

報告 温度分布に着目したコンクリートのブリーディング水の挙動に関する実験的検討

渡邊 真史*1・三本 巖*2

要旨：コンクリートのブリーディング水の挙動へ影響を与える温度を実験水準とし、取水する領域面積を3等分割したブリーディング試験を実施した。また、同一試料で別の型枠中の20箇所の温度計測を並行して実施した。その結果、水和熱の影響が小さい条件下では、環境温度の影響を受けた熱伝導による伝熱が支配的になること、温度分布の差異によって水和の進行具合や型枠界面のブリーディング水の移動のしやすさに違いが生じるため、各領域のブリーディング量が異なる可能性があることが明らかとなった。

キーワード：ブリーディング、コンクリート温度、水和、摩擦抵抗、熱伝導

1. はじめに

コンクリートのブリーディング水は、施工時に適度な仕上げ易さを与える一方で、過剰な場合、鉄筋の下部や打込み面の表層部に脆弱な箇所を発生させる可能性がある。そのため、設計や施工の段階でブリーディング水を適切に制御することが課題となる。

材料分離現象のひとつであるブリーディングは、配合が同じであったとしても、環境条件やコンクリート温度の違いによって異なる挙動を示す。最近の研究によると、ブリーディング水の挙動は粉体の沈降現象と熱対流によって説明し得ること、型枠界面の面積や材質によって異なる可能性があること²⁾が報告されている。伝熱を担う熱対流が温度勾配を駆動力とした現象であること、型枠界面では、同じく温度勾配を駆動力とした熱伝達および熱伝導が主として伝熱を担うことから、ブリーディング現象が起こっている際の温度履歴や温度分布を詳細に把握することは、ブリーディング現象を解明する上での一助となり得る。

そこで本研究では、同一の配合でコンクリートの練上り温度が約10~30℃となるように材料を温度調整し、異なる温度履歴を示す試料に対して、取水する領域面積を3等分割したブリーディング試験を実施した。あわせて、同一試料で別の型枠中の20箇所の温度計測を実施した。これにより、温度条件がブリーディング水の挙動に与える影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1に示す。また、単位量を表-1に示す記号を用いて表-2に示す。絶対的なブリーディング量が多くなるように、W/Cは57%とした。練上り時の試料の目標温度は10℃、20℃および30℃とした。

表-1 使用材料

材料名(記号)	種類および物性
セメント (C)	普通ポルトランドセメント、密度： 3.16g/cm ³ 、比表面積：3300cm ² /g
水(W)	上水道水、千葉県浦安市
細骨材 (S)	山砂：千葉県富津市産 表乾密度 2.60g/cm ³ 、吸水率 2.40%
粗骨材 (G)	石灰砕石 2005：高知県吾川郡産 表乾密度 2.70g/cm ³ 、吸水率 0.37%
化学混和剤 (Ad)	AE減水剤：変性リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸化合物の複合体

表-2 コンクリートの単位量※ (kg/m³)

C	W	S	G	Ad (Wに累加)
314	180	843	956	2.20

※ 呼び方 24-18-20Nの配合

2.2 練混ぜ方法

細骨材および粗骨材は表乾状態に調整したものを使用し、材料は密閉容器に予め計量した。練上りの目標温度を10℃とした水準では、約5℃の水槽に材料を計量した密閉容器を半没させ、冷却した材料を使用した。練上りの目標温度を30℃とした水準では、40℃の乾燥機内に材料を計量した密閉容器を静置させ、加熱した材料を使用した。練混ぜには、公称容量60Lの強制二軸式ミキサを使用し、練混ぜ量は30Lとした。粗骨材、細骨材半量、セメント、細骨材半量の順に材料を投入し、空練りを10秒間行った後、水および化学混和剤を投入して90秒間の練混ぜを行った。

2.3 フレッシュ性状の確認試験

練上り直後のスランプおよび空気量、コンクリート温度の測定を実施した。

*1 (株)内山アドバンス 技術本部 中央技術研究所 修士(工) (正会員)

