

# 論文 暑中コンクリート運搬時の温度低下方法に関する提案とその実用化

増山 直樹<sup>\*1</sup>・湊 翔太<sup>\*2</sup>・岡本 享久<sup>\*3</sup>・金子 寿男<sup>\*4</sup>

**要旨:** 夏季にレディーミクストコンクリート工場からコンクリートを運搬した場合、コンクリート温度が 35 度以上の温度となる可能性がある。コンクリートが 30℃を超えるとスランプの低下、連行空気量の低下など、諸性状の変化が顕著になる。そこで、本研究では運搬中のコンクリートアジテータ車内のコンクリートの温度上昇を抑制するシステムの提案をするものである。夏季にアジテータ車ドラム内にミスト機器、換気用機器を使用し、ドラム内空気を冷却、循環する実験を行った。その結果、運搬時間中(90 分間)のアジテータ車ドラム内のコンクリート温度の上昇を抑制することができた。

**キーワード:** 暑中コンクリート, コンクリート温度, ドラム内温度, 外気温度, アジテータ車, ミスト

## 1. はじめに

フレッシュコンクリートをトラックアジテータ車で運搬中、運搬時間及び気象条件等の影響により、品質特性値(スランプ・コンクリート温度・空気量)が経時的に変化する。特に夏季は、外気温度や太陽光の輻射熱の影響を受けドラム内部が高温度になり、コンクリートに伝わる。熱を吸収し続けたコンクリートは温度が上昇し、スランプ、空気量など経時変化が大きくなる。それによって、打設後のフレッシュコンクリートにひび割れの発生、長期強度低下などの悪影響を与えることが懸念されている。

コンクリート標準示方書では、「コンクリートの運搬は、コンクリートの温度上昇および乾燥が生じないような装置、方法によらなければならない。」<sup>1)</sup>としている。そこで本研究では、暑中コンクリートによる経時変化を抑制するためにドラム内にミストを送風し、コンクリート温度上昇の防止、コンクリートの乾燥を防止することを目的とし実験を行った。夏季における暑中コンクリートの問題点は、コンクリート温度が高くなりセメントの水和反応が急速に進む。これに伴いコンクリートの凝結が早くなり運搬中の水分蒸発と相まってスランプの低下が大きくなり、長期強度の低下、乾燥に伴うひび割れの発生を引き起こす。<sup>2)</sup>これらの問題の防止を目的としている。また、暑中コンクリートは 35℃以下でないと施工出来ないと規定されている。

これまでの論文によると、「ドラム内のコンクリートへの熱の伝達は、ドラム内の空気を介するというよりも、主として直接ドラムを介して行われている」<sup>3)</sup>とされている。しかし、著者らはドラム内の空気が一番の影響要因ではないかという視点で実験、研究を進めた。

## 2. 実験概要

### 2.1 概要

コンクリート温度の上昇を防ぐため、アジテータ車ドラム内にミストを送風して実験を行う。その上で練り混ぜ直後 0 分、30 分後、60 分後、90 分後のコンクリート温度、且つ品質特性値を測定し、90 分後のコンクリート温度を 35℃以下に抑えることを目標としている。

今回の研究では 2 度の実験を行った。1 度目の実験は屋外で可傾式ミキサを用いることによって、アジテータ車を想定したスケールの縮小実験である。スケールエフェクトが想定されるが、ある程度の傾向を見るための実験である。2 度目の実験は 1 度目の実験を生かし、アジテータ車を用いた実機実験である。

本研究の趣旨としては、熱された空気を送風したエアで取り去り、エアで失われた分の湿度をミストで補うといった理論によりミストを送風する。ミストは霧状で気化しやすく、気化することによる気化熱によってコンクリート温度を冷やす役割も補っている。さらにミストを使用していることによる「加水」の有無を単位水量、圧縮強度から判断した。単位水量測定には、高周波加熱法(電子レンジ法)を使用した。外気温度、外気湿度、ドラム内温度、ドラム内湿度を測定する温湿度計はデジタル式を使用しすべて統一した。

### 2.2 使用材料及び使用配合

使用材料および、使用配合はそれぞれ表-1、表-2 の通りである。使用配合および使用材料は一般に出荷されている代表的な生コンクリートの配合および、材料を使用した。

\*1 立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 (正会員)

