

論文 気象現象の計測とコンクリート躯体温度への影響

西田德行^{*1}・椎名貴快^{*2}・松井邦人^{*3}・Theodore F.Smith^{*4}

要旨：コンクリート構造物の耐久性を検討する上で、その環境条件は極めて重要である。自然環境下では、気温・湿度、日射および赤外放射などの気象要因が周期的に変化し、構造物の表面や躯体内の温度等に影響を与えている。しかしながら、気象現象を取入れた構造物の性能評価は、依然、確立されていない。本研究では著者らが提案した輻射熱を考慮した境界モデルを検証するため、屋外にて実大モデル試験体の躯体温度と気象現象の測定を行った。

キーワード：コンクリート温度、気象現象、モデル実験、境界モデル、アルベド、射出率

1. はじめに

野外に打設されたコンクリート表面では日射、放射熱、水分蒸発による気化熱等が躯体温度の変動に影響することが知られている¹⁾²⁾。しかし、コンクリートの温度解析は、一般にコンクリート表面と大気との境界条件を対流熱伝達のみとして行っている。例えば、躯体内の非線形な温度勾配により発生する内部拘束応力が卓越するスラブ状コンクリート構造物では輻射熱の影響によって、この温度勾配が大きくなり、表面ひび割れの発生、成長を助長する可能性がある。また、硬化コンクリートにおいても塩害や凍害等の劣化過程で、気象因子から受ける温度変化を正確に考慮することは、今後、重要であると考えられる。

本研究では、提案した境界モデル³⁾を検証するため、実大モデルの試験体を作成し、打込み時から7種類の気象因子、コンクリート躯体温度および表面熱収支を計測した⁴⁾⁵⁾。なお、所要の品質を確保するため、通常は打設翌日から、霜、日光の直射、風および大雨などの気象作用に対してコンクリートの露出面を保護する湿潤養生等が行われる。しかし、湿潤養生時等の水分供給量や養生方法(湛水、散水、マット等)の

評価が困難であるため、本実験では湿潤養生等を行わないこととした。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合および試験体

本文は、1997年11月7日～12月5日に東京都町田市で行った実験に関するものである。使用したコンクリートは、呼び強度 30N/mm²、打設温度 21.4℃である。表-1に配合を示す。自然環境下では物体に作用する日射、放射、顕熱に対する風の影響等、外的因子の1つ或いは全てを完全に取除くことは不可能であるが、個々の影響の軽減は可能である。本実験では、これに基づいて気象因子が、コンクリート表面部に及ぼす影響を検討した。試験体は6種類であり、境界条件を図-1、表-2に示す。試験体の形状は後の解析を簡素化するため、図-2に示すように上面を除く周囲を断熱材で覆った1次元的な熱拡散となる要素モデルとした。

2.2 計測項目および計測方法

(1) コンクリート躯体温度

コンクリート躯体温度は、熱電対を用いて30分間隔で測定している。熱電対の配置を図-2に示す。日射や放射が及ぼす影響は、材質、色

*1 西松建設(株)技術研究所技術部土木技術課係長 工博(正会員)

*2 西松建設(株)技術研究所技術部土木技術課 工修(正会員)

*3 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科 Ph.D.(正会員)

*4 Professor, Department of Mechanical Engineering, The University of Iowa, Ph.D.

表-1 コンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	12±2.5	50	4.5±1.5	45.9	164	328	819	983	1.230

