

論文

[1227] マスコンクリートの不確定因子の影響を考慮した FEM 温度応力解析

潮田和司*1・藤本直也*2・松島学*3・松井邦人*4

1. はじめに

コンクリートの温度応力に影響する因子は、セメントの発熱率、コンクリートの熱伝導率、熱伝達率、比熱、熱膨張係数、外気温等数多い。温度応力の解析では、これらの因子の値として過去のデータを参考とした標準値あるいは実験を行いそのデータの平均値が用いられている。しかし、これらの因子を確定量としてではなく、確率量として扱いそのばらつきの影響を定量的に評価することも重要である。

筆者等は今までに、不確定因子の影響を調べるため、これまでに蓄積されてきた研究成果を参考として温度応力に影響する因子の平均値と標準偏差を定め、モンテカルロシミュレーションにより温度応力を求め、さらに温度ひび割れ指数の分布より温度ひび割れの発生確率を評価し、解析でのばらつきを考慮することの重要性を評価してきた[1]。

本研究は、上記の研究を進め、不確定因子のマスコンクリートへの影響を調べるために、躯体厚さを因子として、FEM温度応力解析を用いて、その温度および温度応力のばらつきがどのように変化するかを調べたものである。

2. コンクリート躯体の温度および温度応力解析

図-1の様な半無限の岩盤上に打設されたマスコンクリートを考えることにする。熱源はコンクリート躯体の中にあり、そこでセメントの水和反応により発生した熱は、躯体に接する空気と岩盤に伝達する。解析ではマスコンクリートをFEMによりモデル化した。

温度解析に必要なパラメータを表-1に整理した。表-1は本解析で確率変数として扱っているパラメータの基準値(平均値)と標準偏差であり、文献[2]~[9]を参考に設

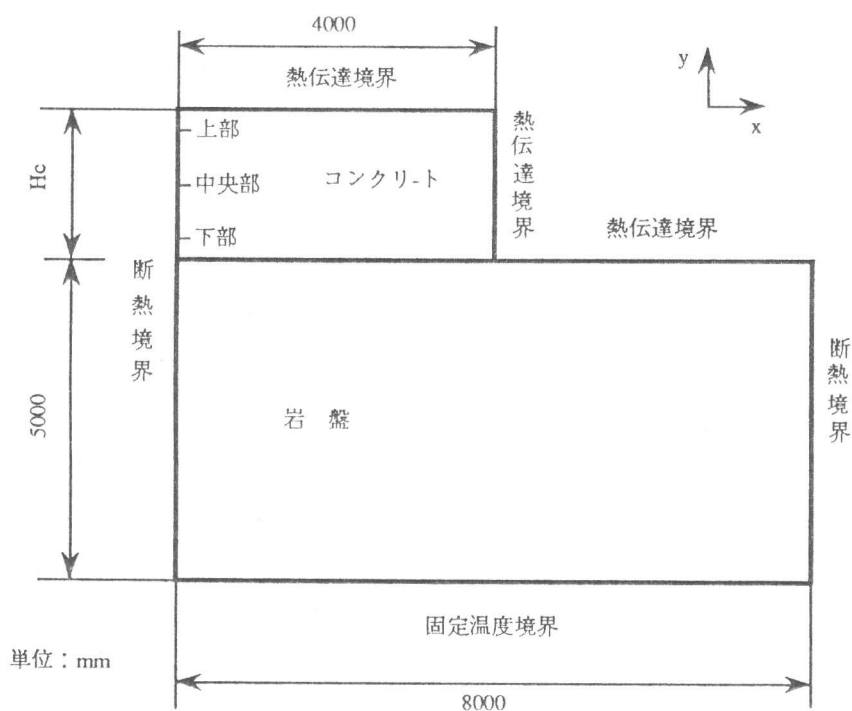


図-1 解析モデル

- *1 西松建設(株)技術研究所土木技術課 (正会員)
- *2 東京電機大学大学院理工学研究科建設工学専攻
- *3 東電設計株式会社技術開発本部耐震技術部課長 工博(正会員)
- *4 東京電機大学教授理工学部建設工学科、Ph.D.(正会員)

表-1 温度・温度応力解析のパラメータ (コンクリート)

