

論文 水和反応モデルによる高強度マスコンクリートの構造体の 初期温度履歴分布予測

朴 起蓬*1・野口 貴文*2・友澤 史紀*3

要旨: セメント種類, 調合条件, 環境条件のみを入力として, コンクリート中のセメントの水和発熱速度を定量化するとともに, 任意の温度履歴を受けるコンクリート構造物の温度解析に対応できる水和反応モデルを構築することを目的として, 本研究では, 既存の水和反応モデル(友澤式)の係数算定方法にニューラルネットワークを適用し, 得られた各係数を用いて, 高強度マスコンクリートの初期温度履歴分布の予測を行い, 実大模擬部材の実験結果と比較を行った。その結果, 材料や調合の特性のみによって, コンクリート構造物内の温度上昇量と温度分布を予測することができた。

キーワード: 水和反応モデル, ニューラルネットワーク, 水和発熱速度, 温度履歴分布

1. はじめに

マスコンクリートや高強度コンクリートにおいては, 水和熱によるコンクリートの温度上昇やそれによる温度ひび割れの発生が大きな問題になっている。このひび割れを防ぐには, コンクリート各部位の温度応力を算定しこの温度応力がひび割れ発生の限界内になるように, コンクリートの製造段階で材料の選定と調合の決定を制御することが必要である。そのためには, 温度応力の解析精度を向上させることが優先しされなければならない。温度応力の解析結果に最も敏感に影響を及ぼす要因としては, セメントの発熱に伴う構造物内の温度上昇量と温度分布である¹⁾。

従来から行われてきたコンクリート構造物の温度解析では, 断熱温度上昇曲線を用いたもので, 比較的断面が小さく, 単位セメント量の多い構造物には, 熱伝導や放熱が生じるため, 適用できるものではなかった。そこで, セメントの水和反応に着目して, その発熱過程を予測しようとする研究が進められてきた^{1), 2), 3)}。

しかし, 多くの研究は式中の各係数をコンダクションカロリメータによって実測された実験

値から求めている。最近, 水セメント比が非常に小さい高強度コンクリートの温度解析にはその限界が予想される。

本研究では, 著者の一人によって提案された水和反応モデルの係数算定にニューラルネットワークの適用を試み, 得られたシステムを用いて, 実験によることなく, 材料や調合の特性のみによって, 高強度マスコンクリート構造体内部の温度履歴分布の予測を行い, 本システムの適用性を検討したものである。

2. 水和反応モデル

本モデル⁴⁾は, 水和反応速度を反応率の関数として表現したものであり, 水和過程のセメント粒子は初期皮膜, 内部水和生成物及び未反応セメントから構成されている。すなわち, セメント粒子を球形と仮定し, 水和反応の進行に伴い, セメント粒子の周囲に形成された初期皮膜および水和生成物中を, 外部の水と新たに生じた生成物が逆向きに相互拡散する速度と, 未反応セメント粒子表面での化学反応速度の両者により, 水和発熱速度が決まると仮定し, 次のように表される。

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 工修 (正会員)

*2 東京大学助教授 工学系研究科建築学専攻 工博 (正会員)

*3 東京大学教授 工学系研究科建築学専攻 工博 (正会員)

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{3C_w}{\nu\rho r_0^2} \frac{1}{\frac{1}{k_d r_0 \alpha^{2/3}} + \frac{\alpha^{-1/3} - (2-\alpha)^{-1/3}}{D_e} + \frac{1}{k_r r_0 \alpha^{2/3}}} \quad (1)$$

ここに、 α ：未反応率、 ρ ：セメント密度
 ν ：水とセメントの反応の化学量論比
 C_w ：水和生成物の外側の水の濃度
 D_e ：有効拡散係数
 k_r ：セメントの反応速度係数
 k_d ：初期皮膜内の物質移動係数

ここで、初期皮膜内の物質移動係数は式(2)のように仮定した。

$$k_d = \frac{B}{(1-\alpha)^{1.5}} + C(1-\alpha)^3 \quad (2)$$

式(2)の第1項は反応の進行に伴って反応抵抗が増大することを示し(不透性皮膜の形成)、第2項は反応抵抗が最大になった後、急激に減少することを示しており(皮膜の破壊プロセス)、この項により潜伏期を含む初期の反応をかなり忠実に表現することができる。水和生成物中の水の有効拡散係数を式(3)で仮定する。

