

暑中コンクリートの温度推定式に関する研究：推定式 中の係数 α 、 β に関する実機実験

大熊，良典
九州大学工学部建築学科

小山，智幸
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

小山田，英弘
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 | 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

北山，博規
鹿島建設株式会社

<https://doi.org/10.15017/19140>

出版情報：都市・建築学研究. 16, pp.133-140, 2009-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

暑中コンクリートの温度推定式に関する研究 —推定式中の係数 α , β に関する実機実験—

The Equation Estimating Temperature of Hot Weather Concrete
—Real Size Experiments on Coefficient α and β in the Equation—

大熊良典*¹, 小山智幸*², 小山田英弘*², 北山博規*³

Ryosuke OKUMA, Tomoyuki KOYAMA, Hidehiro KOYAMADA
and Hironori KITAYAMA

On hot weather concreting, time-dependent change of fresh concrete temperature should be estimated to prevent troubles, such as slump down and/or cold joint, etc., caused by temperature rise. In this study, the coefficient α and β in the equation estimating fresh concrete temperature shown in JASS 5 were measured and discussed by the real size experiments. The coefficient β , that was the temperature rise due to the heats caused by the mixer, cement hydration and friction of materials while mixing, was smaller than the values in JASS 5, because mixing period was steadily shortened reflecting the advance of mixers. The coefficient α , that showed heat transfer among air and concrete, was not affected by slump values, ratio of concrete quantity against agitator capacity, etc. That was the different tendency against the small scale experiments.

Keywords : Hot Weather Concrete, Equation Estimating Temperature, Real Size Experiment

暑中コンクリート, 温度推定式, 実機実験

1. はじめに

暑中環境下で製造, 施工されるコンクリートは, 主として高い外気温の影響でコンクリートの温度が高くなるため, 初期の水和反応が促進され, スランブロスが大きくなる, コールドジョイントが生じやすくなる, 初期ひび割れが生じやすくなるといった不具合を生じる。また長期にわたる硬化体組織の密実性の向上が通常期のコンクリートと比較して鈍化するため, 長期強度の増進が少なくなる, 耐久性が低下するなどの問題が生じる¹⁾²⁾。

このような暑中コンクリート工事における種々の「わるさ」は, 主としてコンクリート温度が高いことに端を発することから, 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 (以下 JASS 5)¹⁾ や暑中コンクリートの施工指針・同解説 (以下暑中指針)²⁾ では荷卸し時のコンクリート温度の上限値を 35°C とするよう規定している。また上記仕様書・指針ではこの温

度を満足するよう, 現場への運搬時におけるコンクリートの温度上昇を考慮して練上がり温度の目標値を定めることとしている。JASS 5 解説 (暑中指針では 4.3.b 本文) には, その際に用いることのできる, コンクリート温度の推定式が示されている。同式中には, 係数 α , β が含まれ, α は外気とコンクリートとの間の熱の伝達のしやすさを表す係数, β はセメントの水和熱および材料間の摩擦熱などによる温度上昇量を表している。両者については実験室レベルでは比較的多くの検討が行われ³⁾, その値が示されているが, 実機レベルでの測定は稀少であり, JASS 5 解説に示されている沖縄県のレディーミクストコンクリート工場での実測例や, 船本らの実験⁴⁾ は貴重な例である。

本研究は, 上記温度推定式の係数 α , β について, 実機レディーミクストコンクリート工場での練混ぜや, トラックアジテータを用いた運搬を行って, 材料やコンクリート温度ならびにその経時変化を実測し, 係数 α , β の値やこれらに影響を及ぼす種々の要因の検討を行ったものである。

*1 工学部建築学科

*2 都市・建築学部門

*3 鹿島建設(株)

2. コンクリート温度の推定式

JASS5 や暑中指針に示されている、コンクリート温度の推定式を式(1)に示す。同式は、練上がり後、トラックアジテータなどで運搬されるコンクリート温度の単位時間当たりの変化量が、外気温とコンクリート温度との差に比例すると仮定して得られたものである³⁾。

$$\theta(t) = (\theta_0 - \theta_r + \beta) \cdot \exp(-\alpha t) + \theta_r \quad (1)$$

ここに、

$\theta(t)$: 時刻 t におけるコンクリート温度 (°C)

θ_0 : 式(2)で求められる温度 (°C)

θ_r : レディーミクストコンクリート出荷時の外気温 (アジテータドラム内の空気温度) (°C)

α : 外気とコンクリートとの熱の伝達の割合を表す係数 (1/時間)

β : セメントの水和熱および材料間の摩擦熱による温度上昇量 (°C)

t : 運搬時間 (時間)

$$\theta_0 = \frac{\alpha_c \theta_c W_c + \alpha_a \theta_a W_a + \alpha_m \theta_m W_m}{\alpha_c W_c + \alpha_a W_a + \alpha_m W_m} \quad (2)$$