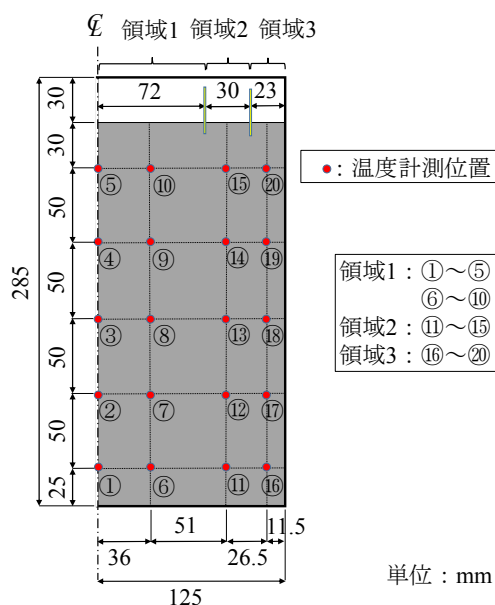
*2 (株)内山アドバンス 技術本部 中央技術研究所

2.4 ブリーディング試験

ブリーディング試験は、JIS A 1123 を参考にして実施した。本実験では、**写真-1** に示す仕切り枠を用いて、ブリーディング水を取水する領域を面積で3等分割した。本稿では、仕切りされた中央の円形箇所を領域1、領域1の外側で仕切り枠と仕切り枠で囲まれた箇所を領域2、領域2の外側で仕切り枠と型枠側面で囲まれた箇所を領域3と呼ぶこととする。なお、仕切り枠はプラスチック製であり、コンクリート試料に触れる部分はアルミテープによる保護を施した。仕切り枠の試料中への挿入深さは、ブリーディング水の移動に影響がないように約 5mm とした。また、型枠内側の側面に剥離剤の塗布は行わず、湿布で軽く拭うのみとした。ブリーディング試験を実施した場所は、室温 20℃、湿度 60%の恒温恒湿環境である。

2.5 温度計測

ブリーディング水を取水する型枠とは別の型枠を用いて、同一試料の温度を熱電対とデータロガーによって計測した。計測位置は、**図-1** に示すように、型枠の中心、型枠の中心と仕切り枠の中間、仕切り枠と仕切り枠の中間、仕切り枠と型枠側面の中間の4地点において、深さ方向に5箇所、合計20箇所とした。熱電対の設置状況は**写真-2** および**写真-3** に示すとおりであり、各々の熱電対は、金属製の網にプラスチック製の結束バンドによって固定した。なお、コンクリート試料を流し込んだ後は型枠上面をラップし、通常のブリーディング試験で行われる型枠を傾ける操作は一切行わなかった。



※ ブリーディング試験は別の容器を用いて実施

図-1 温度計測の位置

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

練上り直後のフレッシュ性状の確認試験の結果は**表-3** に示すとおりである。試料温度は、目標温度を概ね満足した。

表-3 フレッシュ性状

目標温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
10	22.5	3.8	11
20	22.5	3.5	19
30	22.0	4.0	29



写真-1 仕切り枠の設置状況



写真-2 熱電対の設置状況 1



写真-3 熱電対の設置状況 2

3.2 ブリーディング量

コンクリート温度の差異による領域別のブリーディング量の違いを対等に比較するため、全領域のブリーディング量に対する各領域のブリーディング量の割合を式(1)によって求めた。

$$R_i = \frac{B_i}{\sum B_i} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 R_i ：領域 i のブリーディング量の割合 (%)、 B_i ：領域 i のブリーディング量 (cm^3/cm^2) である。

式(1)により求めた各領域のブリーディング量の割合を図-2～図-4に示す。試料温度の調整の都合上、試験数が1回であること、試験時期が全て異なることから、試験開始60分までの各領域のブリーディング量の変動や、コンクリート温度の違いによる最終ブリーディング量の差については、試験数を増やして再現性を検討するべきであると考えられる。

