング収束時間は変わらず，最終ブリーディング量は減っている。そのため，ブリーディング発生速度が最終ブリーディング量の主因であると考えられる。最後に，練上り温度 30℃（30-10）の場合，温度低下による平均内外温度差の減少に伴い，ブリーディング発生速度は低下，ブリーディング収束時間は延長し，最終ブリーディング量は減っている。ブリーディング発生速度の低下は最終ブリーディング量を減少させ，ブリーディング収束時間の延長は最終ブリーディング量を増加させることから，これまでの温度変化とは異なり，2 つの要因が反対の影響を最終ブリーディング量に与えていたことがわかる。今回の場合，ブリーディング発生速度の影響が大きく，結果として，最終ブリーディング量が減少したと考えられる。

したがって，ブリーディング発生速度とブリーディング収束時間の 2 つの要因は温度変化の影響を受け，その影響度は，温度の上昇あるいは低下，また，練上り温度によって異なり，最終ブリーディング量は両者の影響度により決定される。

## 5. まとめ

本検討の範囲で得られた知見を以下に示す。

(1) モルタル試験体に内外温度差が生じた場合，平均内外温度差の増減にかかわらず，ブリーディング量は小さくなる。

(2) ブリーディング発生速度は水の密度と粘性，ブリーディング収束時間はセメントの水和の進行に伴う粒子間の間隙の減少が関係していると考えられる。

(3) ブリーディング発生速度とブリーディング収束時間は温度変化の影響を受け，両者の影響度によって最終ブリーディング量が決定される。

今後，ブリーディングによる水の挙動をより正確に把握するために，密度や粘性等の温度依存性のある物性値の評価や，内外温度差を生じさせたときの温度分布を考慮した検討を行う必要がある。実構造物においてもブリーディング量が変化することが予想されるため，検討を重ね，コンクリート構造物の品質向上につなげるための対策を考えていきたい。

## 参考文献


1) 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システム研究小委員会成果報告書，コンクリートライブラリー80，2008

2) 早川健司・加藤佳孝：かぶりコンクリートの品質に及ぼす配合および施工方法の影響，土木学会論文集 E2，Vol.68，No.4，399-409，2012

3) 岩崎訓名：コンクリートの特性，共立出版，pp.39-40，1975

4) 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 1-7，2005.4

5) 三田勝也，加藤佳孝：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，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.71，No.4，385-397，2015

6) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点‘17，pp.60-61，2017.9

7) 仕入豊和，地濃茂雄：コンクリートの凝結・硬化におよぼす温度条件（20～90℃）の影響－プロクター貫入抵抗値の経時変化からの考察－，日本建築学会論文報告集，第 313 号，1982.3

8) 山田順治，有泉昌：わかりやすいセメントとコンクリートの知識，鹿島出版会，pp.42-49，1976