普通ポルトランドセメント：比重 3.16，比表面積 3350cm²/g

細骨材 S1：細砂，比重 2.54，吸水率 3.65%，実績率 57.9%，FM=1.83

S2：砕砂，比重 2.62，吸水率 1.12%，実績率 62.1%，FM=3.20

混合砂(S1:S2=20:80)：比重 2.62，吸水率 1.12%，実績率 61.3%，FM=2.93

粗骨材：碎石，比重 2.65，吸水率 1.07%，実績率 57.1%，FM=6.65

混和剤：AE 減水剤標準形(I種)，断熱温度上昇試験結果： $Q(t) = 51.56(1 - e^{-0.914t})$

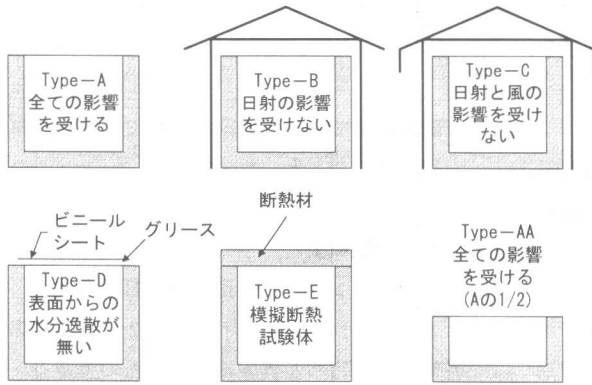
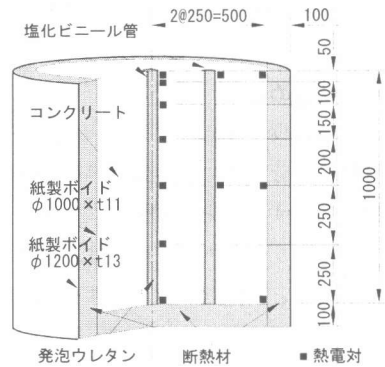


図-1 コンクリートモデル試験体の種類 (断面図)

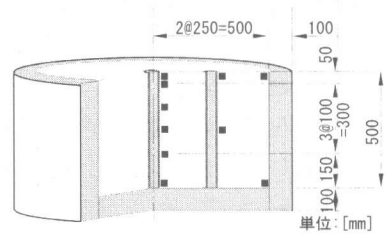


(a) TYPE A, B, C, D, E (φ1000 × h1000)

表-2 試験体の境界条件

試験体タイプ	影響項目			コンクリート表面モデル			
	日射	風	水分逸散	q_{con}	q_{sol}	q_{sky}	q_{evp}
A, AA	○	○	○	○	○	○	○
B	×	○	○	○	×	○	○
C	×	×	○	×	×	○	○
D	○	○	×	○	○	○	×
E	×	×	×	×	×	×	×

q_{con} ：対流熱伝達量， q_{sol} ：正味全天日射量， q_{sky} ：天空放射量， q_{evp} ：水分蒸発の気化熱による熱損失量



(b) TYPE AA (φ1000 × h500)

図-2 試験体の熱電対配置図

や温度によって異なるため，コンクリート表面に熱電対を貼付した場合，表面温度を厳密に測定するのは難しい．非接触型の温度計では精度に問題があった．そこで，既往文献⁶⁾を参考に表面から 5mm 内側に熱電対を設置し，コンクリートの表面温度とした．また，熱収支 q を直接測定する熱流計を 10mm 内側に設置した．

気象現象を考慮した境界条件は，次式のように仮定した³⁾．

$$q = q_{con} + q_{sol} + q_{sky} + q_{evp} \quad (1)$$

ここに， q_{con} は対流伝達量[W/m²]， q_{sol} は正味全天日射量[W/m²]， q_{sky} は天空放射量[W/m²]， q_{evp} は水分の気化熱による熱損失量[W/m²]である．なお，正味とは，(入射量-反射量)を意味する．

(2) 気象因子の計測

計測項目，使用計器を表-3 に示す．また，気象計測概要図，試験体配置図を図-3，4 に示す．気象に関する計測データは 6 秒間隔のス

表-3 計測項目

計測項目	計測器
コンクリート表面温度[°C]	熱電対(5mm 内側)
コンクリート温度[°C]	熱電対
気温[°C]	通風式温湿度計
相対湿度[RH%]	通風式温湿度計
露点温度[°C]	露点温度計
風向風速[m/s]	風向風速計(高さ 1,2,3m)
全天日射量[W/m ²]	アルベドメータ(Type-A 上)
天空放射量[W/m ²]	赤外放射計(Type-AA 上)
コンクリート熱量[W/m ²]	熱流計(Type-A,C,D)
降雨量[mm]	雨量計