図-2より、試験開始時のコンクリート温度が環境温度よりも低い場合、領域2のブリーディング量が最も多くなり、型枠界面に近い領域3のブリーディング量が最も少なくなった。これは、型枠界面では摩擦の影響を受け、ブリーディング量が少なくなったものと考えられる。

図-3より、試験開始時のコンクリート温度が環境温度とほぼ同じである場合、型枠中心部の領域1と領域2のブリーディング量はほぼ同じであり、その量は型枠界面に近い領域3よりも多かった。既往の研究³⁾においても、型枠界面の領域でブリーディング量が小さくなることが報告されている。次節でも述べるように、温度勾配がほとんどない条件において領域3のブリーディング量が少なくなったということは、型枠界面で生じるブリーディング水の移動は、水和熱の影響が小さい条件下の測定においては型枠界面の摩擦抵抗が主として影響するものと考えられる。

図-4より、試験開始時のコンクリート温度が環境温度よりも高い場合、外側の領域2と領域3のブリーディング量がほぼ同じとなり、中心部の領域1のブリーディング量が、他の領域に比べてわずかに少なくなった。領域3では、前述したように型枠界面の影響を受けてブリーディング水が上部へ移動しにくい条件下である。一方で、環境温度の影響を受けてコンクリート温度が低くなりやすい領域でもあり、ブリーディング水の移動を阻害する水和物の生成が若干遅れることも予想される。この効果により、外側の領域でブリーディング量がわずかに多くなった可能性がある。

本実験では、いずれの試料温度の場合も試験開始から約120分でブリーディングがほぼ収束した。一般的な普通ポルトランドセメントでは、注水から120分の時間帯はエーライトの水和による凝結はまだ起こっておらず、主にアルミン酸カルシウム（以下、 C_3A ）の

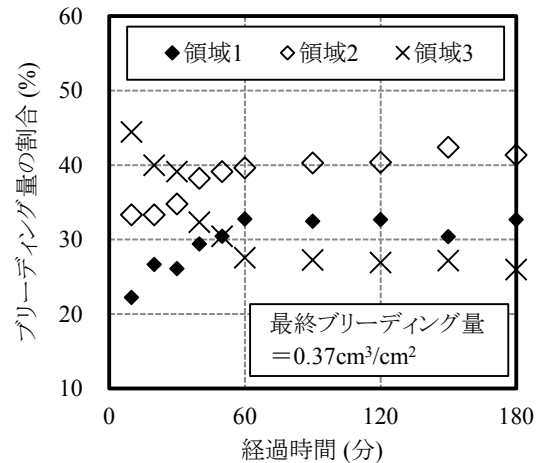


図-2 ブリーディング試験の結果 (試料温度約 10°C)

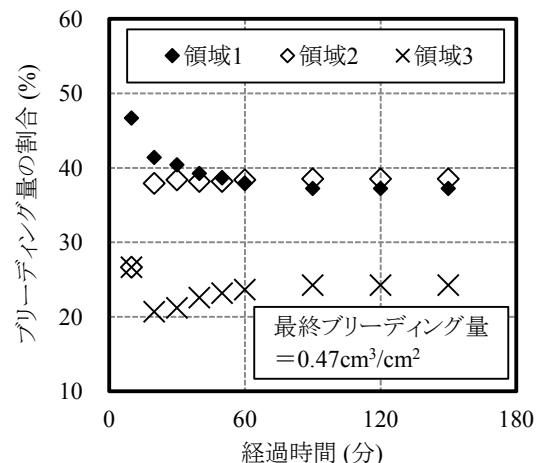


図-3 ブリーディング試験の結果 (試料温度約 20°C)

