

論文 輻射熱の影響を考慮したマスコンクリートの温度解析

松井邦人*1・T.F. Smith*2・西田德行*3・椎名貴快*4

要旨:マスコンクリートは水和作用により生じる熱エネルギーのため、躯体内部の温度が上昇する。この熱エネルギーは躯体内部を伝導し、岩盤や大気に伝達する。コンクリート表面と大気との境界面における熱収支として通常対流熱伝達を考えている。しかし、野外に打設されたコンクリートでは、日射量、放射熱、水分の蒸発による気化熱等も躯体温度の変動に影響すると思われる。本研究では、これらの個々の因子が内部温度の変化に与える影響を調べるものである。

キーワード:マスコンクリート、水和熱、温度解析、全天日射、天空放射、気化熱

1. はじめに

構造物の温度解析、温度応力解析を精度良く行うためには、熱エネルギーの入出を的確に評価することが必要である [1]。秋田等 [2] はPC貯水タンクを想定した模型水槽を作り、温度分布を測定し、太陽からの日射、放射を考慮した理論計算温度と比較している。吉田等 [3] は日射熱によるダムの温度分布と変形を解析し、実測結果と比較している。また、清水等 [4] はマスコンクリートのひび割れに及ぼす日射の影響を検討している。

コンクリート構造物内の非線形温度分布はひび割れの原因になり、精度良い温度解析が必要になる。若材齢マスコンクリートの温度応力解析に関する研究は数多くなされているが、そこで温度解析が必要になる。マスコンクリート打設直後は養生マットで覆われることもあり、外界との間の通常熱伝達は対流だけを考えている。しかし、野外にある構造物は太陽から構造物に入射するエネルギー、構造物が天空に放射するエネルギー、構造物の内部で発生するエネルギーのバランスが保たれている。また、構造物の表面を覆う養生マットの影響を熱伝達係数の中に入れて評価することは工学的に便利な方法であるが、養生マットの水分の蒸発が躯体表面の温度変化を小さくしていると予測できる。本研究では、数値シミュレーションによりこれら因子の影響を評価するのが目的である。

2. 温度解析

2.1 対象構造物の構成

ここで解析の対象としているシステムは図-1に示すように、厚さ D_r 岩盤の上に横たわる厚さ D_c のマスコンクリートからなっている。岩盤表面から十分な深さ $x = D_c + D_r$ では温度が一定 T_g と考えることができる。コンクリート表面 $x = 0$ において、外界との間の熱の移動は通常対流熱伝達でモデル化されている。しかし、野外に横たわる構造物是对流熱伝達以外にも色々な熱伝達メカニズムで熱のやり取りが行われていると考えることができる。ここでは、対流以外に太陽か

*1 東京電機大学教授 理工学部建設工学科、Ph.D. (正会員)

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

*3 西松建設(株)技術研究所技術部土木技術課、(正会員)

*4 東京電機大学 理工学部建設工学科

らマスコンクリートへ伝達される日射、マスコンクリートから天空への放射、水分蒸発による気化熱について、それらの個々の影響とそれらの総合的な影響を検討するため、モデル化を行っている。

2.2 支配方程式と境界条件

岩盤上にマスコンクリートが打設されたとすると、着目点の温度と時間の関係は次式のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

マスコンクリート躯体の部分では、示方書に記載されている下記のような発熱モデルを用いることにする。

$$\dot{Q} = \rho_c c_c Q_\infty \gamma e^{-\gamma t} \quad (2)$$

ここに Q_∞, γ は、水和発熱モデルのパラメータである。

岩盤では、熱が発生しないので \dot{Q} はゼロとなり、大気とコンクリート躯体の境界条件は次式で与えられる。

$$k_c \frac{\partial T}{\partial x} + q = 0 \quad (3)$$

ここに、 q は躯体表面における熱流入であり、対流伝達 q_{con} 、全天日射 q_{sol} 、天空放射 q_{sky} および水分蒸発の気化熱による熱損失 q_{evp} の和で表される。すなわち、

$$q = q_{con} + q_{sol} + q_{sky} + q_{evp} \quad (4)$$

対流伝達はニュートン則により、

$$q_{con} = h_c (T_a - T_s) \quad (5)$$

と表すことができる。 T_s [°C] はコンクリートの表面温度、 T_a [°C] は気温である。 h_c は対流熱伝達係数と呼ばれ、コンクリート表面の粗度や風速の影響を受ける。[°C] は温度が摂氏であることを意味している。