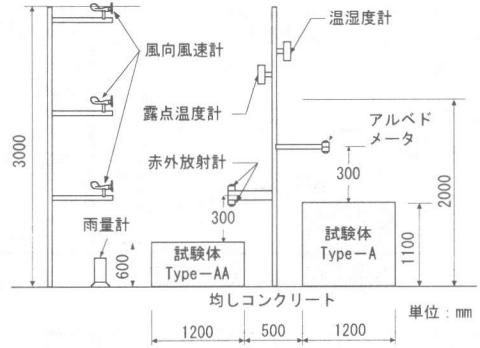


図-3 気象計測概要図

キャンを 30 分間隔で平均したものを測定値として用いた。本実験では、全天日射量はアルベドメータ、天空放射は赤外放射計、対流熱伝達量は風向風速計、気温およびコンクリート表面温度から求められる。輻射熱を考慮した温度解析では、測定値に対する計算値の妥当性の確認が必要となる。式(1)右辺の各項は以下に示す式から算出できる。

$$q_{con} = h_c(T_{air} - T_s) \quad (2) \quad q_{sol} = (1 - \alpha)S_0 \quad (3)$$

$$q_{sky} = \varepsilon\sigma(T_{sky}^4 - T_s^4) \quad (4) \quad \alpha = \frac{K \uparrow}{K \downarrow} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{E_m \uparrow - E_m \downarrow}{E_{hc} - E_m \downarrow} \quad (6) \quad E_{hc} = \sigma T_s^4 \quad (7)$$

$$T_{sky} = T_{air} \{0.711 + 0.00567T_{dp} + 0.000073T_{dp}^2 + 0.013 \cos(\pi t / 12)\}^{1/4} \quad (8)$$

$$q_{evp} = -(42.6 + 37.6v)(p_{cs} - \phi p_{ws}) \times 0.0075 / 4.1868 \times 1.163 \quad (9)$$

ここに、 h_c は対流熱伝達率[W/m²C]、 T_{air} は気温[°C]、 T_s はコンクリート表面温度[°C、K]である。 S_0 はコンクリート表面の単位面積に単位時間当りに入射する全天日射量[W/m²]、 α は入射する全天日射量の反射率でアルベドと呼ぶ。 ε は入射する赤外放射量の反射率で射出率または放射率と呼ばれている。反射率は、上下方向の計器の設置により求められる。 $K \downarrow$ は上から、 $K \uparrow$ は下からの全天日射量、 $E_m \downarrow$ は上から、 $E_m \uparrow$ は下からの赤外放射量である。 σ はステファン・ボルツマン定数(=5.67×10⁻⁸[W/m²K⁴])、 T_{sky} は天空温度[K]、 T_{dp} は露点温度[K]、 v は風速[m/s]、

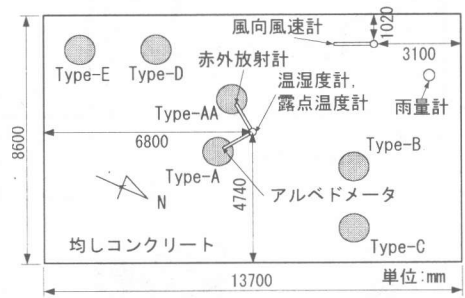


図-4 試験体配置図

p_{cs} はコンクリート表面の飽和蒸気圧[mmHg]、 ϕ は相対湿度、 p_{ws} は飽和蒸気圧[mmHg]である。なお、天空温度は雲量により変化することが知られているが、正確に予測する式は無い。ここでは ASHRAE⁷⁾による晴天時の予測式(8)を用いている。また、式(9)は、潜水養生等でコンクリート上に水の層がある場合の式⁷⁾であるため、本実験での適用は難しい。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリート躯体温度の測定結果

試験体 6 種類のコンクリート温度の経時変化(中央部)を図-5 に示す。試験体 6 体の内、Type-E 以外は、材齢約 1.5 日で最高温度が約 65°C であり、15 日程度から躯体温度が外気温に平衡している。日射の影響を受けない Type-B,C は、日射の影響を受ける Type-A,D と比較した場合、コンクリート表面温度の日変化が小さい。Type-B と C の違いは、あまり顕著に現れてい

