

# 暑中コンクリートの運搬中の温度上昇に関する研究

小山 智幸・小山田 英弘

暑中コンクリート工事における種々の不具合は、主として練混ぜから運搬にかけての比較的短期間におけるコンクリート温度の上昇に端を発するため、この時期における温度上昇の予測はコンクリートの品質管理を行う上で重要である。筆者らは、実機プラントでの練混ぜ時やトラックアジテータによる運搬時におけるコンクリートおよび貯蔵時の材料温度を実測し、これらに及ぼす種々の影響要因、ならびにコンクリート温度推定式に関して検討を行ってきた。本稿ではこれまでに得られた結果を紹介する。

キーワード：暑中コンクリート工事，運搬，温度，日射

## 1. はじめに

暑中期に製造、施工されるコンクリートは、主として高い外気温や日射の影響で、標準期と比較して、使用する材料の温度が上昇し、練上がり時の温度が高くなる。その結果、製造時において、スランプが出にくくなる、空気が連行されにくくなる、さらにこれらの安定性が悪くなるなどの「わるさ」が生じやすい。上記のような高温の影響は運搬から打込み後初期にも継続し、スランプロスが大きくなる、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。さらに高温の影響は後期の水和反応の進行にも生じ、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、標準期と比較して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<sup>1) 2)</sup>。

このように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<sup>1)</sup>（以下 JASS5）や暑中コンクリートの施工指針・同解説<sup>2)</sup>（以下暑中指針）では荷卸し時のコンクリート温度の上限値を 35℃ とするよう規定し、この温度を満足するように輸送中のコンクリートの温度上昇を考慮して練上がり温度を定めることとしている。また、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 JASS5 解説（指針では 4.3.b 本文）に示されている。同式には、係数  $a$ 、 $\beta$  が含まれ、 $a$  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、 $\beta$  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多くの検討が行われ<sup>3)</sup> など、その値が示されているが、実機レベルでの測定は少ない<sup>1) 2) 4)</sup> など。さらに式中に用いる材料温度の実例についても、公開されたものは少ない。筆者らは、実機レディーミクストコンクリート工場や現場プラントでの製造やトラックアジテータを用いた運搬時において、材料温度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  $a$ 、 $\beta$  の値やこれらに及ぼす種々の影響要因の検討を行ってきた。未だデータは十分とはいえないが、本稿ではこれまでに得られた結果を紹介させて頂く。

## 2. コンクリート温度の推定式

暑中コンクリート工事における種々の「わるさ」は、主として練混ぜ、運搬、打込みおよびその後の比較的短期間におけるコンクリート温度の上昇に端を発する。セメントの水和発熱は高温になるほど促進されるので初期の高温はその後の温度上昇を助長する。すなわち製造から運搬までの温度上昇の抑制がその後の構造体コンクリートの品質低下の抑制に効果的であることは明らかである。JASS5 等に示されている式 (1) のコンクリート温度推定式は、上記の練混ぜから運搬中におけるコンクリート温度を対象としており、この間の単位時間当たりのコンクリート温度変化量が、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<sup>3)</sup>。

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

ここに、

$\theta(t)$  : 時刻  $t$  におけるコンクリート温度 (°C)

$\theta_0$  : 式 (2) に示す、単純に構成材料の温度と比熱から求められるコンクリートの練上がり温度 (°C)

$\theta_r$  : 外気温 (アジテータドラム内の空気温度) (°C)

$a$  : 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)

$\beta$  : 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)

$t$  : 輸送時間 (時間)

$$\theta_0 = \frac{a_c \theta_c W_c + a_a \theta_a W_a + a_m \theta_m W_m}{a_c W_c + a_a W_a + a_m W_m} \quad (2)$$

$a_c, \theta_c, W_c$  : セメントの比熱 (0.836 kJ/kg·K), 温度 (°C), 質量 (kg)

$a_a, \theta_a, W_a$  : 式 (3) で表される含水状態での骨材の比熱 (kJ/kg·K), 温度 (°C), 質量 (kg)

$a_m, \theta_m, W_m$  : 水の比熱 (4.18 kJ/kg·K), 温度 (°C), 質量 (kg)

$$a_a = \frac{a_{a0} + a_m \mu_a + a_m f_a (1 + \mu_a)}{(1 + f_a)(1 + \mu_a)} \quad (3)$$