α_c, θ_c, W_c : セメントの比熱(0.836kJ/kg・K), 温度(°C), 質量(kg)

α_a, θ_a, W_a : 式(3)で算出される含水状態での骨材の比熱(kJ/kg・K), 温度(°C), 骨材の質量(kg)

α_m, θ_m, W_m : 水の比熱(4.18kJ/kg・K), 温度(°C), 質量(kg)

$$\alpha_a = \frac{\alpha_{a0} + \alpha_m \mu_a + \alpha_m f_a (1 + \mu_a)}{(1 + f_a)(1 + \mu_a)} \quad (3)$$

α_{a0} : 絶乾状態の骨材の比熱(0.836kJ/kg・K)

μ_a : 骨材の吸水率(%)×1/100

f_a : 骨材の表面水率(%)×1/100

θ_r は、厳密にはアジテータドラム内の空気温度で、直射日光やトラックアジテータの発生熱により外気温よりも一般的に高くなっており、とくに晴天時にコンクリートを運搬する場合は、 θ_r は外気温よりも高い値とする必要がある¹⁾²⁾が、具体的に何°C高くすべきか明記されていない。

また、練上がり温度は、式(1)において運搬時間 $t=0$ として、 $\theta(0) = \theta_0 + \beta$ から求められる。 θ_0 は、「1993年版 JASS5 に規定されていた推定式により求められる練上がり温度であるが、同解説にも示されていたように実際の練上がり温度は、セメントの加水直後の水和熱や機

械的に生じる熱が加算されるため推定値よりも若干高い値になる。この値は 2~3 °C に達する場合もあり、暑中コンクリートではこの値が無視できないため、 β によりこれらの影響を考慮した。 β の値は調合や使用するコンクリートミキサの種類によって変化し、水セメント比が小さく、単位セメント量が多くなるほど大きくなる。」¹⁾²⁾とされている。

また、係数 α は、外気とコンクリートとの間の熱の伝達のしやすさを表す係数であり、この値が大きくなるほどコンクリート温度 $\theta(t)$ は短時間に θ_r に近づくことになる。したがって係数 α は、トラックアジテータの種類や運搬可能容量と運搬量の関係、さらにはコンクリートのスランプ値によって変化し¹⁾²⁾、実験室内での結果では 0.3~0.9 の値を示し、運搬可能容量に対する運搬量の割合が少なく、また運搬されるコンクリートのスランプが小さいほど、係数 α は大きくなる傾向を示した³⁾。

しかし実際に実機レディーミクストコンクリート工場で測定した際の β や、トラックアジテータで運搬した際の α の測定値は少なく、沖縄県のレディーミクストコンクリート工場での実測例¹⁾²⁾や、筆者らが α について島原地域で行った実験³⁾、および船本らの実験⁴⁾のほかは見あたらない。また、最初の例¹⁾²⁾では材料温度の測定位置や方法が明記されていない、特に α の値について条件の違いによる大小関係が論理的に説明しにくいものとなっているなどの問題点もあり、普遍的な値を定めるには至っていない。したがって本研究では、夏期に福岡県においてレディーミクストコンクリート工場の協力を得て α 、 β それぞれに関する実機実験を実施して種々の検討を行った。

3. 温度推定式の係数 β に関する実機実験

3-1 実験概要

係数 β に関する実機実験は福岡市近郊のレディーミクストコンクリート工場で、2008年8月20日に実施した。使用材料の温度ならびに練上がり時のコンクリート温度の測定場所および測定方法を表1に示す。材料温度は可能な限り練混ぜ直前に測定すること、ならびにコンクリート温度はできるだけ練上がり直後に測定することを目標とした。測定方法は、基本的には熱電対を所定の位置に常時配線しデータログで自動測定した。測定間隔は4秒おきとした。練混ぜ水は、計量槽で化学混和剤と混合された状態で測定した。セメントは密閉された計量瓶の中に熱電対を常時挿入して測定した。骨材の場合は、計量瓶に熱電対を常時配線しておく骨材排出の際に熱電対が切断されてコンクリートに混入するなど種々のトラブルの発生するおそれがあったので、熱電対は貯蔵瓶に配線し測定した。これと比較するために計量瓶に投入される際の骨材の温度を、デジタル温度計で手動測定し

表1 使用材料およびコンクリート温度の測定場所ならびに方法

	測定場所	測定方法等	頻度
水	計量槽	熱電対+叩	4sec おき
セメント	計量瓶	熱電対+叩	4sec おき
骨材	貯蔵瓶	熱電対+叩	4sec おき
	計量瓶	デジタル温度計	計量時
コンクリート	ミキサ下のホッパ	熱電対+叩	4sec おき