コンクリート表面（受光面）の単位面積に単位時間あたりに入射する全天日射量を S_o 、コンクリートの吸収率を α とすると、躯体内に伝達されるエネルギー q_{sol} は [5]

$$q_{sol} = \alpha S_o \quad (6)$$

天空放射による熱流束 q_{sky} は次式で与えられる。[6]

$$q_{sky} = \varepsilon \sigma (T_{sky}^4 - T_s^4) \quad (7)$$

ε は放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数（ $= 5.67 \times 10^{-11} [kW/m^2 K^4]$ ）。ここでは、 T_{sky} [K] は天空温度であり、次式から計算できる。[6]

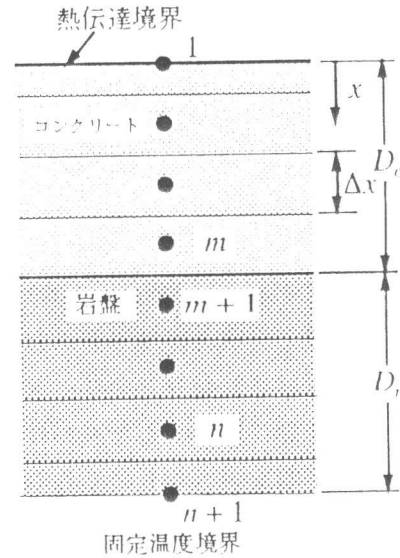


図-1 マスコンクリートモデル

$$T_{sky} = T_a \left\{ 0.711 + 0.0056 T_{dp} + 0.000073 T_{dp}^2 + 0.013 \cos \left(\frac{\pi t}{12} \right) \right\}^{1/4} \quad (8)$$

$T_a [K]$ は気温 (乾球温度)、 $T_{dp} [^{\circ}C]$ は露点温度である。

気化熱の計算は適切な文献が見あたらないので文献 [5] を参考。水分の蒸発量による熱損失: q_{evp} を式 (9) より計算した。

$$q_{evp} = - \left(0.320 + 0.282 v \right) (p_{cs} - \phi p_{ws}) \quad (9)$$

ここに $v [m/s]$ は風速、 $p_{cs} [Pa]$ はコンクリート表面の飽和蒸気圧、 ϕ は相対湿度、 $p_{ws} [Pa]$ は飽和蒸気圧である。

3. 数値計算例

3.1 問題設定

2. で述べた対象システムを、コントロールボリューム法 [8] を用いて計算し、境界におけるそれぞれの熱エネルギーに影響する個々の因子が躯体内部の温度に与える影響を調べた。簡単にするため、気温 $T_a [^{\circ}C]$ は午後2時で最高になるように、

$$T_a = T_{ave} + T_{amp} \sin \pi \left(\frac{t}{12} - \frac{2}{3} \right) \quad (10)$$

で表されるものと仮定している。ここに、 T_{ave} 、 T_{amp} は気温の平均とその片振幅である。式 (8) の露点温度を文献 [5] に従って計算するとき、相対湿度が必要となる。ここでは、気温と同様に簡単にするため、相対湿度は気温が高いとき低く、低いとき高くなることを考慮して、式 (11) でモデル化する。

$$\phi = \phi_{ave} - \phi_{amp} \sin \pi \left(\frac{t}{12} - \frac{2}{3} \right) \quad (11)$$

ここに、 ϕ_{ave} は平均相対湿度、 ϕ_{amp} はその片振幅である。

直達日射と天空散乱日射の総和を全天空日射量 S_o と呼んでいる。 S_o は季節、緯度、天候等により異なる。また受光面の向きによっても変化する。ここでは、北緯32度において8月に水平な受光面に入射する全天空日射量を用いている。文献 [5] では、晴天の日の時刻と全天空日射量の関係が離散量として与えられているので、式 (12) の回帰式で連続量に変換し、温度解析に用いている。

$$S_o = 7819.60 - 3331.9 t_s + 492.62 t_s^2 - 29.486 t_s^3 + 0.614224 t_s^4 \quad (12)$$

t_s は太陽時であり、必ずしも標準時とは一致しない。しかし、その差は大きくないので、ここでは標準時を用いて計算している。この式は、日の出から日没までの間で有効であるが、雲が多くなるとそれを考慮して補正する必要がでてくる。また、日没から日の出までの間ではゼロとなる。