	分布式	平均値	変動係数	分布形状	備考
熱伝達率 α_A [2]	$\alpha_A = \bar{\alpha}_A (1 + e_\alpha^*)$	$\bar{\alpha}_A = 11.25 + 5.18V$ V: 風速	$e_\alpha^* = N(0.0, 0.037)$	N	風速 2.0m
熱伝導率 λ_c [3]	$\lambda_c = \bar{\lambda}_c (1 + e_\lambda^*)$	$\bar{\lambda}_c = 2.066 - 0.00234T$ T: 温度	$e_\lambda^* = N(0.0, 0.120)$	N	温度 20.0°C
終局断熱温度 昇量 Q_∞ [4]	$Q_\infty = \bar{Q}_\infty (1 + e_Q^*)$	$\bar{Q}_\infty = 0.1108C + 8.81$ C: セメント量	$e_Q^* = N(0.0, 0.133)$	N	打ち込み温度 20°C C=284kg/m ³
温度上昇速度に 関する定数 γ [4]	$\gamma = \bar{\gamma} (1 + e_\gamma^*)$	$\bar{\gamma} = 0.00415C - 0.271$ C: セメント量	$e_\gamma^* = N(0.0, 0.251)$	N	
断熱温度上昇式 $Q(t)$ [5]	—	$Q(t) = Q_\infty (1 - e^{-t})$ t: 材令0~30日	—	—	この式は、確 定量とする
比熱 C [6]	$C = \bar{C} (1 + e_C^*)$	$\bar{C} = \frac{725}{\rho}$ ρ : 密度	$e_C^* = N(0.0, 0.040)$	N	密度 2312.0kg/m ³
28日圧縮強度 $f_c'(28)$ [7]	—	—	0.115	L	呼び強度 210kgf/cm ²
91日圧縮強度 $f_c'(91)$ [8]	$f_c'(91) = \bar{f}_c'(91) (1 + e_f^*)$	$\bar{f}_c'(91) = f_c'(28) \times A$ A=1.13	0.1	N	普通ポルトラ ンドセメント W/C=50
材令t日 の圧縮強度 $f_c'(t)$ [5]	$f_c'(t) = \bar{f}_c'(t) (1 + e_{fc}^*)$	$\bar{f}_c'(t) = \frac{t}{a+bt} f_c'(91)$ a=4.5 b=0.95 t=材令0~30日	0.1	N	普通ポルトラ ンドセメント
ヤング率 $E_c(t)$ [5]	$E_c(t) = \bar{E}_c(t) (1 + e_E^*)$	$\bar{E}_c(t) = \psi(t) \times 1.5$ $\times 10^4 \sqrt{f_c'(t)}$ t=材令0~30日	0.1	N	—
ポアソン比 ν [9]	—	0.171	0.120	R	$\frac{1}{7} \sim \frac{1}{5}$ の範囲
引張強度 $f_A(t)$ [5]	$f_A(t) = \bar{f}_A(t) (1 + e_{fA}^*)$	$\bar{f}_A(t) = 1.4 \times \sqrt{f_c'(t)}$ t=材令0~30日	0.115	N	圧縮強度と同 じ変動係数

分布形状・・・N: 正規分布, L: 対数正規分布, R: 矩形分布

表-2 その他のパラメータ

因子	基準値
岩盤の熱伝導率 (kcal/mh°C)	1.70
岩盤の比熱 (kcal/kg°C)	0.219
岩盤の初期温度 (°C)	17.5
岩盤の密度 (kg/m ³)	2600
岩盤の熱膨張率 (1/°C)	10×10 ⁻⁶
岩盤のヤング率 (kgf/cm ²)	1.0×10 ⁵
岩盤のポアソン比	0.2
コンクリートの熱膨張率(1/°C)	10×10 ⁻⁶
コンクリートの初期温度 (°C)	20.0
固定温度境界面の岩盤温度(°C)	15.0
外気温 (°C)	20.0

定した。表中に見られるように、そのばらつきは判断できないものもあり、本研究ではこれらの因子の変動係数として28日圧縮強度のばらつきと同程度と考え、工学的な判断により10%を見込んだ。さらに、各データから分布形状も設定した。また、温度解析に使用したその他のパラメータを表-2に整理した。温度応力解析に必要なパラメータも表-1に整理した。