\*2 立命館大学 理工学部環境システム工学科

\*3 立命館大学 理工学部環境システム工学科教授 工博 (正会員)

\*4 近江アサノコンクリート株式会社 代表取締役 専務 (正会員)

表-2 使用配合

配合名	%		単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 剤
	W/C	S/a	W	C	S	G	AE 減水剤	
24-18-20N	55.4	48.6	184	332	833	917	4.648	1.0A

表-1 使用材料

材料	主な特性
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材 (S)	滋賀県信楽産砕砂 密度：2.58g/cm <sup>3</sup>
45%粗骨材 (G)	三重県拓殖産砕石 密度：2.69g/cm <sup>3</sup>
55%粗骨材 (G)	三重県拓殖産砕石 密度：2.70g/cm <sup>3</sup>

表-3 SDM 能力値

名称	スーパードライミスト (SDM150)
平均粒径	9μ m
噴霧量	85ml/min(5h/h)
吐出空気量	200L/h
吐出圧力	0.4MPa
主な特徴	電子エア制御(100V 電源仕様) コンプレッシャー使用(200V 電源使用)

### 2.3 使用機器

今回の実験で使用した機器はスーパードライミスト (以下 SDM と表記), エアフォグアドマイザー (以下 AFA と表記), および換気用ファンの 3 種類である。使用機器の各能力値をそれぞれ表-3, 表-4, および表-5 に示す。

SDM, AFA はミストを発生させる機器, 換気用ファンはアジテータ車内部の空気を循環させるだけのものであり, ドラム内空気を 20 秒で完全排出する能力を持っている。これらを単独で用い実験を行った。

表-4 AFA 能力値

圧搾空気の圧力	液体(水)流量	平均粒径
0.3 MPa	2.4L/h	5.88μ m
0.2 MPa	2.4L/h	8.19μ m
0.1 MPa	2.4L/h	12.98μ m

表-5 換気用ファン能力値

	Hz	回転数(r/min)	風量(m <sup>3</sup> /min)
特性値	50	1400	28
	60	1610/1640	32
裕度	上記表示の± 60r/min		上記表示の90%以上

### 3.実験結果と考察

#### 3.1 屋外小規模実験 (以下実験 I と表記)

##### (1) 実験内容

実験 I では, アジテータ車で行わず, 可傾式ミキサ (0.120m<sup>3</sup>)を屋外の直射日光の当たる場所に設置使用し傾向を観察した。全材料投入後, 180 秒間高速(23rpm)で練り混ぜ, その後フレッシュコンクリート経時変化を確認する目的で低速攪拌(2rpm)した。試料採取は 0 分 (練り混ぜ直後), 30 分, 60 分, 90 分に行った。供試体は 0 分, 90 分に圧縮試験体 φ10×20cm を採取し, 28 日間標準養生 (20℃水中養生)し, 強度試験を行った。実験日は 2010 年 7 月 23 日に行い, 天候は晴れ, 外気温平均 35.8℃, 外気平均湿度 46.6%という環境のもとで行った。

また, 機器ごとの実験データを比較するため, SDM 仕様, AFA 仕様, 通常使用(ミスト無し)の 3 種類の実験を行った。SDM は噴霧量 58ml/min で行い, 1m以上離さなくてはミストが気化しきらないため SDM から可傾式ミキサまで 1m以上離して直接内部へ送風した。(写真-1 参照)AFA は噴霧量を 29ml/min にし, ミキサから 10cm 以上離せばミストが気化するため, 10cm 以上離して実験を行った。(写真-2 参照)



写真-1 SDM 噴霧風景



写真-2 AFA 噴霧風景

表-6 圧縮強度結果

28day		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
SDM	90 分後	29.1
AFA	0 分後	28.3
	90 分後	33.8
ミスト無し	0 分後	28.9
	60 分後	25.0

## (2) 実験結果

実験結果のコンクリート温度の経時変化を図-1、単位水量の経時変化を図-2、各採取供試体の圧縮強度を表-6 にそれぞれ記す。

図-1 を見てわかるように通常使用のミスト無しでは、コンクリート温度が上昇傾向にあるのに比べ、ミストを使用したコンクリートの温度は共に減少傾向にあるという結果が得られた。つまり、ミストを使用することでコンクリートを冷却する能力があることがわかった。