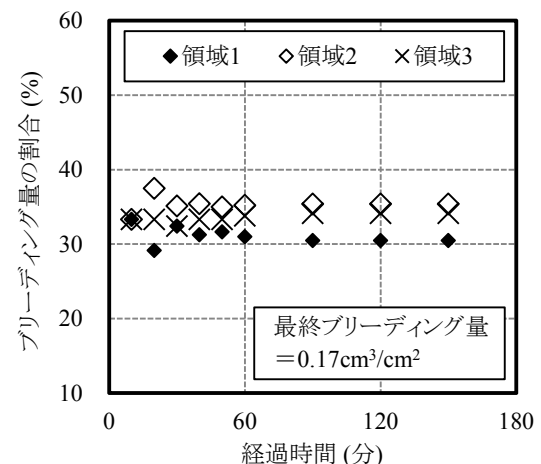


図-4 ブリーディング試験の結果 (試料温度約 30°C)

水和による偽凝結が起こっている。したがって、ブリーディング水の移動のしやすさに関与する化学成分を挙げるとすれば、 C_3A であると予想される。例えば、 C_3A の含有量が少ない低熱ポルトランドセメントや高炉スラグ微粉末を高含有したセメントでは、ブリーディング量の違いに与えるコンクリート温度の影響は小さくなる可能性がある。

昨今の研究^リでは、アクリル製の直方体型枠を使用した場合のペースト試料に関するブリーディング試験を通じて、熱対流の影響について言及している。この実験を踏まえ、以下に考察を述べる。型枠内のコンクリート温度が環境温度よりも高い場合、上面および側面のコンクリートは冷却されるため、型枠界面近傍では下降流が卓越し、ブリーディング量は温度勾配がない場合よりもさらに少なくなるはずである。しかし、本実験ではむしろ真逆の結果となり、熱対流現象が顕著に影響しているとは言い難い。単に、型枠界面から熱伝導現象による冷却が進み、水和の進行具合の違いによってブリーディング水の移動のしやすさに差が生じた可能性が高い。これは、既往の研究と本実験とでは、試料の平均的な比熱や密度、さらにはペースト試料とコンクリート試料とでは流動性が異なることから、熱対流の影響度が低くなったものと考えられる。

3.3 温度分布

本実験では、試験開始から 60 分の時点で、各領域のブリーディング量の相違が明確となった。そのため、代表的な実測値として図-5~図-7 に試験開始から 60 分の時点におけるコンクリートの温度分布を示す。

図-6 より、試験開始時のコンクリート温度が環境温度とほぼ同じである場合、中心部の領域で温度がわずかに高くなる傾向があるものの、型枠の深さ方向の温度分布に明確な傾向は見られなかった。また、水和の進行に伴う温度上昇は、本実験の温度計測の限りではほぼ無視できるレベルであると考えられる。既往の実験³⁾において、断熱状態を模擬した合板型枠を使用した場合、すなわち、試料の温度勾配が小さい場合では、中心部と外側の領域でブリーディング量の差が小さくなることが報告されている。温度勾配が完全にゼロであれば、熱伝導や熱対流は理論的に生じないため、ブリーディング水の移動は一様に起こるはずである。しかし、本実験では既に述べたように外側の領域 3 のブリーディング量が小さくなる結果が得られている。したがって、温度勾配の影響のみを考慮して温度とブリーディング量の関係を議論するためには、型枠界面の粗度の影響を排除した条件下で実験を行う必要があると考えられる。

図-5 および図-7 より、試験開始時のコンクリー

ト温度が環境温度よりも低い、あるいは高い場合、外側の領域から環境温度の影響を受けて温度が上昇あるいは低下する明確な傾向が見られた。また、型枠の深さ方向の温度は、試験開始時のコンクリート温度が環境温度よりも高い場合、いずれの領域においても、中

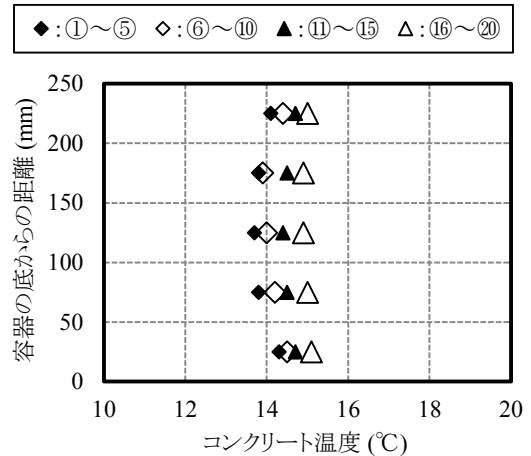


図-5 温度分布 (試料温度約 10°C, 60 分)