各パラメータのばらつきが温度および温度応力にどのように影響するかを調べるために、モンテカルロシミュレーションを行った。表-1のパラメータについて、それぞれの平均値と標準偏差に従って各因子の分布形状を考慮した100個の乱数を発生させた。なお、

著者らの1人の研究によれば、5%程度の危険確率は、100個程度の乱数で十分に精度良く求められることを示している[10]。

3. 温度解析の結果

図-2.aに躯体厚さが1.4mの場合のコンクリート躯体の中央部の温度と時間の関係を示す。同図は、各時刻歴の平均値と標準偏差から求めた温度の95%信頼区間もあわせて示す。同様に、図-2.bには躯体厚さが2.8mの場合を示す。図に見られるように、時刻によりその変動幅が変化し、入力因子の変動が結果に大きく影響しているのがわかる。

図-3.aに温度の平均値が最大となる時間の平均値と躯体厚さとの関係を示す。当然のことではあるが、中央部の温度の平均値が躯体厚さが厚くなるにつれて、高くなる傾向にあるのがわかる。次に、その時のばらつき、つまり標準偏差について同様な検討を行った。図-3.bにその結果を示す。図に見られるように、温度が高い中央部で、躯体厚さが厚くなるにつれて、高くなる傾向にあるのがわかる。このことは、言い換えると、構造物の形状等の影響により、ばらつきも異なっ

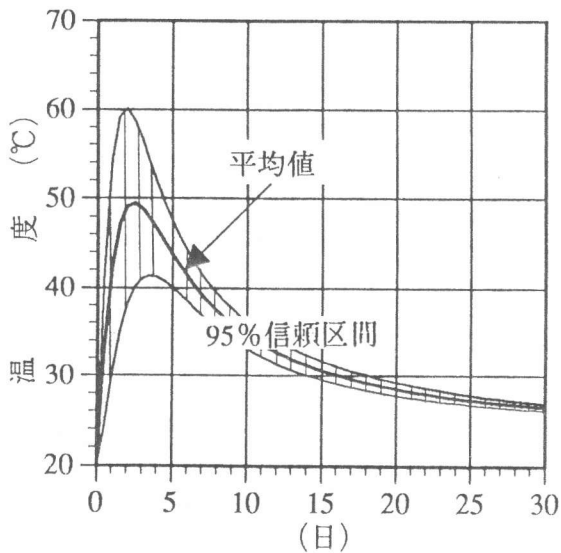


図-2.a 温度の平均値と95%信頼区間 (中央部,1.4m)

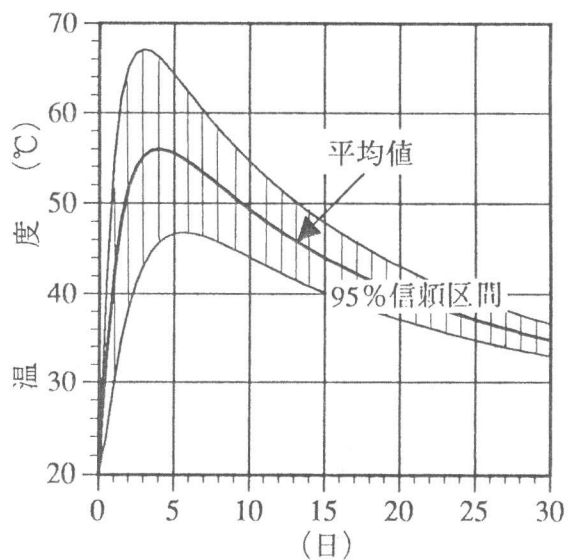


図-2.b 温度の平均値と95%信頼区間 (中央部,2.8m)