$a_{a0}$  : 絶乾状態の骨材の比熱 (0.836 kJ/kg·K)

$\mu_a$  : 骨材の吸水率 (%) × 1/100

$f_a$  : 骨材の表面水率 (%) × 1/100

コンクリートの練上がり温度は、式 (1) において輸送時間  $t = 0$  として、 $\theta(0) = \theta_0 + \beta$  から求められる。 $\theta_0$  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、 $\beta$ によりこれらの影響を考慮した。 $\beta$ 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。」<sup>1)</sup>とされているが、実際に実機レディーミクストコンクリートで測定した例<sup>1) 2) 4)</sup>などは少ない。

式中の $\theta_r$ は、「厳密にはアジテータドラム内の空気温度」<sup>1) 2)</sup>とされ、「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、 $\theta_r$ は外気温よりも高い値とする必要がある」<sup>1) 2)</sup>が、具体的に何°C高くすべきか示されていない。

係数 $a$ 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 $\theta_r$ に近づくことになる。実際にトラックアジテータで輸送した際の $a$ の測定値も少ない。

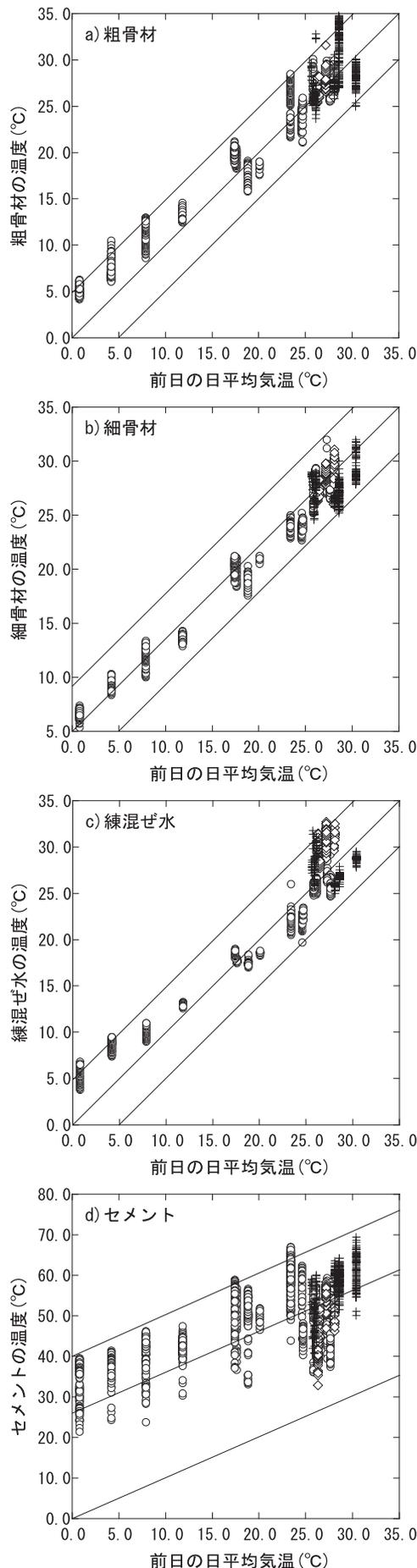
本研究では、上記 $a, \beta, \theta_r$ の値、および材料温度について、夏期を中心に福岡県においてレディーミクストコンクリート工場や現場プラントの協力を得て、実機実験と測定を行った。