図-2 の単位水量も全てにおいて減少傾向にあるが、基準となる通常使用(ミスト無し)も同じ傾きの減少傾向にあるため、加水の問題はないものと考えられる。

表-6 の圧縮強度の結果では、それぞれに強度の差は見られるが、通常仕様のミスト無しより低い強度は得られなかった。ミスト無しのコンクリート圧縮強度では、一般的に暑中コンクリートの悪影響<sup>2)</sup>と言われている長期強度が1割程度に影響が見られた。

すなわち、図-1、図-2、表-6 の結果よりミストを噴霧することによって加水の問題なくコンクリート温度を低下させることが出来たと言える。

## 3.2 レディーミストコンクリート工場内屋外実験 (実験Ⅱ)

### (1) 実験内容

実験Ⅱでは、実際に日本全国で広く使用されているコ

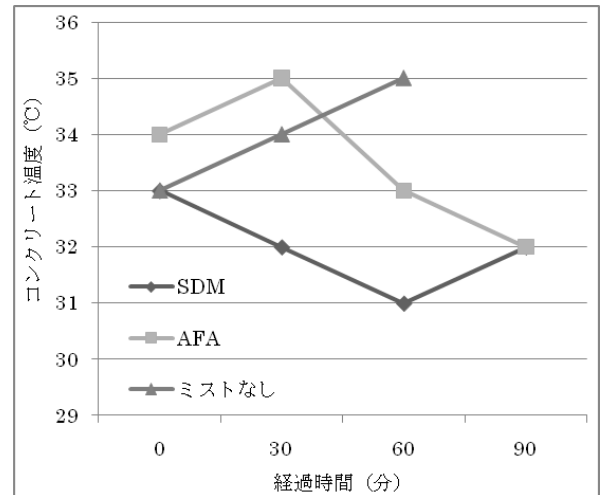


図-1 コンクリート温度の経時変化

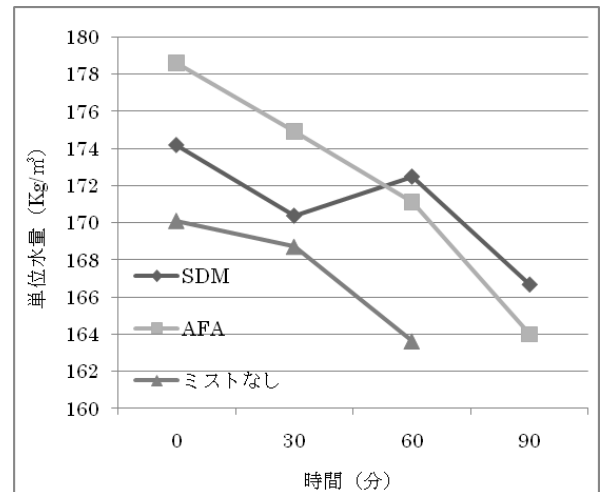


図-2 単位水量の経時変化



写真-3 換気用ファン動作風景

ンクリートアジテータ車を使用して実験を行った。アジテータ車は 10 t トラックを使用し投入するフレッシュコンクリートは 4~5m<sup>3</sup>で行った。フレッシュコンクリートはレディーミクストコンクリート工場の強制二軸ミキサで練り混ぜた後アジテータ車に積み、アジテータを行い、一般的にコンクリートが工場から現場まで運ばれる状況とほぼ同じにして実験を行った。試料採取は実験 I 同様、0 分、30 分、60 分、90 分に行った。強度用供試体、強度試験、養生条件も実験 I と同様に行なった。実験環境は、2010 年 8 月 28 日、天候は晴れ、外気温度平均 35.8℃、外気平均湿度 53.6%のもと行った。



写真-4 同時時間帯実験風景

実験 II では、今までの使用機器に加え表-5 の換気用ファンを用いて実験を行った。換気用ファンはアジテータ車内部の空気を循環させるだけのものであり、ドラム内空気を 20 秒で完全排出する能力を持っている。(写真-3 参照)

今回の実験はすべて同時時間帯に実験を開始した。(写真-4 参照) 実験毎の時刻の差は 5 分ずつ程度である。

## (2) 実験結果と考察

コンクリート温度の経時変化、単位水量の経時変化、ドラム内部温度の経時変化、ドラム表面温度の経時変化、及び圧縮強度結果をそれぞれ図-3、図-4、図-5、図-6、表-7 に示す。