ここでは問題設定を単純にしているが、例えば理科年表を利用することにより現実的な問題設定が可能となる。ここで、解析に使用したパラメータを表-1に整理した。

表-1 解析条件

項目	記号	数値	単位
コンクリート厚	D_c	1.5	m
コンクリート熱伝導率	k_c	2.67	W/m-K
コンクリート密度	ρ_c	2300	kg/m ³
コンクリート比熱	C_c	1.17	kJ/kg-K
コンクリート初期温度	T_{c0}	20.0	°C
断熱温度上昇実験定数	Q_{∞}	46.0	°C
断熱温度上昇実験定数	γ	1.10	1/day
岩盤厚	D_r	5.0	m
岩盤の熱伝導率	k_r	2.33	W/m-K
岩盤の密度	ρ_r	2600	kg/m ³
岩盤の比熱	C_r	0.80	kJ/kg-K
岩盤の初期温度	T_{r0}	15.0	°C
熱伝達係数	h	12.8	W/m ² -K
平均気温	T_{avr}	15.0	°C
平均気温からの片振幅	T_{amp}	5.0	°C
岩盤固定温度	T_k	15.0	°C
時間刻み	Δt	0.05	hr
コンクリートの節点数	m_c	15	
岩盤の節点数	m_r	50	
平均相対湿度	ϕ_{avr}	0.7	
平均相対湿度からの片振幅	ϕ_{amp}	0.2	

3.2 解析結果

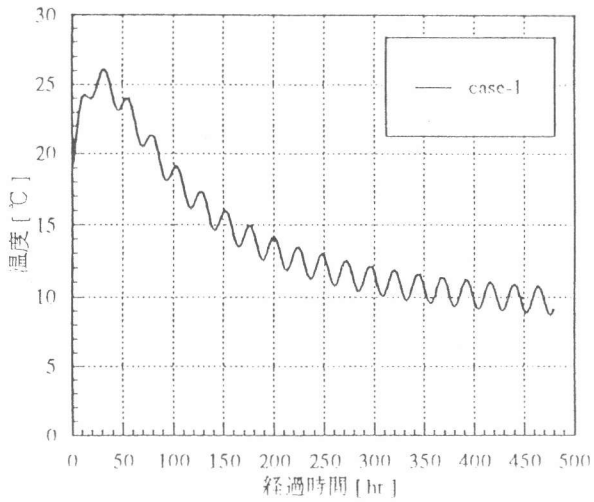
境界面における個々の因子が躯体温度に与える影響を調べるため、5種類の境界条件で解析を行っている。それらは、1) 対流熱伝達だけ、2) 対流熱伝達と全天日射、3) 対流熱伝達と天空放射、4) 対流熱伝達と気化熱、5) すべてを考慮である。

表-1の解析条件を用い、上に述べた5種類の境界条件で温度解析を行った。解析結果から、コンクリート表面における温度変化を図-2～図-6に示す。横軸は、コンクリート打設を午前8時としてそれからの経過時間を示している。