### 3. 外気温と材料温度

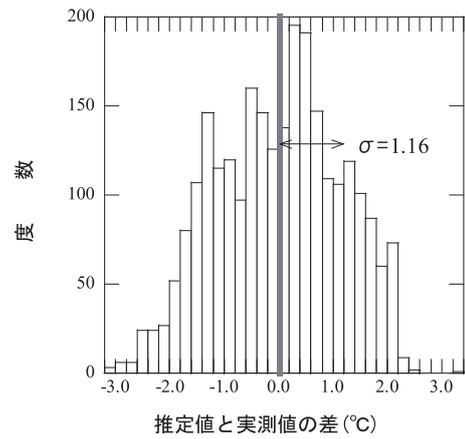
図一1は、福岡県内の複数のプラントにおいて測定した、材料温度と日平均気温との関係の一例を示したものである。日平均気温は気象庁発表の博多における値<sup>5)</sup>を用いている。粗骨材は碎石、細骨材は海砂、セメントは普通ポルトランドセメントである。練混ぜ水はプラントにより水道水の場合と、工業用水や上澄水の場合が混在している。骨材温度はプラントにより貯蔵瓶または計量瓶で測定した。骨材の貯蔵設備もプラントにより屋根付きの骨材置き場または骨材サイロと異なる。セメントはいずれのプラントにおいてもセメントサイロに貯蔵し、コンベヤで貯蔵瓶に送られた後、ミキサ直上の計量瓶において計量される際の温度を熱電対で測定した。水は混和剤とともに計量される際の温度を同様に測定している。なお図中の記号の違いはプラントの違いを表している。

年間を通して測定を行ったのは1プラント(図中の○印)においてのみであるが、当然のことながら夏期に材料温度は高くなっている。細・粗骨材の温度は、前日の日平均気温に対しほぼ±5°Cの範囲にあり、季節やプラントが異なっても同様の傾向となっている。同一プラントであれば、図一2に細骨材の一例を示すように、95%が約±2°Cの範囲にある。一般的な調査のコンクリートでは骨材の温度が2°C変化すると、式(1)における練上がり温度は約1°C変化する<sup>1) 2)</sup>ので、前日の気温により予測した骨材温度のばらつきがコンクリートの練上がり温度の予測値に及ぼす影響は1°C程度ということになる。

練混ぜ水の温度も、プラントにより種類が異なるに



図一 日平均気温と材料温度の関係



図二 細骨材温度の推定値と実測値の差 (推定値=前日の平均気温)

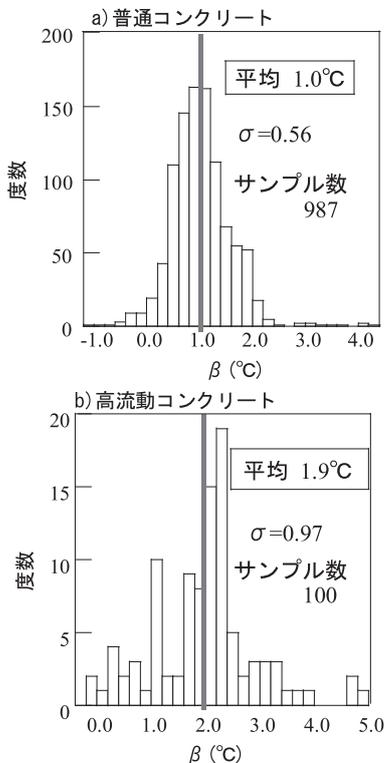
もかかわらず、前日の日平均気温に対しほぼ±5℃の範囲になっている。図は省略するが、骨材と同様、同一プラントでは95%が約±2℃の範囲にある。練混ぜ水が4℃高くなると練上がり温度は約1℃高くなる<sup>1)2)</sup>ので、前日の気温により予測した翌日の練混ぜ水の誤差がコンクリートの練上がり温度の予測値に及ぼす影響は0.5℃程度となる。

セメントの温度は絶対値が他の材料より高く、ばらつきも大きい。前日の日平均気温に対し、最大で40℃近くも高くなっており、また同一の気温に対するセメント温度の幅も20℃程度となっている。他の材料と同様に同一プラントで95%のデータが存在する範囲は約±11℃である。セメントの温度が8℃変化すると $\theta_0$ は約1℃変化する<sup>1)2)</sup>ため、セメント温度の誤差がコンクリートの練上がり温度の予測値に及ぼす影響も1℃強と予想される。

#### 4. 温度推定式における係数 $\beta$ の検討

練上がり時のコンクリート温度は、先に示したように温度推定式(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。 $\beta$ の値は、各プラントで定めることとなっているが、1997年版以降のJASS5に示されている値以外に数件の実測例<sup>4)</sup>などがあるのみであった。筆者らは2007年から2010年にかけて、福岡市近郊のレディーミクストコンクリート工場や現場プラントで、年間を通じて実測を行っている<sup>6)</sup>など。コンクリートは水セメント比50%前後、スランプ18cm前後(一部15cm)の一般的なものである。なお比較のため低水セメント比のコンクリートについても検討を行っている。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指とし、それぞれ、