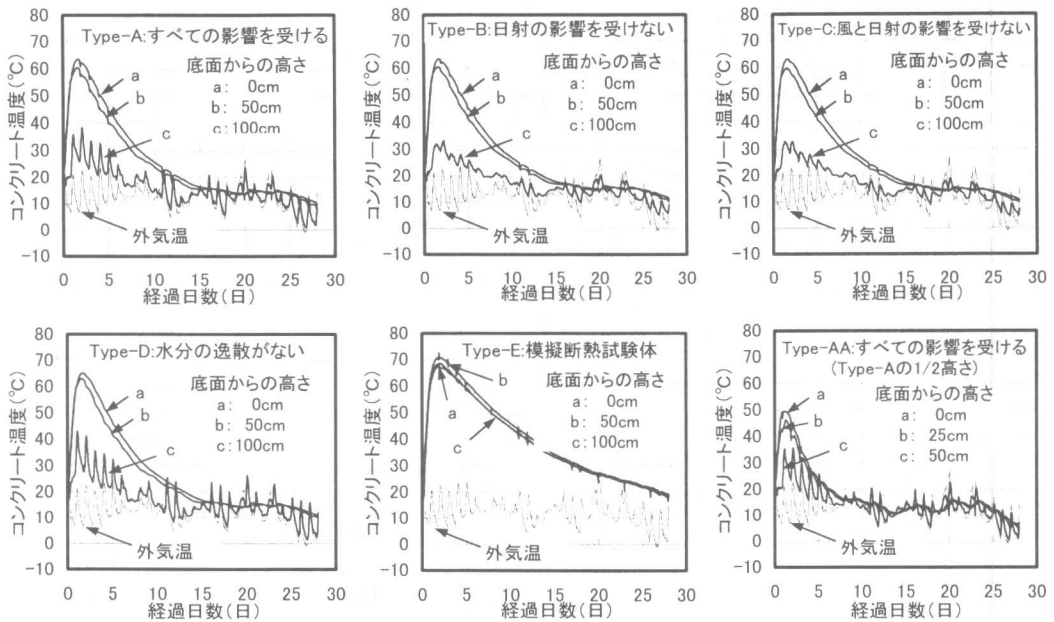


図-5 コンクリート温度測定結果

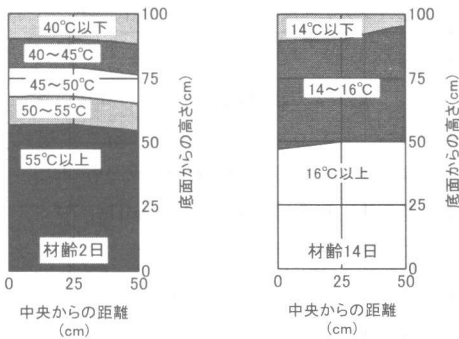


図-6 試験体 Type-A の温度分布図

ない。Type-D の表面温度は、上面のビニールシートによる温室効果とグリスの茶褐色により、他の試験体に比べて日変化が大きく、全体的に温度が高くなったと考えられる。高さ 50cm の Type-AA は、材齢 1.25 日で最高温度が 49.5°C である。躯体内部温度は材齢 7 日程度から外気温に平衡している。以上のように、気象に関する環境条件の違いにより、コンクリート表面および内部温度は異なっている。なお、図-6 に示す Type-A の温度分布図から、試験体の熱拡散状態は、ほぼ 1 次元的であることがわかる。