図-3 のコンクリート温度の経時変化で、35℃以上の温度に到達しなかったのは SDM, 換気用ファンの二つだけであった。当日の外気温度が 35℃以上をゆうに超えていたため SDM のミストの気化率が上がり効果的に温度上昇を抑制できた結果となった。AFA は SDM に比べ能力的に劣っていたため温度の上昇を抑制できなかったものと考えられる。

換気用ファンの結果からコンクリートの温度上昇を抑制するためにはドラム内部温度を冷却するだけでなく、ドラム内空気を循環させ温度を一定に保つだけで十分な効果が得られることがわかった。

図-4 の単位水量の経時変化ではミスト無しの 0 分、30 分では測定誤差が見られたがすべての項目で 90 分後まで横ばいの経時変化が見られ、単位水量が配合の 184kg/m<sup>3</sup>を超えた項目が見られなかったため、加水の可能性はなくミストはドラム内で気化されたものと考えられる。

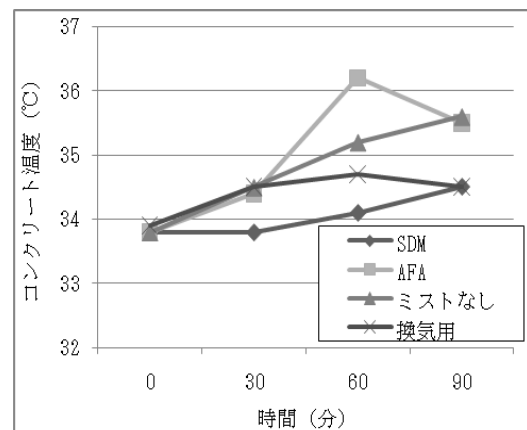


図-3 コンクリート温度の経時変化

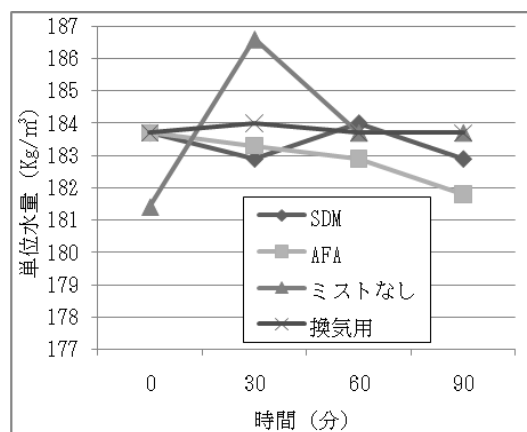


図-4 単位水量の経時変化

表-7 圧縮強度結果

試料採取時間	SDM		AFA		換気用ファン		通常使用	
	0分	90分	0分	90分	0分	90分	0分	90分
圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	27.7	26.9	29.1	29.8	30.6	29.8	28.8	30.6

表-7 の圧縮強度ではすべての項目で設計圧縮強度 (24N/mm<sup>2</sup>) を十分に満足することが出来た。0 分後と 90 分後では大きな強度の低下は見られず、強度の面から見ても加水は無かったものと考えることが出来る。

さらに図-3, 図-5 および, 図-6 を見てわかるようにドラム内の温度を冷やす能力が高ければ高いほどコンクリートの温度上昇の抑制能力が高いことがわかり, ドラム表面温度とコンクリート温度はほとんど関係性が見られないことがわかる。つまり, 小山らの論文にあるように「ドラム内のコンクリートへの熱の伝達は, ドラム内の空気を介してというよりも, 主として直接ドラムを介して行われていると考えたほうが自然である。」<sup>3)</sup> という考えとは異なり, ドラム内空気がコンクリート温度に対し直接影響を与えているということが判明した。