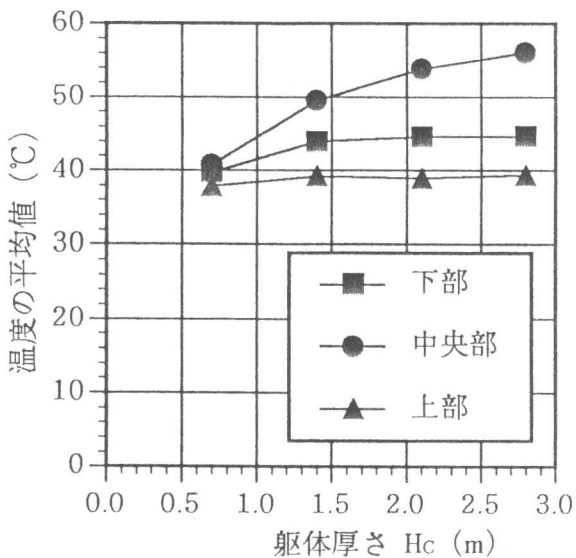


図-3.a 温度の平均値と躯体厚さ (最大値)

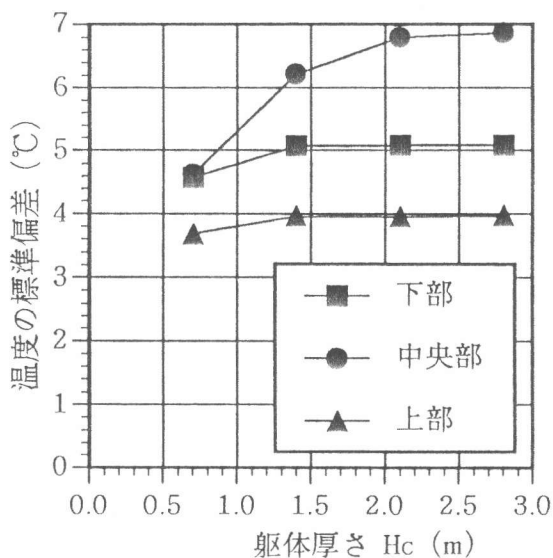


図-3.b 温度の標準偏差と躯体厚さ (最大値)

てくることを示唆している。

4. 温度応力解析の結果

図-4.aに躯体厚さが1.4mの場合のコンクリート躯体の中央部の温度応力と時間の関係を示す。同図は、各時刻歴の平均値と標準偏差から求めた温度応力の95%信頼区間もあわせて示す。同様に、図-4.bには躯体厚さが2.8mの場合を示す。

図-5.aに温度応力の平均値が最大となる時間の平均値と躯体厚さとの関係を示す。図に見られるように、温度とはその傾向は一致せず、中央部では躯体厚さが2.1mの時が一番厳しい状態になる。次に、その時のばらつき、つまり標準偏差について同様な検討を行った。図-5.bにその結果を示す。図に見られるように、各温度応力のばらつきは、どの位置でも躯体厚さが厚くなるにつれ

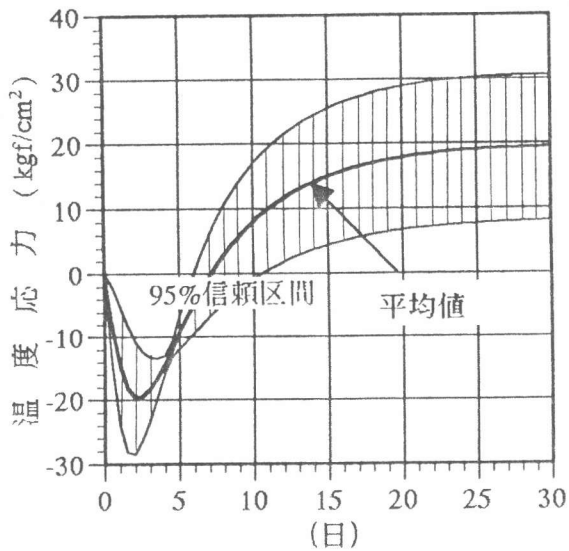


図-4.a 温度応力の平均値と95%信頼区間 (中央部,1.4m)