表2 使用材料

	種類	物性等
セメント	A:普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³
	B:高炉セメントB種	密度 3.05 g/cm ³
水	上澄水	—
細骨材	A:玄界産海砂(粗砂)	表乾密度 2.57g/cm ³ 吸水率 1.41% 表面水率 2.1%
	B:玄界産海砂(細砂)	表乾密度 2.57g/cm ³ 吸水率 1.41% 表面水率 1.0%
粗骨材	A:山口産碎石	表乾密度 2.70g/cm ³ 吸水率 0.38% 表面水率 0.0%
	B:津久見産碎石	表乾密度 2.70g/cm ³ 吸水率 0.40% 表面水率 0.0%
混和剤	A:高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
	B:高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系

表3 コンクリートの調査

呼び強度	Sl. (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単体量(kg/m ³)				混和剤
				C	W	S	G	
①	40	18	40.8	A:440	176	A:470 B:200	A:664 B:359	A:3.300
②	42	21	45.3	B:448	170	A:519 B:224	A:613 B:329	B:5.488

*空気量はいずれも 4.5%

*A, B の記号は材料毎に表 2 の記号に対応

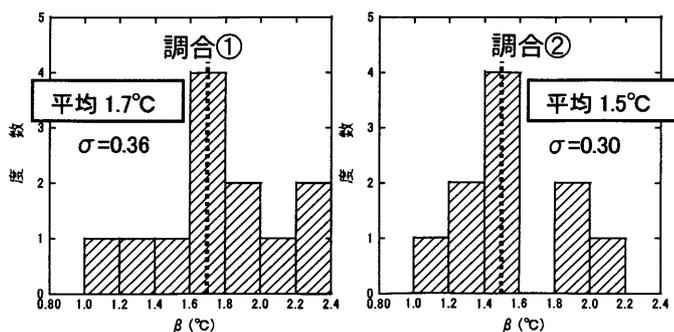


図1 βの測定値の度数分布

た。手動測定では棒状のサーミスタを、約 1.5m の棒の先に固定して、計量瓶中の骨材に差し込んだ。なお、骨材は細骨材が粗・細の二種類、碎石も二種類で計 4 個の計量瓶でそれぞれ温度を測定した。コンクリートの練上がり温度はミキサ直下のホッパで、トラックアジテータに排出される直前に測定した。なお計量瓶における熱電対を用いた連続測定では、計量瓶内に材料が充填されていないときの温度も測定されてしまい、どのデータを材料温度として用いるか判断する必要がある。本研究では、例えばセメントの場合、計量時にセメントが貯蔵瓶から計量瓶に投入された直後から計量瓶内の熱電対の温度測定値が上昇して一定値となること、そしてセメントが計量瓶からミキサに排出された直後に温度測定値が低下することを利用した。すなわち、セメントが計量瓶に投入された後の、排出直前の値をセメントの温度とした。水の場合は、温度が外気温よりも低いため、計量瓶に投入された直後に熱電対の温度測定値は低下することになる。なお最終的には当日の出荷記録も参考にして、材料の投入および排出の判断を行った。測定は当日当該工場で出荷のあったコンクリートのうち 2 種類を対象に行った。コンクリートの使用材料を表 2 に、調査を表 3 に示す。当日の天候は曇り、気象庁発表の日平均気温、最高気温、最低気温はそれぞれ 27.2、30.3、24.7°C、データ採取を行った午前 11 時から 14 時頃までの気温は 29.4~30.2°C の範囲であった。

3-2 実験結果および考察

今回の測定時間内での測定結果では、調査①についてはセメントの最高温度が 54.7°C で平均値は 50.5°C、コンクリートの練上がり温度の最高値が 33.8°C で平均値は 33.1°C であった。サンプル数は 12 である。調査②についてはセメントの最高温度が 54.8°C で平均値は 51.0°C、コンクリートの練上がり温度の最高値が 33.9°C で平均値は 33.2°C であった。今回、セメントの温度は種類の違いによる差は小さかったが、別の工場で行った測定では 10°C 以上の差が生じることもあった。また、他の材料温度は外気温と同程度か若干低い値であった。なお骨材温度は、計量瓶でデジタル温度計を用いて手動測定した結果と、計量瓶上部の貯蔵瓶で熱電対を用いて自動測定した結果を比較したところ、今回測定を行った短時間の間にも 1~2°C 程度の差があったため、温度推定式には計量瓶で手動測定した値を用いた。コンクリート単体積あたりの骨材の使用量は他の材料よりも圧倒的に多いため、骨材温度の測定誤差が β の値に及ぼす影響はかなり大きく、試算を行った例では全骨材の温度誤差が 1.0°C あったとき β の算定結果の差は 0.5°C にもなった⁹⁾。また JASS 5 解説では、コンクリートの練上がり温度は、「一般に平均気温より 5°C 程度高くなる」とされているが、今回