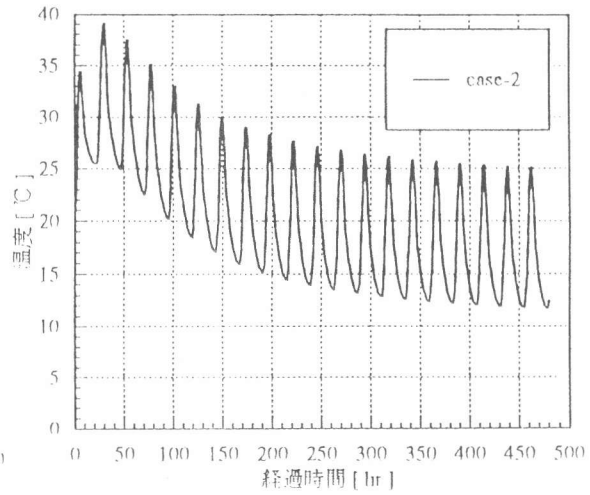
図-2は対流熱伝達によるコンクリート表面温度の変化を表しており、気温変化と同じ周期で変動がみられる。変動の振幅は気温が10[°C]に対して2[°C]程度になっている。図-3は全天日射の影響を加えた時のコンクリート表面における温度変化である。その変動幅は10[°C]以上と大きくなっている。図-2と比べ、最大温度も13[°C]ほど高くなっている。図-4は天空放射の影響を加えている。コンクリート表面の温度は対流熱伝達だけを考慮した場合と比べ5[°C]弱温度が低くなっている。図-5は対流熱伝達と水分蒸発による気化熱の影響を考慮して解析した結果である。図-2と比べると、ピーク時の温度で5[°C]ほど低い時間が経過するに従い差はなくなっている。図-6はすべての影響を考慮した時のコンクリート表面の温度変化を示している。図-3と類似しているが、ほぼ天空放射の影響だけ温度が低くなっている。

図-7は、図-6のピーク温度における、コンクリート内部の温度分布を示している。深くなるほどこれらの間の温度差は小さくなっている。天空放射と気化熱はコンクリート表面と内部との温度差を大きくする傾向があり、さらに検討する必要がある。

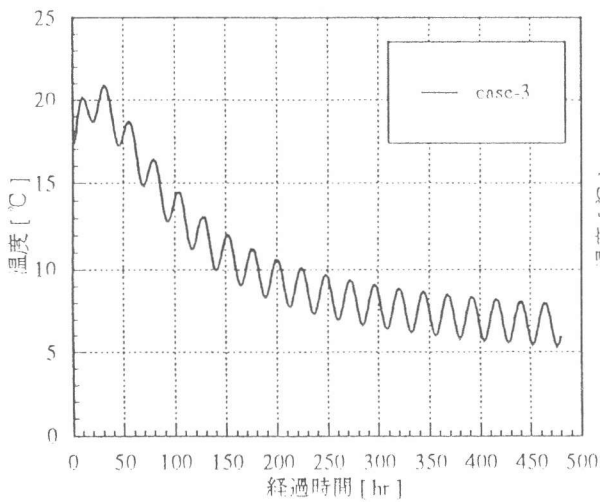
ここでは、マスコンクリートの温度解析を行うとき、養生マットの厚さを無視してコンクリート