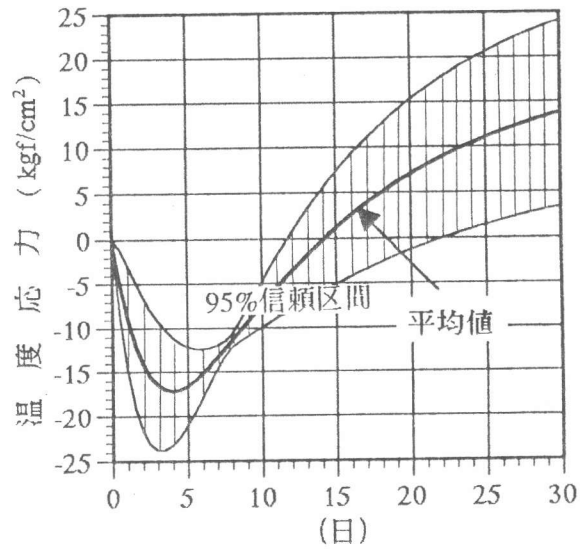


図-4.b 温度応力の平均値と95%信頼区間 (中央部,2.8m)

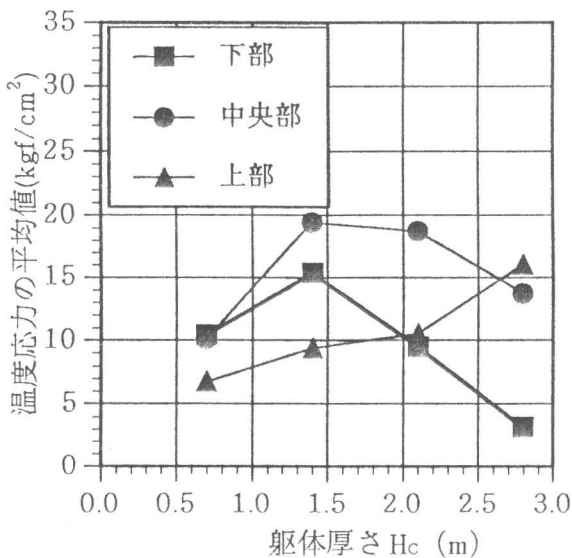


図-5.a 温度応力の平均値と躯体厚さ (最大値)

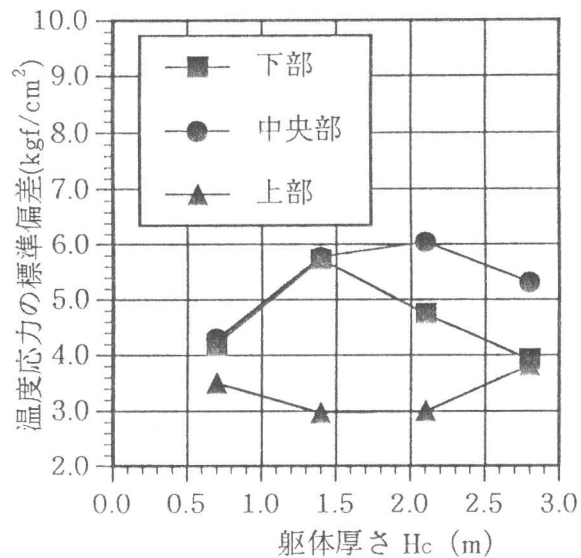


図-5.b 温度応力の標準偏差と躯体厚さ (最大値)

て、大きくなる傾向にあるのがわかる。

この結果を利用して、ひび割れ発生の安全性の性能評価を行う。一般に、温度ひび割れ指数で表され、上記の結果 $\sigma_t(t)$ とコンクリートの引張強度 $f_t(t)$ の関係から次式で表される。

$$I_{cr}(t) = \frac{f_t(t)}{\sigma_t(t)} \quad (1)$$

ここで、 t は時間である。 I_{cr} が1.0より小さくなったときにひび割れが発生すると考えている。図-6.a,b,c,dに $t=30$ 日での各躯体厚さの温度ひび割れ指数の分布（中央部）を示す。図に見られるように、躯体厚さが異なることにより、温度ひび割れ指数のばらつきも変化することがわかる。このようなことから、温度応力でも構造物の形状等の影響により、ばらつきも異なってくることを示唆している。また、各図に見られるように温度ひび割れ指数は、対数正規分布で近似できる。この現象を明らかにするために、躯体厚さを横軸に、中央部のひび割れの温度ひび割れの発生確率、温度応力の最大値の平均値および標準偏差の関係を図-7に示す。図に見られるように、温度ひび割れの発生確率は躯体厚さが1.4m、2.1mの時が安全性が低く、逆に躯体厚さが薄い0.7mの