ミキサ直上の計量瓶とミキサ直下のホップで熱電対を用いて自動測定した。ただし一部のプラントでは、骨材温度は、設備の都合でサーミスタによる手動計測としている。



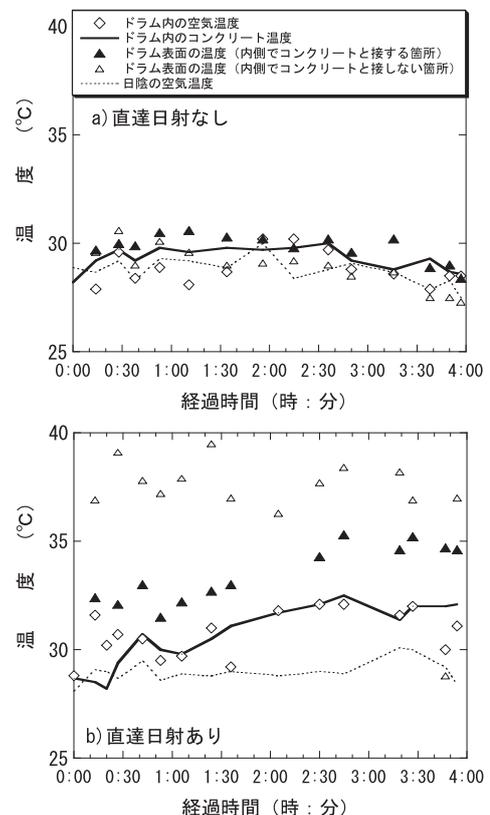
図—3 実機プラントにおける係数 $\beta$ の測定例

図—3に、あるプラント（ミキサの容量 $1.5\text{ m}^3$ ）で得られた $\beta$ の例を示す。a) はスランプ $18\text{ cm}$ の一般的なコンクリート、b) は高流動コンクリートである。一般的なコンクリートの場合、 $\beta$ の値は $1.0^\circ\text{C}$ 程度であった。図は省略するが、同様のスランプ（ $15\text{ cm}$ を含む）、呼び強度であれば、フライアッシュが $20\%$ 程度置換されたコンクリートにおいても同程度の値となった。別のプラント（ミキサの容量 $2.5\text{ m}^3$ ）における結果では、サンプル数は少ないが、普通ポルトランドセメント単味で同様の調合のコンクリートの場合で $1.7^\circ\text{C}$ 、高炉セメントB種を用いたコンクリートでは $1.0^\circ\text{C}$ と、図—3よりも若干大きく、また混和材の影響もみられた<sup>6)</sup>。このような違いはミキサ容量の影響と考えられる。いずれにしてもこれらの値は、90年代前半に測定された現行JASS5に示される $\beta$ の値 $1.8\sim 3.4^\circ\text{C}$ と比較すると小さい。その理由としては近年のコンクリートでは練混ぜ時間が $30\sim 45$ 秒程度と短いことが考えられる。b) に示す結果は、a) と同じプラントで得られた高流動コンクリートの結果であるが、練混ぜ時間が $70$ 秒と長いために $\beta$ の値もa)の値よりも大きくなっている。