#### 4. 伝熱学的考察

現在, 今回の実験結果が得られた理由の理論的解析を試みている。(図-7 参照) 解析には伝熱学を用いて行う。計算には以下のフーリエの法則の式(1)を用いる。

$$Q = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1)$$

式内の Q は熱流束, λ は物質別の熱伝導率(W/m・K), T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> はある点とある点の温度, L は T<sub>1</sub> と T<sub>2</sub> の距離である。

$$Q_1 = -\lambda_1 \frac{T_2 - T_1}{L_1} \quad (2)$$

$$Q_2 = -\lambda_2 \frac{T_3 - T_2}{L_2} \quad (3)$$

$$Q_3 = -\lambda_3 \frac{T_4 - T_3}{L_3} \quad (4)$$

式(2), 式(3), および式(4)はそれぞれドラム表面(鉄), ドラム内空気, およびコンクリートの熱量を求めるフーリエの法則の式である。図-7 のモデルのように 1 次元として解く。つまり, 熱量はすべて 1 方向へ伝わるものとする。すなわち, Q が変化することはないことがわかるので, 熱収束は式(5)のように Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, および Q<sub>3</sub> はすべて等しくなる。

$$Q = -\lambda_1 \frac{T_2 - T_1}{L_1} = -\lambda_2 \frac{T_3 - T_2}{L_2} = -\lambda_3 \frac{T_4 - T_3}{L_3} \quad (5)$$

この式の T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> を消去すると式(6)が得られる。

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3}} \quad (6)$$

式(6)を用いて, ドラム表面温度を外気温度と同じ 36°C とし, 実験 II の結果と同じ, コンクリートの温度を 35.5°C の場合(ケース I), 34.5°C の場合(ケース II)で考える。

これらと表-8 の数値を代入し解くと, ケース I で熱流束が 9985×10<sup>-9</sup>W/m・K, ケース 2 で 29956×10<sup>-9</sup>W/m・K

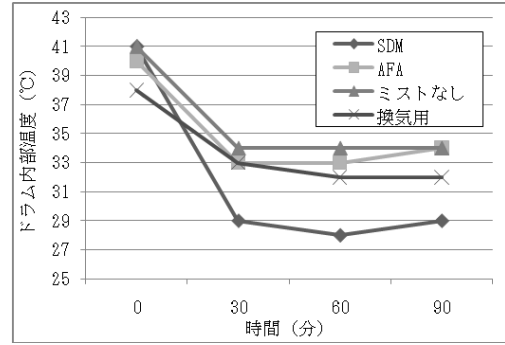


図-5 ドラム内部温度の経時変化

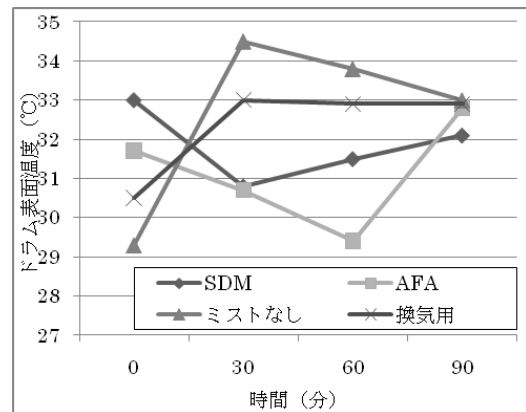


図-6 ドラム表面温度の経時変化

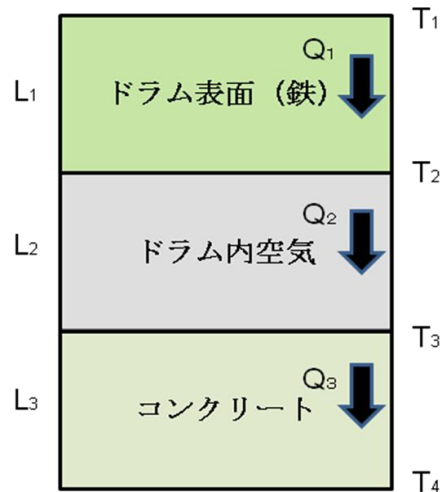


図-7 伝熱学モデル I

表-8 使用する諸数値

	熱伝導率 λ	距離・厚さ (mm)
コンクリート	1.6	900
鉄	84	4
空気	0.0241	1200
水	0.6	無し

となる。その差は  $19971 \times 10^{-9} \text{W/m} \cdot \text{K}$  となり、 $35.5^\circ\text{C}$  から  $34.5^\circ\text{C}$  に冷却するにはそれだけの熱流束が必要となることがわかる。すなわち、このスケールで  $1^\circ\text{C}$  冷却するには  $19971 \times 10^{-9} \text{W/m} \cdot \text{K}$  の熱流束が必要だということもわかる。