3.2 気象因子の計測結果とその影響

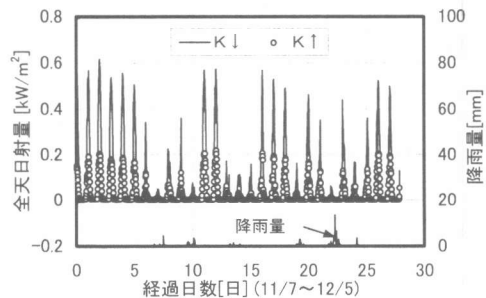


図-7 全天日射量および降雨量の測定結果

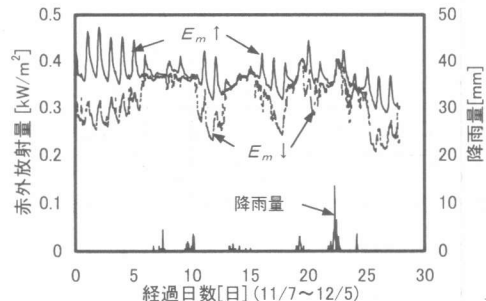


図-8 赤外放射量および降雨量の測定結果

(1) 全天日射量および赤外放射量

図-7 に全天日射量、図-8 に赤外放射量を降雨量と併記して示す。雨天や曇りと考えられる時は、全天日射量が小さくなっている。また、

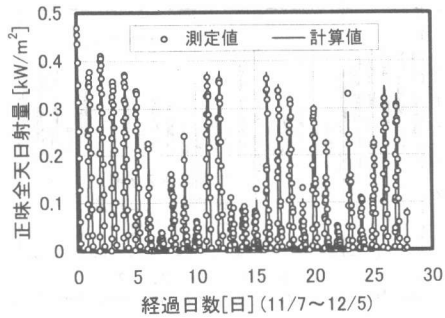


図-9 正味全日射量の測定値と計算値

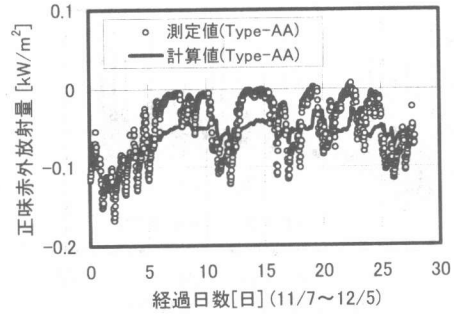


図-10 正味赤外放射量の測定値と計算値

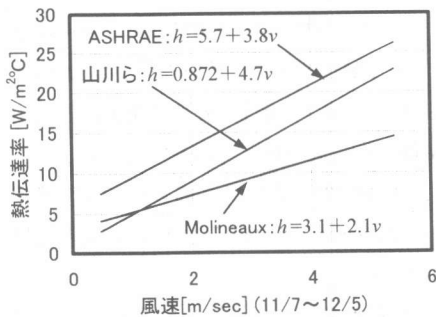


図-11 熱伝達率と風速の関係

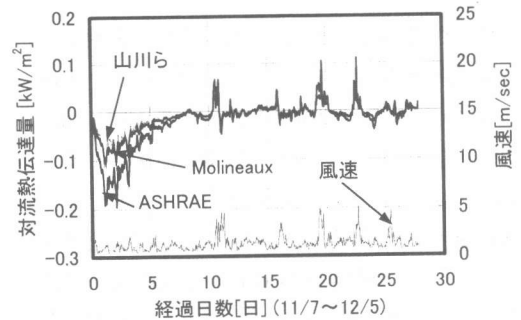


図-12 対流熱伝達量の計算値

この時期の赤外放射量は、 $E_m \downarrow$ と $E_m \uparrow$ の値の差が小さくなっている。この期間のアルベドと射出率の平均値は、それぞれ 0.34, 0.765 であった。図-9 に正味全日射量、図-10 に供試体 Type-AA の正味赤外放射量(天空放射量)の測定値と計算値の比較を示す。ここで正味とは、(上からの値 \downarrow)-(下からの値 \uparrow)を意味する。図-9 から正味全日射量の測定値は、計算値と良く一致していることがわかる。図-10 では計算値と測定値の変動幅が異なっているが、計算値は測定値のほぼ平均的な値を取っている。これは晴れか、曇りかによって上からの赤外放射量 $E_m \downarrow$ が変化するためで、式(4)による天空温度が曇り時に対応していないためである。

(2) 対流熱伝達量

対流熱伝達量は式(2)により求められ、熱伝達率の与え方により値が変わる。既往文献の熱伝達率は、顕熱と他の因子を同時に含むものが多い。図-11 に風速 v との関係と式を示す。

Watmuff ら⁸⁾によると、ASHRAE 式⁷⁾は放射の影響を含んでいると指摘している。顕熱のみを扱ったものでは Molineaux 式⁹⁾がある。山川ら¹⁰⁾は、硬化コンクリートの熱伝達率試験から 3 点の熱伝達率を求めている。ここでは、3 点から式を求めて図中に示した。図-12 に各熱伝達率の値を用いて式(2)から求めた対流熱伝達量を示す。潜熱の影響が小さい山川らの式と Molineaux 式を用いた値は概ね一致している。

(3) コンクリート表面の熱収支

試験体 Type-A に設置した熱流計による熱収支と式(1)に基づく計算値の比較を図-13 に示す。計算値の対流熱伝達量は、顕熱のみを考慮する Molineaux 式による熱伝達率を用いた。測定値と計算値は、ほぼ一致している。これより、本実験のような条件下では、潜熱の影響が小さく、これを無視できると考えられる。すなわち、本実験のように湿潤養生等を行わない場合、著者らが提案した境界モデルは、気化熱(潜熱)の