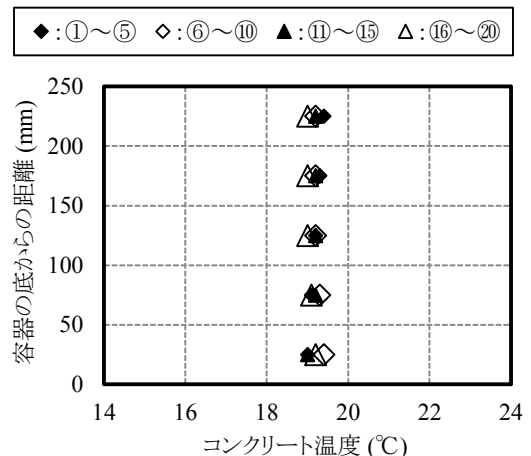


図-6 温度分布 (試料温度約 20°C, 60 分)

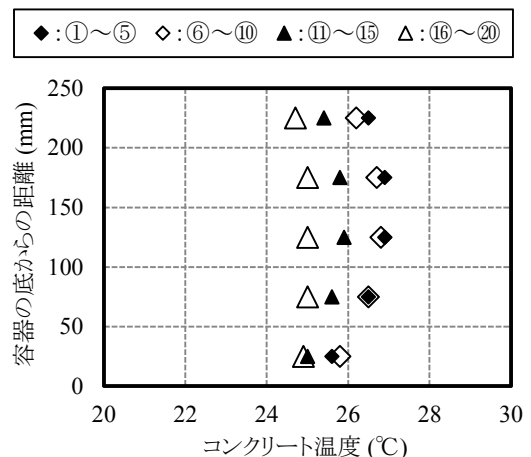


図-7 温度分布 (試料温度約 30°C, 60 分)

心付近で最大となる分布を示した。したがって、上面および側面のコンクリートが冷却される状況であることから、熱対流が起こるとすれば、試料温度を約 30℃とした場合には、中心部の領域で上昇流、外側の領域で下降流が生じることとなる。しかし、既に述べたように外側の領域 3 でブリーディング量が少なくなることにはなかつたため、熱対流がブリーディング水の移動に関与する結果ではなかつた。

3.4 型枠界面の水の移動

流体力学の見地から、型枠界面に生じる摩擦の影響について以下に考察を述べる。ここでは、既往の研究⁹⁾において型枠界面の領域の水の流れを管路の層流として扱っていることから、これに倣うこととする。

管路の層流はハーゲン・ポアズユ流れと呼ばれ、摩擦抵抗を表す無次元量として、摩擦損失係数を式(2)によって与えている⁴⁾。

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

ここに、 f ：摩擦損失係数、 $Re (= Ud/\nu)$ ：レイノルズ数、 U ：流速、 d ：管径、 ν ：動粘性係数である。

いま、摩擦損失係数に影響を与える因子として、水の動粘性係数に着目する。水の動粘性係数は温度に依存した物性値であり、図-8 に示すように、温度が高くなるほど小さい値を示す⁵⁾。したがって、水温が高いほどレイノルズ数は大きくなり、摩擦損失係数は小さくなる。水温が 20℃および 30℃であるときの動粘性係数は、それぞれ $1.004 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 、 $0.801 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ である。この値を踏まえて、ブリーディング水が移動する速度と水みちの管径が一定であると仮定すると、水温が 20℃のときの摩擦損失係数と水温が 30℃のときの摩擦損失係数の比は、およそ 1 : 0.8 となる。すなわち、コンクリート温度が高いほどブリーディング水が移動しやすいこととなる。図-3 と図-4 を比較すると、採取時のコンクリート温度が約 10℃高い方が、型枠界面付近のブリーディング量の割合が多くなり、摩擦の影響の温度依存性が確認できる。図-2 に示したように、温度が低い条件で領域 3 のブリーディング量の割合が多くなったことに関しては、別途検討を要する。ただし、ブリーディング水の移動は伝熱や水和の進行、骨材や混和材料の影響⁶⁾を受けて、流速や水みちの幅といった条件が複雑に変化する可能性がある。