現在の解析で分かっていることはここまでであるが、実際の実験のようなスケールとはなっていない。モデル I ではドラム内の空気を流体として考えておらず熱伝導として考えている。実際にはドラム内の空気はドラム内のブレードにより流れることによって、乱流が起きているので対流熱伝導として考えなくてはならない。熱伝導とは物質と物質の間の温度勾配による熱移動であるが、今回の実験のような熱伝達では、物体と流体間での熱移動の解析となるということである。さらに実際には太陽からの直射日光による輻射熱が関わっており、ドラム表面に対し一定の熱量を供給していることも考慮しなくてはならない。

現在これらを踏まえた図-8 の様な円筒座標系の 1 次元強制対流熱伝達について解析中である。その上で、ある外気温の場合コンクリートを  $35^\circ\text{C}$  以下に保つには、ミストの気化熱がどれだけ必要なのか、換気用ファンでどれだけ温度まで維持可能なのかを解析中である。

## 5. まとめ

可傾式ミキサを用いた実験 I および、アジテータ車を用いた実機実験 II によって得られた結果を以下にまとめる。

(1) 可傾式ミキサを用いたことによってスケールが小さくならうと、通常仕様(ミスト無し)では、一般的な暑中コンクリートによる悪影響が見られたにもかかわらず、ミスト機器を使用することでコンクリートを十分に冷却することができる。さらに、単位水量の視点からも、圧縮強度の視点からもミストを使用することによる加水の問題は無く、すべてのミストは気化したものと考えることができる。

(2) アジテータ車にミスト機器、換気用機器を用いることで、機器の性能にもよるが 90 分間の輸送時間中コンクリート温度上昇を抑制できる。アジテータ車に諸機器を用いた場合でも、単位水量、圧縮強度の視点からミストを使用することによる加水の問題は無く、すべてのミストは気化したものと考えられる。

(3) 暑中コンクリート運搬中のアジテータ車内のコンクリートの温度上昇の要因は、今まで一般的に「ドラム内のコンクリートへの熱の伝達は、ドラム内の空気を介してというよりも、主として直接ドラムを介して行われていると考えられる。」<sup>3)</sup>とされていたが、本研究の結果により、ドラム内空気がコンクリート温度に対し直接

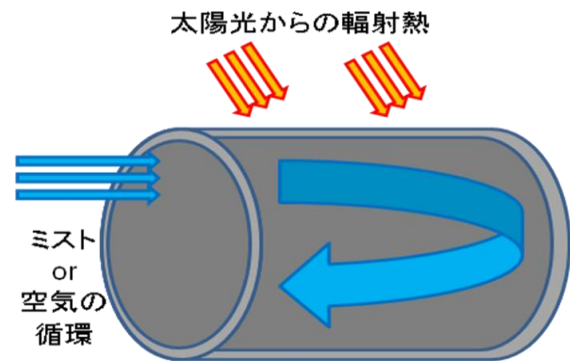


図-8 伝熱学モデル II

影響を与えていると考えることができる。

以上の結果より、ミスト機器もしくは、換気用機器を用いることによって 90 分間の輸送におけるコンクリート温度の上昇を抑制することができると言える。

これまでにコンクリート温度の上昇を抑制しようと配合に水ではなく氷を用いたり、ドラム表面に遮熱塗料を用いたり、ドラム内部に液体窒素を投入したり様々な方法でアプローチがされてきたが、コストの面や抑制能力の面から実用化へはつながっていない。今回使用した換気用ファンを用いれば安価で、能力的にも優れている。ミストを用いた場合も、換気用ファンを用いた場合より少しコストはかかるが、エアーコンプレッサーと水を使用しているだけであり、環境にも能力的にも優れたものである。

これらから、本論文はこの 2 つの方法を提案するものであり、実用化を推すものである。

## 謝辞

本論文作成に当たり、立命館大学理工学部機械工学科准教授：後藤田浩先生、立命館大学総合理工学研究機構：竹内正喜先生、および近江アサノコンクリート株式会社様には多大なる御指導並びに御協力を頂きました。ここに記し、感謝の意を表し謝辞とします。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書(2007 年制定)、土木学会出版、pp.167-171、2007.3
- 2) A.M.Neville (三浦 尚 訳)：ネブルのコンクリートバイブル、技報堂出版、pp.449-471、2004.6
- 3) 小山 智之・小山田 英弘：暑中コンクリートと九州、コンクリート工学、Vol.48, No.1, pp.84-88、2009.1