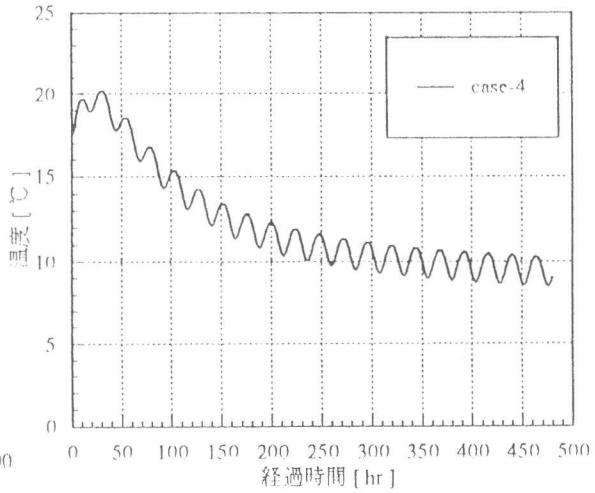
図—2 対流熱伝達を考慮



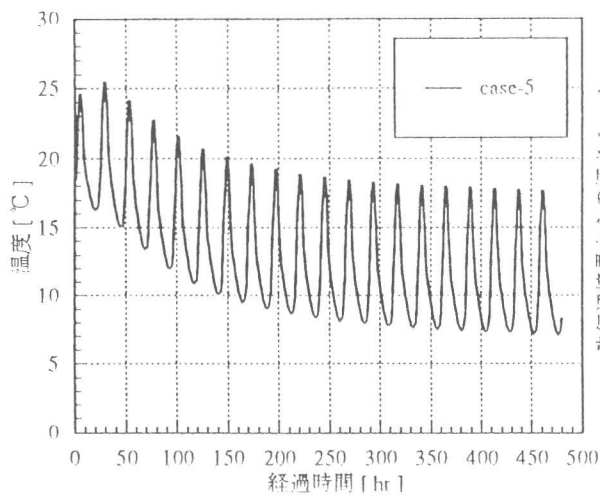
図—3 対流熱伝達と全天日射を考慮



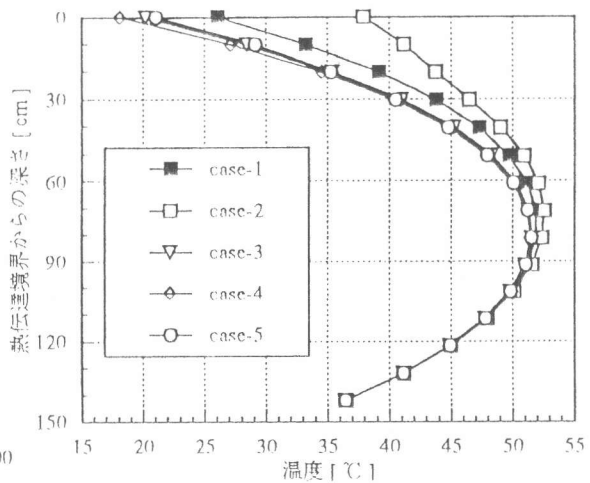
図—4 対流熱伝達と天空放射を考慮



図—5 対流熱伝達と気化熱を考慮



図—6 全てを考慮



図—7 温度分布

表面で直接熱の出入り起こることを仮定している。養生マットの厚さを考慮して解析するとこれらの傾向は減少することが期待できるが、決してなくなることはない。

4. 結論

マスコンクリートの温度解析において、躯体と大気境界条件として従来の対流熱伝達に加え、全天日射、天空放射、気化熱の影響を考慮した。計算結果から、対流熱伝達だけを考慮する場合と比較、次のことが明らかになった。

- 1) 全天日射は躯体表面温度に大きく影響する。日平均温度は高くなり、日温度変動幅も大きくなる。(図-3)
- 2) 天空放射、気化熱を考慮すると躯体表面温度を低く算定する。天空放射による熱損失は、気化熱による熱損失より大きい。(図-4, 図-5)
- 3) すべてを考慮する場合、躯体表面温度は日射の影響を受け、日温度変動幅は大きい。(図-6) 図-2と比べ温度が低くなっているのは、特に天空放射の影響を受けていると思われる。
- 4) 躯体内部の温度は深くなるほど境界条件の影響は小さい。しかし、天空放射と気化熱を考慮するとき、表面と内部の温度差が大きくなることは注意する必要がある。

ここで示した計算例は、最近の研究成果を整理した上で示した数値シミュレーションであり、使用したモデルの妥当性を検討する上で、実測データと比較することが重要であり、今後の課題である。

参考文献

- [1] Price, B.A. and Smith, T.F. : Thermal Process of Composite Building Envelopes Accounting for Thermal Radiation, Energy Convers. Mgmt. Vol.36, No.1, pp.23-33, 1995.
- [2] 秋田宏、尾坂芳夫：日射を受けるコンクリート壁の温度分布に関する考察、土木学会論文集、第378/V-6, pp147-155, 1987年2月。
- [3] 吉田弥智、田辺忠顕、二羽淳一郎、弼川幸司：日射による大型コンクリート構造物の温度および変形解析、土木学会論文集、第420号/V-13, pp.259-268, 1990年8月。
- [4] 清水昭男、伊藤洋、坂口雄彦：マッシュなコンクリート構造物の温度ひび割れ発生に及ぼす日射の影響、第8回コンクリート工学年次講演論文集、pp.13-16, 1986
- [5] ASHRAE, 1993 Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Ga (1993) .
- [6] Duffie, J.A. and Beckman, W.A. : Solar Engineering of Thermal Processes, Second Edition, John Wiley & Sons, 1991.
- [7] Berdahl P. and Martin. M. : Emissivity of Clear Skies, Solar Energy, Vol.32, No.5, pp.663-664, 1984
- [8] Incropera F.P. and Dewitt D.P. : Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 1990.