の結果は練上がり温度の平均値で上記の値とほぼ同じ6.0°C程度、最高値で平均気温よりも6.7°C高くなっていた。

図1に β の全測定値の度数分布を示す。測定で得られた β の値は、ばらつきはあるものの、調合①では1.0~2.3°C、調合②では1.0~2.0°Cの範囲内であった。JASS5に示される β の値(1.8~3.4°C)と比べるとやや小さめの値となった。両調合とも水セメント比が小さく単位セメント量が比較的多いため β の値が大きくなりやすい条件であることを考慮すると、今回の値はJASS5の値よりもかなり小さいものであると判断される。また、 β の測定値の平均値は、調合①では1.7°C、調合②では1.5°Cとなっている。両調合で水セメント比や単位セメント量が同程度であること、また単位セメント量が比較的多いためセメント種類の差が出やすい条件であることを考慮すると、セメントの種類の違いが β の値にあまり影響していないことが明らかである。先に示したように β は、セメントの加水直後の水和熱や機械的に生じる熱により生じる温度上昇であり、調合やミキサの種類によって変化し、水セメント比が小さく、単位セメント量が多くなるほど大きくなる¹⁾とされる。今回上記のような結果が得られた理由として以下のように考察した。JASS5の実機データが得られた1990年初頭のコンクリートの練混ぜ時間は1~2分程度である。これに対して近年のミキサはコンクリートの高強度化や高流動コンクリートへの対応のため練混ぜ能力が向上し、一般的な調合のコンクリートの練混ぜ時間は1分未満であることが多い。今回の測定では約40秒でありコンクリートがミキサ内に滞留している時間が短く、練混ぜ中の材料どうしの摩擦熱や機械熱、ならびにセメントの水和熱の影響を相対的に受けにくくなったため、値は小さく、セメント種類による差が小さくなったものと考えられる。現在、ミキサの違いによる影響、再現性などについて検討を継続している。

4. 温度推定式の係数 α に関する実機実験

4-1 実験概要

温度推定式中の係数 α に関する実機実験は福岡市近郊のレディーミクストコンクリート工場で、2008年8月7日に実施した(3.の実験と本実験の実施工場は異なる)。実験項目の一覧を表4に示す。一台のミキサで練混ぜを行う都合上、13時にNo.2の練混ぜを開始し、以後5分おきに次のNo.の練混ぜを開始した。No.1の水のみを用いたものは13時以前に開始している。よってNo.7はNo.2よりもちょうど30分遅れて進行することになる。

実験では7台のトラックアジテータ(車体・ドラムの色は濃い赤褐色)を用い、表5に示す材料、表6に示す調合のコンクリートを、練上がりから120分間運搬した。そしてコンクリート温度、スランプ、空気量の経時変化

表4 実験項目の一覧

No.	W/C (%)	目標スランプ (cm)	運搬量 (m ³)	直達日射
1	(水のみ)	—	2.5	有
2	50	18±2.5	4.0	有
3				なし
4			2.5	有
5			1.0	有
6			4.0	有
7	40	18±2.5	4.0	有

表5 使用材料

	種類	物性等
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.15 g/cm ³
水	地下水、上澄水	—
細骨材	A:玄界産海砂(粗砂)	絶乾密度:2.55g/cm ³
	B:玄界産海砂(細砂)	同:2.55 g/cm ³
	C:宮若産砕砂	同:2.67 g/cm ³
粗骨材	A:古賀産砕石	同:2.78 g/cm ³
	B:宮若産砕石	同:2.68 g/cm ³
混和剤	A:AE減水剤 B:高性能AE減水剤	標準形I種 ポリカルボン酸系

表6 コンクリートの調合

	目標Sl. (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				C	W	S	G	混和剤
①	18±2.5	50	46.1	364	182	A:392 B:236 C:157	A:487 B:487	A:0.910
②	8±2.5	50	45.4	332	161	A:406 B:244 C:163	A:520 B:520	A:0.805
③	18±2.5	40	43.4	428	171	A:364 B:218 C:146	A:504 B:505	B:3.42

*目標空気量はいずれも4.5±1.5%

*A,B,Cの記号は材料毎に表5の記号に対応

を練上がり直後から30分おきに測定した。コンクリートの練上がり温度に関しては、当該工場では夏期に温度が高くなることが予想される場合には地下水などにより温度をコントロールしているが、今回は実験の目的上、荷卸し時に35°C前後となるよう、練上がり温度33°C程度を目標として調整いただいた。表4中、No.2と3で直達日射の有無の影響を、No.2,4,5で運搬量の影響を、No.2と6でスランプの影響を、No.2と7でW/Cの影響を比較することを目的とした。なお、コンクリートは、トラックアジテータ1台につき2バッチ練り混ぜ、それぞれ練上がり後直ちにアジテータに排出、所定の待機場所に移動して直ちにコンクリートを排出して練上がり直後の測定を行った。したがって、最初の測定は練上がり後5~10分となり、温度推定式を適用する際には、そのときの時間をそれぞれ運搬時間tとして用いた。コンクリー