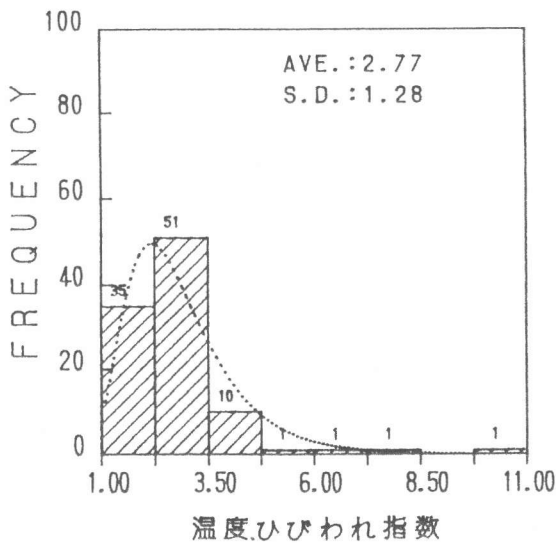


図-6.a I_{cr} の分布 (Hc=0.7m,30日,中央部)

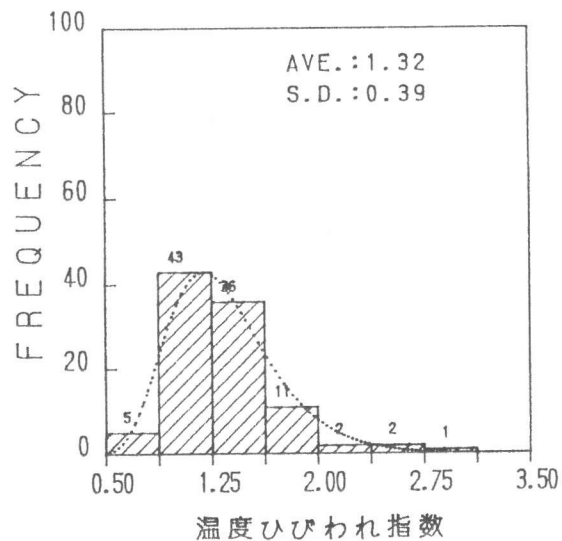


図-6.b I_{cr} の分布 (Hc=1.4m,30日,中央部)

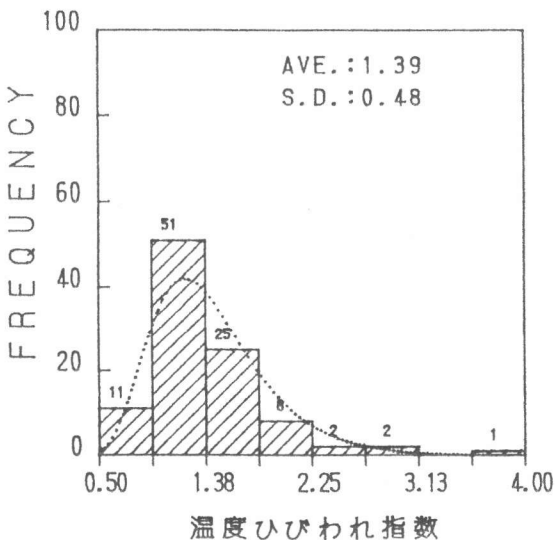


図-6.c I_{cr} の分布 (Hc=2.1m,30日,中央部)

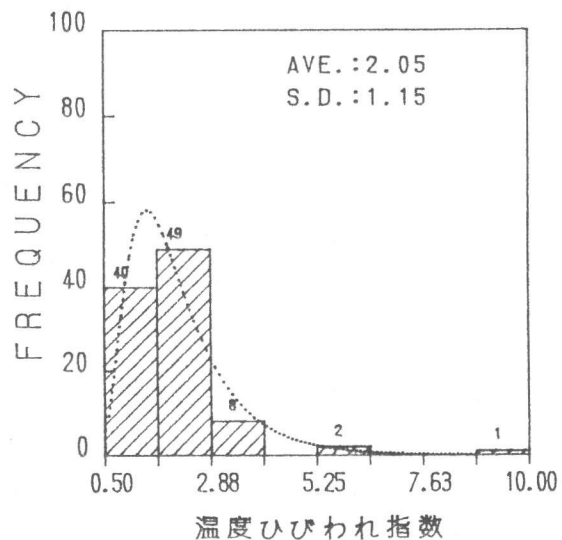


図-6.d I_{cr} の分布 (Hc=2.8m,30日,中央部)