4. 温度計測結果の妥当性

本実験の条件下では、主として熱伝導が伝熱を支配していることを述べた。ブリーディング試験と同様に、

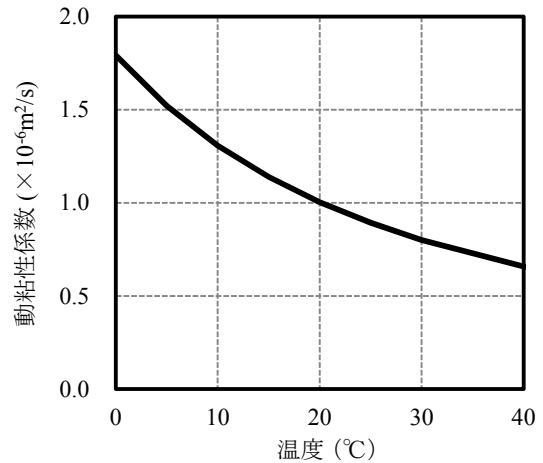


図-8 水の動粘性係数

表-4 熱伝導解析の条件

項目	記号	設定値
比熱 ^{**}	c	1050 (J/kg°C)
熱伝導率 ^{**}	κ	2.6 (W/m°C)
密度 (実配合の値)	ρ	2293 (kg/m ³)
型枠界面の熱伝達率 ^{**}	h	14 (W/m ² °C)
中心からの距離の刻み	Δr	0.00625 (m)
時間の刻み	Δt	10 (s)

※ コンクリート標準示方書[設計編]の参考値で、熱伝達率はメタルフォームの値とした。

温度計測の妥当性に関しても試験数を増やして検証することが望ましいが、熱的性質を表-4 に示すように仮定し、異なる 2 つの目標温度 10℃および 30℃の場合を対象に式(3)を支配方程式とした熱伝導解析を行い、本実験結果の妥当性について評価することとした。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\kappa}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (3)$$

ここに、 $\theta(r, t)$ ：温度、 t ：時間、 r ：中心からの距離、 κ ：熱伝導率、 c ：比熱、 ρ ：密度である。

式(3)は極座標の一次元熱伝導方程式であり、簡単のため、水和による発熱は考慮されていない。

型枠界面の熱伝達によって流出する熱量と熱伝導によって移動する熱量は、それぞれ式(4)および式(5)のように表される。

$$q_1 = h \cdot (\theta_0 - \theta_{ext}) \quad (4)$$

$$q_2 = \frac{\kappa}{\Delta r} \cdot (\theta_1 - \theta_0) \quad (5)$$

ここに、 q_1 ：熱伝達による熱量、 q_2 ：熱伝導による熱量、 h ：熱伝達率、 θ_0 ：境界の温度、 θ_1 ：境界近傍の温度、 θ_{ext} ：外部温度（20℃）である。

熱伝達と熱伝導の熱平衡を考えると $q_1 = q_2$ であるので、境界条件として式(6)を用いた。

$$\theta_0 = \frac{\theta_{ext} + \alpha\theta_1}{1 + \alpha} \quad \left(\alpha = \frac{\kappa}{h\Delta r} \right) \quad (6)$$

なお、初期条件は全 20 箇所の初期温度の平均値とし、 $\theta(r,0) = 12.2^\circ\text{C}$ あるいは 28.3°C とした。

式(3)を差分化した式(7)を漸化式として、表-4 に示す条件で陽解法による数値計算を行った。

$$\theta_{i,j+1} = \beta \left\{ \left(1 - \frac{1}{2i} \right) \theta_{i-1,j} + \left(\frac{1}{\beta} - 2 \right) \theta_{i,j} + \left(1 + \frac{1}{2i} \right) \theta_{i+1,j} \right\} \quad \left(\beta = \frac{\kappa}{c\rho} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2} \right) \quad (7)$$