### 5. 温度推定式における係数 $\alpha$ の検討

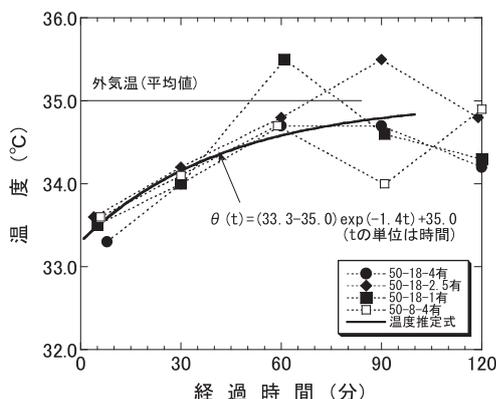
係数 $\alpha$ に関する実機実験は福岡市近郊のレディーミクストコンクリート工場で、2008年から2009年にかけて実施している。まず、水和発熱の影響をキャンセルして気温と日射のみの影響を検討するため、セメントの水和反応を一時的に停止することのできる安定化剤<sup>7)</sup>を用いて長時間測定を行った結果を示す<sup>8)</sup>。2台のトラックアジテータ（車体・ドラムの色は濃い赤褐色）を用い、福岡における一般的な材料、調合（スランプ $18\text{ cm}$ 、呼び強度 $27\text{ N/mm}^2$ ）のコンクリート $4\text{ m}^3$ ずつを、練上がりから $240$ 分間運搬した。そしてアジテータドラム内のコンクリート温度、ドラム内の空気温度、ドラムの表面温度の経時変化を練上がり直後から約 $15$ 分おきにドラムの回転を停止して測定した。トラックアジテータは、工場内の直射日光の当たる場所、または日陰になる場所に、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。なお、当日の天候はほぼ晴天、気象庁発表の福岡における日最高気温は $29.9^\circ\text{C}$ 、日平均気温は $25.5^\circ\text{C}$ 、水平面における全天日射量は1時間あたり最大で $3.32\text{ MJ/m}^2$ （ $13$ 時）<sup>5)</sup>であった。

図—4は、アジテータドラム内のコンクリート温度、ドラム内の空気温度を、日射の有無により比較したも

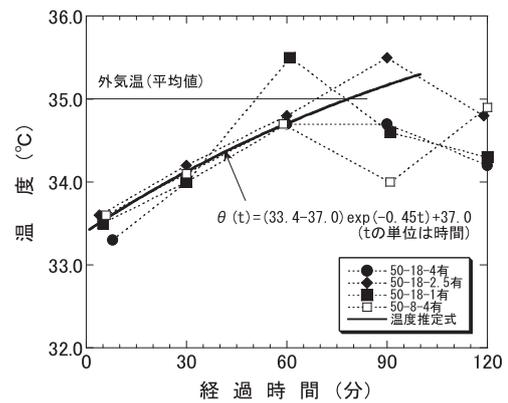


図—4 運搬中のコンクリート温度の経時変化

のである。直達日射のない場合 a) は、ドラム内のコンクリート温度や空気温度は、気温とほぼ同程度の値で推移している。ドラムの表面温度も同程度であった。直達日射が作用する場合 b) には、コンクリート温度は、今回の日射量やドラム色の場合、1時間に1℃程度の割合で上昇を続けた。ドラム内の空気温度はコンクリート温度と同程度であった。ドラム表面の温度は、変動が大きいものの、内側がコンクリートと接しない箇所では36～40℃程度でほぼ一定、常時接する箇所ではコンクリート温度よりも2℃程度高い値で、経過時間に伴いコンクリート温度と同じ割合で上昇していた。なお実験開始までトラックアジテータは直達日射下に待機させたが、そのときのドラム内の空気温度は約34℃で、気温よりも6℃程度高かった（JASS5等には気温より8℃高い例が示されている<sup>1) 2)</sup>）が、練り上がったコンクリートを投入した直後にはコンクリート温度と同程度の値となった。これらのことから、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方が自然であり、ドラム内の空気温度はコンクリート温度に影響するというよりは、コンクリート温度に追随して変化している。ドラム内の空気の熱容量を試算すると、 $0.113 \text{ kJ/K} \cdot \text{m}^3$ （空気  $1 \text{ m}^3$  あたりの熱容量） $\times 4.9 \text{ m}^3$ （ドラム内の空気の体積） $= 0.554 \text{ kJ/K}$  となり、同様に求めたコンクリートの熱容量  $2650.0 \text{ kJ/K} \cdot \text{m}^3 \times 4.0 \text{ m}^3 = 10600 \text{ kJ/K}$ 、ドラムの熱容量  $528 \text{ (kJ/K)}$  と比較して遙かに小さい。したがって、空荷の状態でのドラム内空気温度が外気温より8℃高い例を根拠として $\theta_r$ をドラム内の空気温度と定義するより、直達日射を加味した相当外気温としたほうが適切であり、その値は今回の条件の場合、気温よりも2℃程度高く設定すべきである。図一5および図一6は、安定化剤を添加せず別途行った運搬実験の結果に温度推定式を当てはめたものであ