時は安全性が高いことを示している。標準偏差も躯体厚さにより変動している。

5. おわりに

本論文は、マスコンクリートの温度応力に影響する主な因子に対し、参考文献より推定した平均値と標準偏差を用い、各因子の分布形状を考慮した乱数を発生させ、モンテカルロシミュレーションにより温度および温度応力に及ぼす影響を調べた。これらの因子の間には相関があるものと考えられるが、ここでは全ての因子は独立であると仮定して計算した。その結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 温度および温度応力解析では、入力した因子のばらつきが同じでも、構造物の形状等の影響によりばらつきも異なる。
- (2) 温度ひびわれの発生は、対数正規分布で近似することができる。温度ひびわれの発生確率を計算することにより定量的に安全性を評価することができる。

参考文献

- 1) 松井邦人、西田徳行、土橋吉輝、潮田和司：不確定因子の影響を考慮したマスコンクリートの温度応力解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.1, pp.1143~1148, 1993.
- 2) 津崎淳一、武藤正人、荒井幸夫、中原博隆：養生中のコンクリートの内部温度に与える風速の影響、第45回年次学術講演会講演概要集、V-181, pp.388~389, 1990.
- 3) 黒田一郎、太田俊昭、日野伸一：高温下におけるコンクリートの力学的性質とRCはりの熱伝導・温度応力特性、第46回年次学術講演会講演概要集、V-217, pp.450~451, 1991.
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー、pp.55~56, 1986.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）、pp.136~140, 1991.
- 6) 徳田弘、庄谷征美：コンクリートの熱特性値の測定とその二、三の考察、土木学会論文報告集、No.212, pp.89~98, 1973.
- 7) 日本建築学会：コンクリートの品質管理指針・同解説、pp.161~168.
- 8) 社団法人日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧、pp.47~50
- 9) 小林一輔著：最新土木学会シリーズ、コンクリート工学、森北出版株式会社、pp.77~78
- 10) 松島学、松井邦人：採取個数から母集団の推定誤差に関する一考察、土木学会第47回年次学術講演会、I-525、pp.1224~1225、1993.

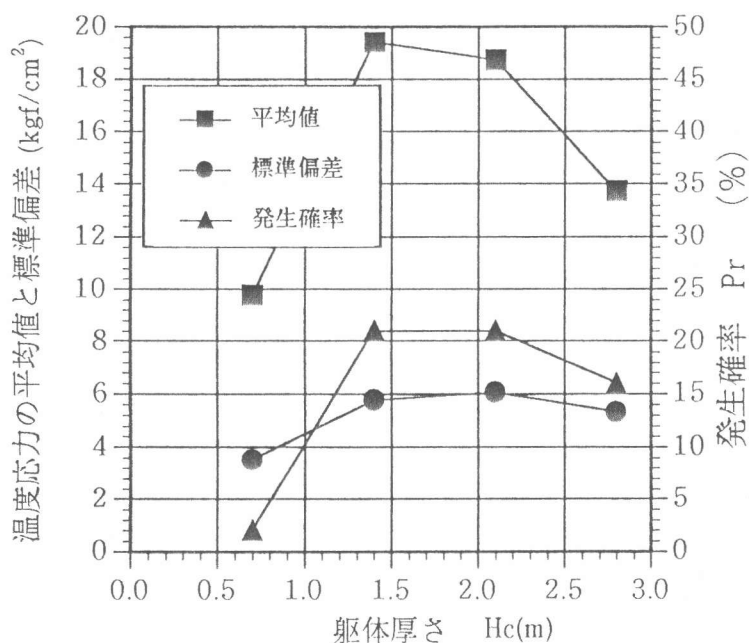


図-7 温度応力の平均値、標準偏差、発生確率（30日、中央部）