トの採取では、ドラムを30秒程度高速回転させてからコンクリートを排出し、最初に排出される一輪車一杯分のコンクリートを廃棄し、その後の排出分を試料として用いた。コンクリート温度の測定は、長さ30cmの棒状アルコール温度計を用い、暑中指針巻末の資料1に示される「コンクリート温度の測定方法」に準じて行った。なお使用した全てのアルコール温度計は、予め検定済みの水銀温度計と35°C近辺の温度で比較して校正を行い、実測データを補正した。なお、いずれの測定も日陰で行なった。

トラックアジテータは、表4に示す設定条件により、工場内の直射日光の当たる場所、または実験中常に日陰になる場所にアイドリング状態で待機させ、ドラムは通常の運搬時と同じ速度で回転させ続けた。論文中「外気温」として用いる温度は、後者の日陰で測定した空気温度である。湿度も同様に測定した。日射量は、気象庁発表の「福岡県福岡」の1時間おきの全天日射量⁷⁾を用いることとした。

4-2 実験結果及び考察

図2に、コンクリート温度の全データの経時変化を外気温とともに示す。同様にスランプの経時変化を図3に、空気量の経時変化を図4に示している。

いずれの図においても、例えば、記号「50-18-4 有」の50は水セメント比が50%であることを、18は目標スランプの値が18cm、4はコンクリートの運搬量が4.0m³、有は直達日射が作用する条件であることを示している。

当日は昼過ぎまでは晴天であり、図2中に示すように実験開始後1時間余りは直達日射がアジテータに当たっていたが、以降急速に雲量が多くなり、14:30頃にはほぼ完全に曇天となった。これに対応して、破線で示すように外気温は、日射のある時間帯とない時間帯でそれぞれ安定しており、実験開始後1時間程度は35.0°C±1.0°Cの範囲に、その後若干上昇して37°Cに達し、曇天となった後はほぼ34.0°C±1.0°Cの範囲にあった。

JASS5解説には練上がりから荷卸しまでのコンクリート温度の上昇量は2~4°C程度¹⁾とあるが、今回のコンクリート温度の上昇量は最大で2°C程度であった。運搬の途中で曇天とならなければ温度はさらに上昇したものと予想される。コンクリート温度は日射と外気温に対応しており、ばらつきは大きいものの、実験開始後1時間程度は上昇して外気温に近づき、その後外気温の低下を追いかける形で低下しているように見える。しかし、実験中常に日陰にあった50-18-4なし(図中の○印)のコンクリート温度はほぼ34°Cで一定であったことから、外気温よりも直達日射の影響が大きいことは明らかである。先にも示したとおり、コンクリート温度は外気温そのものではなく、ドラム内の空気温度に追従して変化して