領域 1 の①～⑤と領域 3 の⑯～⑳の温度計測結果からそれぞれ平均値を求め、この値を中心部と型枠界面近傍の実験値とし、計算値と比較した結果を図-9 に示す。初期条件を全 20 箇所の初期温度の平均値としていること、上下方向の熱伝導を考慮していないことから、経過時間 60 分までの解析精度は劣るが、経過時間 60 分以降は実験値と解析値が概ね一致した。経過時間 180 分以降で中心部の実験値が解析値をわずかに上回る傾向にあるのは、水和による発熱を考慮せずに計算したためと考えられるが、その影響は小さかった。以上により、本実験における温度計測の結果は、概ね再現性があるものと考えられる。

5. まとめ

コンクリート温度が約 10～30℃である試料を用いて、環境温度 20℃の条件で取水する領域面積を 3 等分割したブリーディング試験を実施した結果、以下に示す知見を得た。

- (1) コンクリート温度が環境温度以下である場合、型枠界面に近い領域でブリーディング量が少なくなる結果となった。これは、型枠界面の粗度や温度に依存した水の移動のしやすさが影響しているものと考えられる。
- (2) コンクリート温度が環境温度よりも高い場合、中心部の領域でブリーディング量がわずかに少なくなる傾向が見られた。これは、ブリーディング

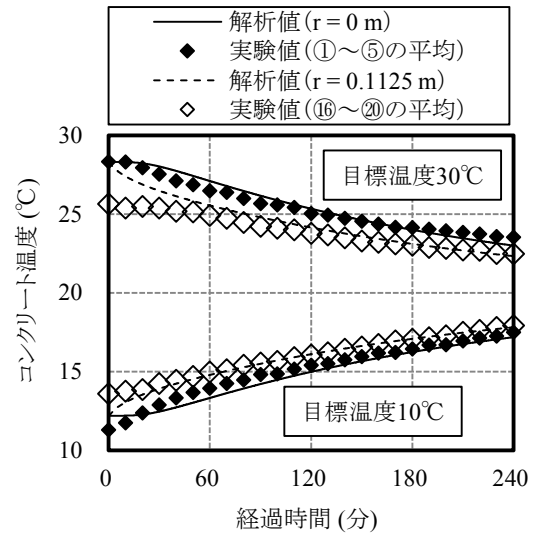


図-9 コンクリート温度の経時変化

水の移動を阻害する水和物の生成が、温度が高い中心部ほど進行した、あるいは、型枠界面で水が移動し易い条件であったためと考えられる。

- (3) 水和熱の影響が小さい条件下のコンクリートのブリーディング試験においては、伝熱は主として境界条件に依存した熱伝達および材料の物性値に依存した熱伝導が関与していると思われる。

参考文献

- 1) 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, pp.385-397, 2015.
- 2) 樫村啓ほか：ブリーディング試験における型枠の材質および内径の相違がブリーディング性状に及ぼす影響，「コンクリートのブリーディング制御」に関するシンポジウム論文集，pp.87-90, 2016.3
- 3) 川里麻莉子ほか：モルタル断面内の温度勾配がブリーディング水の発生に及ぼす影響に関する検討，「コンクリートのブリーディング制御」に関するシンポジウム論文集，pp.101-104, 2016.3
- 4) 日野幹雄：明解水理学，丸善，pp.87-91, 2001.2
- 5) 国立天文台編：理科年表平成 26 年（机上版），丸善，pp.389-390, 2013.11
- 6) 辻正哲，坂井秀紀：ブリーディングの発生機構に関する基礎的研究，セメント技術年報，第 37 巻，(社)セメント協会，pp.229-232, 1983.
- 7) 吉澤千秋ほか：高炉スラグ細骨材とフライアッシュを使用したコンクリートの性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.64-69, 2014.