図一5 aの推定 ( $\theta_r$  を外気温とした場合)



図一6 aの推定 ( $\theta_r$  を外気温より高くした場合)

る<sup>9)</sup>。実験中の平均気温は約35℃であった。実験開始直後は概ね晴天であったが、開始60分後頃から次第に曇天となり、運搬車による開始時刻の違いにより、後半は晴天の条件と曇天の条件が混在する。そのため図中、60分以降の値がばらついている。よって同じ晴天の条件である前半の60分までのデータに対し回帰を行っている。図一5は、 $\theta_r$ の値に実験開始60分程度までの外気温の平均値35℃を用いた場合、図一6は先の結果から $\theta_r$ を外気温よりも2℃高く設定した場合の適用結果である。aの値は前者で1.4、後者で0.45とかなり異なる結果となったが後者の方が実測値の傾向をより良好に表している。

## 6. まとめ

2009年に改定されたJASS5の13節暑中コンクリートでは、近年最高気温が高くなる傾向にあることを考慮して、対策を講じても荷卸し時のコンクリートの温度が35℃を超えることが避けられない事態に備えて、材料・調合、打継ぎ時間、養生方法・期間などの変更により、コンクリートの品質変化をできるだけ小さく抑える対策を、あらかじめ工事監理者と講じておくこととしている。換言すると施工者は、「コンクリート工事開始のかなり前に」高温の影響が最小となるように十分な検討を行って施工計画書を作成する必要がある。したがって荷卸し時のコンクリート温度が何℃になるのか予測することは重要であり、可能であれば、平年値等の予想気温から精度よくコンクリート温度を予測できることが理想である。本研究は製造から運搬までのコンクリートの温度推定式の、実機レベルでの精度向上を目的として行ってきたものであるが今後さらなるデータの蓄積が必要である。

〈謝辞〉実験において、清水建設(株)黒田泰弘氏、(株)梅谷コンクリート、福岡菱光(株)のほか、関係各位の多大な協力を得た。またBASF ポゾリス(株)大川裕氏のアドバイス、本学大学院生の北山博規氏、卒論生の大熊良典氏、大庭早弥香氏の多大な貢献を得た(所属はいずれも実験時)。ここに謝意を表す。

JCMMA

## 《参考文献》

- 1) 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 2009.2
- 2) 暑中コンクリートの施工指針・同解説, 日本建築学会, 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
- 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) 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>), 2009.12
- 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 $\beta$ の検討, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.5-8, 2009.3
- 7) 大川裕, 山宮浩信, 西林新蔵, 戻りコンクリートの再利用に関する研究, コンクリート工学論文集, 第8巻第2号, pp.31-37, 1997.7
- 8) 大庭早弥香, 小山智幸, 小山田英弘, 大熊良典, 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3. 温度推定式における $\alpha$ ,  $\theta$ に及ぼす日射の影響, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.145-148, 2010.3
- 9) 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2. 温度推定式における係数 $\alpha$ の検討, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.9-12, 2009.3

## [筆者紹介]



小山 智幸 (こやま ともゆき)  
九州大学大学院  
人間環境学研究院  
准教授



小山田 英弘 (こやまだ ひでひろ)  
九州大学大学院  
人間環境学研究院  
助教

## 大口径岩盤削孔工法の積算

——平成 22 年度版——

### ■改訂内容

- ・国交省の損料改正に伴う関連箇所の全面改訂
- ・ケーシング回転掘削工法のビット損耗量の設定
- ・工法写真、標準積算例による解りやすい説明
- ・施工条件等に対応した新たな岩盤削孔技術事例の追加
- ・“よくある質問と回答”の追加

- A4判/約 250 頁 (カラー写真入り)

## ● 定 価

非会員：5,880 円 (本体 5,600 円)

会 員：5,000 円 (本体 4,762 円)

※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも

沖縄県以外 450 円

沖縄県 340 円 (但し県内に限る)

● 発刊 平成 22 年 5 月

### 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>