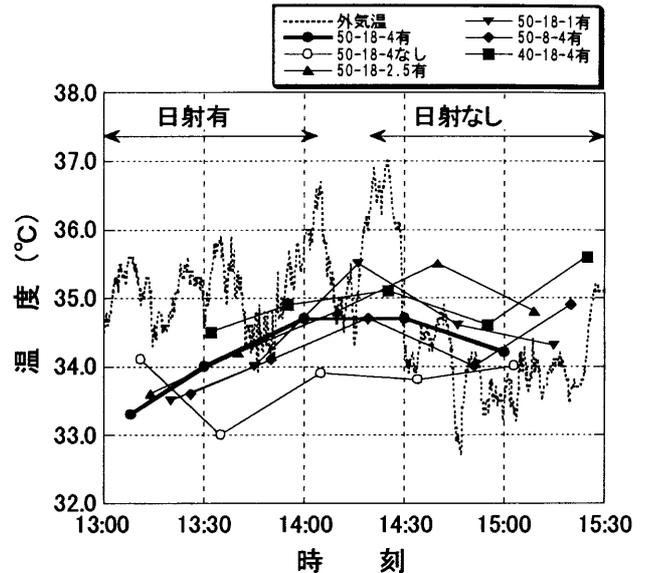


図2 コンクリート温度の経時変化

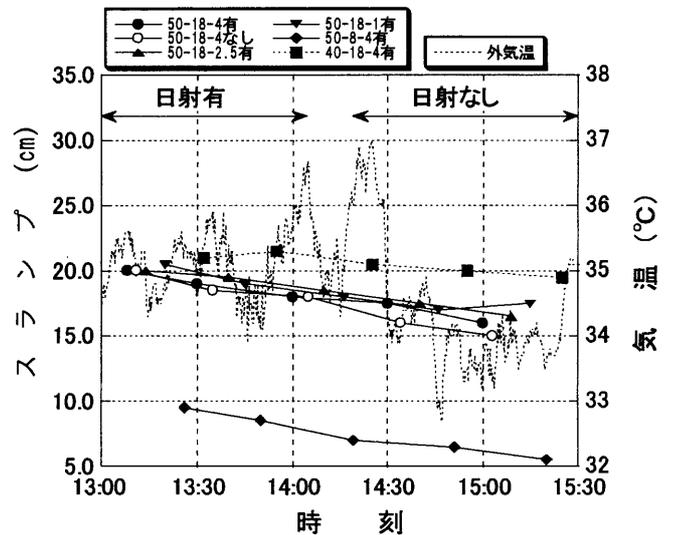


図3 スランプの経時変化

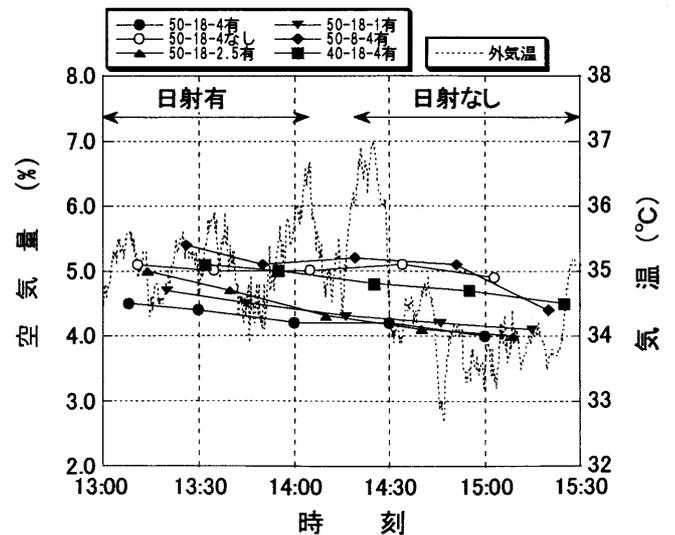


図4 空気量の経時変化

いるものと思われ、ドラム内の空気温度は直達日射の影響を受ける場合には外気温よりも高くなっているものと考えられる。逆に日射のない50-18-4なしの場合は、外気温が最も高く、コンクリート温度が最も低く、ドラム内の空気温度は両者の間にあるものと思われる。今後、より詳細に測定を行いたい。

図3に示すようにスランプはコンクリート温度にあまり影響されることなく、時間とともに徐々に低下しており、2時間で最大で5cm程度のロスが生じた。JASS5では、練混ぜから打込み終了までの時間の限度は、外気温が25°C以上の場合90分とされているが、図3に示すようにこの時間で目標スランプの範囲よりもスランプが低下したものはなかった。また、高性能AE減水剤を用いた40-18-4有では、コンクリート温度が35°Cを超えたにもかかわらず、スランプの変化はほとんど生じず、暑中コンクリート工事におけるスランプロス対策としての高性能AE減水剤の有効性が確認された。

図4に示す空気量は、経時低下が最大でも1%程度と小さく、練混ぜ後2時間を経過しても目標値以内であった。

図5に、運搬中のコンクリート温度に及ぼす直達日射の影響を示す。日射の当たっていた開始後60分程度まではコンクリート温度は上昇を続け(図中「日射有」)、曇天となった60分以後は、日射の影響を受けていないコンクリートの温度である34.0度付近へ近付いていること、また日射の影響を受けていないコンクリートの温度は経時変化が小さいことから、日射の影響が明らかである。

図6は運搬量の影響を示している。今回行った範囲では、同様に日射の当たっていた開始後60分程度までは、運搬可能量に対する運搬量の影響は見られず、先に述べたJASS5解説の記述と異なる結果となった。すなわち実験室実験の結果では、運搬可能容量に対する運搬量の割合が少ないほど係数 α は大きくなった¹⁾が、今回の実験のように実際のトラックアジテータでは、コンクリートの体積が大きく、相対的に表面積の割合が小さいため、影響が顕在化しにくいものと考えられる。運搬量の影響

を比較した実機実験は本実験が唯一の例であり、運搬時間がより長くなった場合や水セメント比の低い場合についての検討が必要である。

図7は調合の影響を比較している。今回行った範囲では、日射の当たっていた開始後60分程度までは、スランプの違いによる影響は小さかった。このこともJASS5の記述と異なっているが、理由は運搬量の影響が見られないことと同様であると考えられる。なお水セメント比の異なる調合③は、他の調合よりも練上がり温度が高くなったため、比較は困難であった。