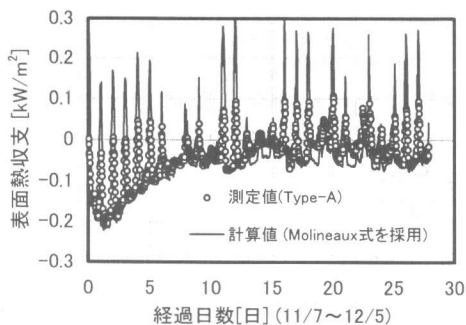


図-13 コンクリート表面の熱収支 (Type-A)

影響を無視することで、実現象を良く表現できることが確認された。ただし、コンクリート温度のピーク時は若材齢時であり、表面部は比較的湿っているため、潜熱の影響が予想される。また、コンクリート温度のピーク時において、測定値との一致が悪い。これは、日射計(アルベドメーター)や赤外放射計の測定誤差や熱流計の感度などが原因と考えられる。よって、各養生方法の影響も含めて今後の課題と考える。

試験体 Type-A の日中 14:00 の表面熱収支を成分別にしたものを図-14 に示す。図中符号の正は吸熱、負は放熱を意味する。正味全天日射量が小さい部分は曇りあるいは降雨時である。晴天時の日中は、正味全天日射量の影響が大きい。若材齢時は発熱により表面温度が高く、対流熱伝達と天空放射の放熱が大きくなっている。

4. 結論

本実験から得た主な知見を以下に示す。

- (1) アルベドの平均値は 0.34 であった。これを用いた正味の全天日射量は測定値と良く一致している。
- (2) 射出率の平均値は 0.765 であった。天空放射放射量の計算値は、測定値に対して平均的な値を取っているが、さらに検討が必要である。
- (3) 提案した境界モデルは、本実験のように湿潤養生等を行わない場合、気化熱の影響を無視することで実現象を良く表現できる。
- (4) 晴天時の日中は正味全天日射量の影響が

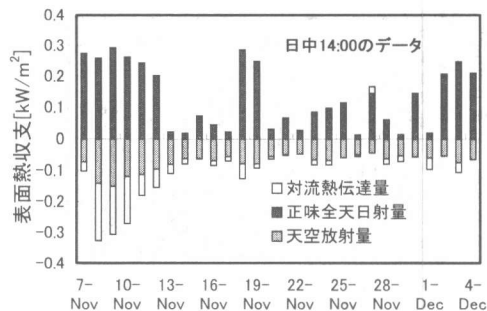


図-14 表面熱収支の成分 (Type-A)

大きい。また、若材齢時は発熱により表面温度が高く、対流熱伝達と天空放射の放熱が大きい。

今後は、季節別特性、各種養生方法と気化熱の関係、応力等の検討が必要である。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金(国際学術研究:09045059)の支援を受けて行った。

謝辞: 本実験は、東京電機大学卒業生 高橋誠二君および田底貴之君、長岡技術科学大学卒業生 細山陽司君に多くの作業協力を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の構造・耐久性設計境界問題研究委員会報告書，1998.7.
- 2) 土木学会：舗装工学研究小委員会報告書，1997.6.
- 3) 松井邦人，T.F.Smith，西田德行，椎名貴快：輻射熱の影響を考慮したマスコンクリートの温度解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.1281-1286，1996.6.
- 4) 高橋誠二，ほか：コンクリート躯体温度に及ぼす気象現象の影響評価，土木学会第 53 回年次学術講演会概要集，第 5 部門，pp.712-713，1998.10.
- 5) 西田德行，ほか：コンクリート躯体温度に影響を及ぼす気象現象について，土木学会第 53 回年次学術講演会概要集，第 5 部門，pp.714-715，1998.10.
- 6) 例えば，丸山暉彦，ほか：アスファルト混合物層の温度推定方法，土木学会第 47 回年次学術講演会概要集，第 5 部門，pp.34-35，1992.9.
- 7) ASHRAE, 1993 Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Ga. 1993.
- 8) Watmuff, J.H., Charters, W.S. and Proctor, D.: Solar wind induced external coefficients for solar collectors, COMPLES 2, 56, 1977.
- 9) B.Molineaux, B.Lachal, and O.Guisan: Thermal Analysis of Five Outdoor Swimming Pools Heated by Unglazed solar Collectors, *Solar Energy*, Vol.53, No.1, pp.21-26, 1994.
- 10) 山川秀次，笠原 清，小林精一：マスコンクリートの熱伝達率試験方法の検討，土木学会第 37 回年次学術講演会概要集，第 5 部門，1982.