図8、図9は、設定した条件による影響が比較的小さく同様の温度変化を示したデータ群の測定値のうち、直達日射が作用していた練混ぜ後約60分までの結果(50-18-1有の60分の値は除く)に温度推定式を適用した結果を示している。なお、60分以後も直達日射が作用したと仮定して温度推定値を60分以降にも適用した結果は両図中に太い破線で示している。図8は、 θ_r の値に実験開始60分程度までの外気温の平均値35°Cを用いた場合、図9は、日射の影響を考慮して θ_r を外気温よりも2°C高く設定した場合の適用結果である。なお係数 α や $\theta_{\alpha+\beta}$ の値の決定には最小二乗法を用いた。係数 α の値は前者で1.48/時間、後者で0.45/時間となり、かなり異なる結果となった。いずれも実測値の傾向をよく表しているが、後者の方が実測値の傾向をより良好に表している。 θ_r を外気温よりも何°C高く設定するかについては日射量を考慮する必要がある。同時期の福岡地域における全天日射量(水平面)は晴天時で1時間あたりおよそ2.0~3.5MJ/m²である⁷⁾。トラックアジテータのドラムの水平投影面積を約6m²とし、入射エネルギーの全てがコンクリート温度の上昇に使われると仮定すると、比熱が約1.1J/gKのコンクリート4m³の温度上昇量は、1.2~2.1°C程度になる。ドラム表面での反射やトラックアジテータエンジンの排熱も考慮する必要があるが、図9で用いた2°Cは大凡妥当な値であると考えられる。なお今回用いた車両は濃い赤褐色であり熱線をあまり反射しないと考えられるが、白色や銀色のドラムでは上記値を軽減できる

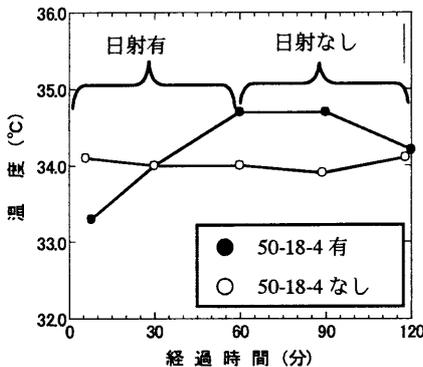


図5 直達日射の影響

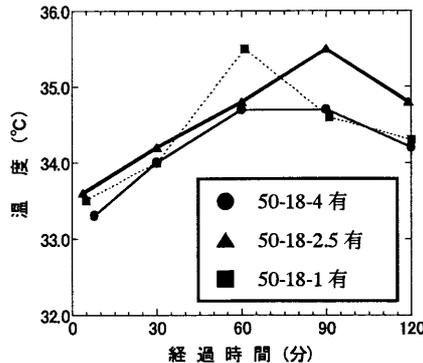


図6 運搬量の影響

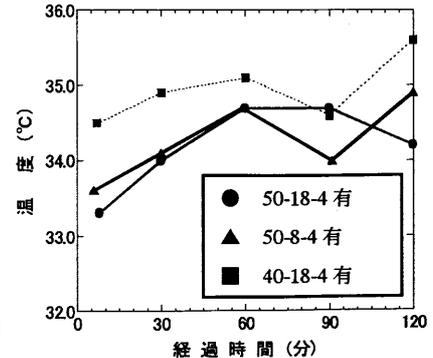


図7 調合の影響

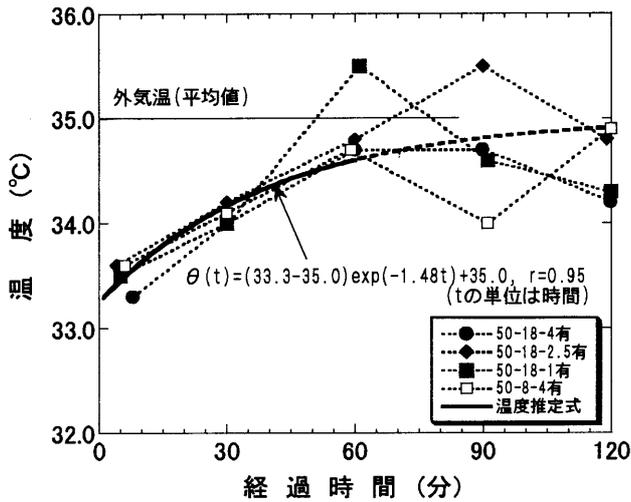


図8 α の推定 (θ_r を外気温とした場合)

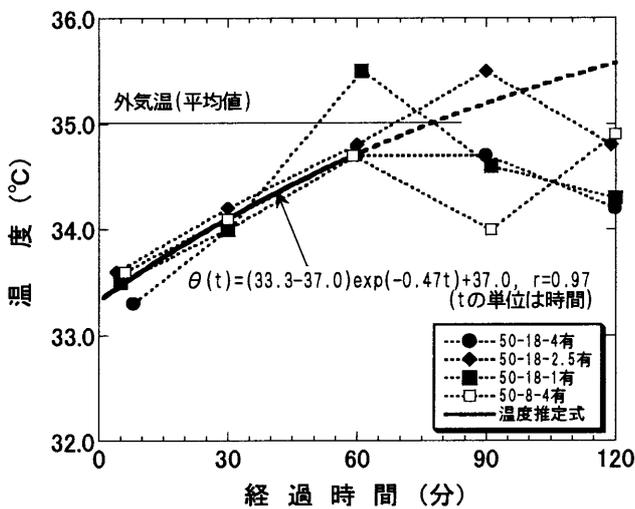


図9 α の推定 (θ_r を外気温より高くした場合)

ものと考えられる。

上記をふまえて先に示したJASS5解説における係数 α の算定例でその大小関係が説明しにくいものとなっている理由を考察すると、係数 α の値が、 θ_r の値として外気温を用いるか、アジテータドラム内の空気温度(>外気温)を用いるかで大きく異なることが要因として考えられる。同様に外気温の測定精度にも依存することが考えられる。ただし、図8と図9の比較からも明らかなように、いずれの場合も設定した θ_r に対応する係数 α の値を適切に定めれば精度よく温度推定は可能である。

5.まとめ

本研究は、暑中環境下で製造されたコンクリートの練混ぜ・運搬・荷卸しまでの温度推定式について、実機レディーミクストコンクリート工場での練混ぜや、トラックアジテータを用いた運搬を行って、材料やコンクリート温度ならびにその経時変化を実測し、係数 α 、 β の値

やこれらに影響を及ぼす種々の要因の検討を行ったものである。得られた結果を以下にまとめる。

- (1)セメントの水和熱などの影響を表す係数 β の値は、水セメント比40%程度の比較的単位セメント量の多いコンクリートにおいても1.5~1.7°C、標準偏差0.30~0.36程度であり、JASS5に例示される値よりも小さい値となった。
- (2)係数 β の値に及ぼすセメント種類の影響は、JASS5の記述と異なり、水セメント比40%程度の比較的単位セメント量の多いコンクリートにおいても顕著には見られなかった。
- (3) (1), (2)の理由として、近年ミキサの練混ぜ能力が急速に向上したことにより、コンクリートの練混ぜ時間が1分未満と非常に短くなったためコンクリートがミキサ内に滞留している時間が短く、練混ぜ中の材料どうしの摩擦熱や機械熱、ならびにセメントの水和熱の影響を相対的に受けにくくなったためと考えられる。
- (4)コンクリート温度の経時変化に及ぼす直達日射の影響は大きく、温度推定式中の係数 α や θ_r を定める際に考慮する必要がある。
- (5)係数 α の値において、運搬可能量に対する運搬量の影響は運搬時間60分の範囲では見られず、実験室実験の結果と異なる結果となった。
- (6)係数 α の値において、スランプの影響は見られず、実験室実験の結果と異なる結果となった。
- (7)係数 α の値は、日射を考慮して θ_r の値を外気温より高くする場合と、 θ_r は外気温とし α のみで日射の影響を考慮する場合とで値に大きな差が生じ、いずれの場合も実測値の傾向をよく表していたが、前者の値を用いた方がより相関係数が大きくなった。

今後、低水セメント比のコンクリートの α を含め、実機実験での測定データをさらに蓄積して考察を重ねる必要がある。

〈謝辞〉実験において福岡菱光株式会社ならびに、株式会社梅谷コンクリートの多大な協力を得た。ここに謝意を表す。

〈参考文献〉

- 1) 日本建築学会：日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009, 2009.2.
- 2) 日本建築学会：暑中コンクリートの施工指針・同解説, 2000.9.
- 3) 松藤泰典, 大久保孝昭, 小山智幸, 眞方山美穂, 野原博志：暑中環境下で練混ぜ・運搬されるフレッシュコンクリートの温度推定に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.85-88, 1991.3.など

- 4) 船本憲治, 稲富敬, 志垣隆浩, 伊集院博敏, 寺原学, 亀谷哲章: 暑中環境下で製造・輸送されるコンクリートの温度推定およびその抑制対策に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.883-884, 2008.3.
- 5) 松藤泰典, 小山智幸, 岸康邦, 杉田均: 暑中環境下で輸送されるコンクリートの温度上昇抑制に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.101-104, 2000.3.
- 6) 大熊良典, 小山智幸, 小山田英弘, 北山博規: 暑中コンクリートの運搬中の温度上昇に関する研究 その1. 温度推定式における係数 β の検討, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.5-8, 2009.3.
- 7) 気象庁ホームページ「過去の気象データ検索」, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>

(受理: 平成 21 年 6 月 4 日)