$$D_e = D \left(\ln \frac{1}{1-\alpha} \right)^2 \quad (3)$$

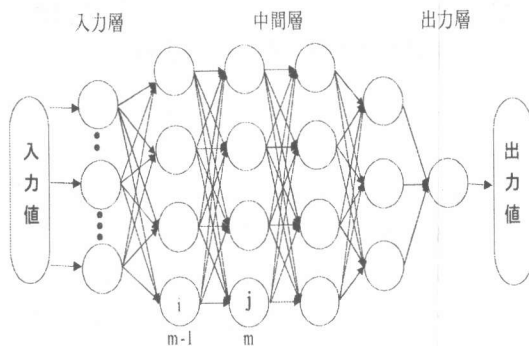
水和反応に関する温度 T の影響は、物質移動に関する各係数についてアレニウスの法則に従って導入されており、次式のように 20°C を基準として表されている。

$$\begin{aligned} B &= B_{20} \exp\{-\beta_1(1/T - 1/293)\} \\ C &= C_{20} \exp\{-\beta_2(1/T - 1/293)\} \\ D &= D_{20} \exp\{-\beta_3(1/T - 1/293)\} \\ k_r &= k_{r,20} \exp\{-E/R(1/T - 1/293)\} \end{aligned} \quad (4)$$

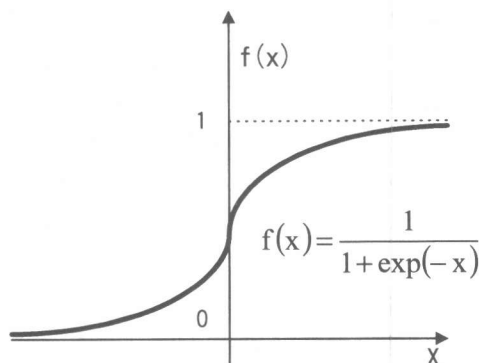
3. ニューラルネットワークによる係数算定

3.1 ニューラルネットワークの構成^{5),6)}

ニューラルネットワーク(以下、NNsと略記)は人間の脳神経細胞網を手本にした高度並列分



図一 階層型ニューラルネットワーク



図二 シグモイド関数

散型の情報処理の一つであり、ネットワークの構造によって、階層型と相互結合型に大別される。本研究では数式化の容易な階層型ネットワークを用いた。

階層型ニューラルネットワークは、非線形性に強いことや学習パターンを滑らかに内挿し、未学習の入力に対しても妥当な値を出力できること、またいったん学習が終了してしまえば、積和演算を行うだけで出力が得られるなどの特徴を持っている。

階層型ニューラルネットワークは、図一に示すように各層内のユニット間には接続がなく、与えられた情報は入力層から中間層を介して出力層へと一方向のみに伝達されていく。入力層以外のユニットでは前層の各ユニットからの出力値に重み係数 ω を乗じたものの総和としき

い値との差を任意の出力関数に通して出力される。NNsの $m-1$ 層のユニット i から m 層のユニット j への動作を数式表示すれば、次のようである。

$$X_j^{(m)} = \sum_i \omega_{ij}^{(m-1,m)} \cdot Y_i^{(m-1)} - \theta_j^{(m)} \quad (5)$$

$$Y_j^{(m)} = f(X_j^{(m)}) \quad (6)$$

ここに、 $\omega_{ij}^{(m-1,m)}$: $m-1$ 層のユニット i から m 層のユニット j への重み係数(結合係数)
 $Y_i^{(m-1)}$: m 層のユニット i からの出力値、
 $X_j^{(m)}$: m 層のユニット j への入力の総和
 $\theta_j^{(m)}$: m 層のユニット j における閾値

なお、式(6)の関数 f は入出力関数であり、通常、出力値が $[0,1]$ 範囲で連続的に変化するシグモイド関数を用いられる。シグモイド関数は次式で与えられ、図-2 のように表示される。

$$f(x) = 1 / \{1 + \exp(-\alpha x - \theta)\} \quad (7)$$

本研究で用いる NNs は中間層を 4 層持つ多入力 1 出力の階層型とし、ユニットの入出力関数は $[0,1]$ 範囲のシグモイド関数を用いた。また、式(7)の α は 1.0 を用い、 θ は 0.0 とした。入力層のユニット数は 8、中間層のユニット数は 4,4,4,3 で総 15 である。

また、本研究では、学習アルゴリズムとして、教師データと出力データとの残差 2 乗和が最小となるように各層間のユニットの結合係数を変化させる誤差逆伝播学習則(Error Back Propagation)を採用した。

3.2 ニューラルネットワークによるセメント水和発熱速度の学習と評価

いままで、水和反応モデルを基に、セメントの水和発熱速度及び温度履歴分布予測を行う場合には、モデルの中の各係数は、コンダクションカロリメータによって実測された水和発熱速度曲線を用いて算定した^{3),7),8)}。しかし、既存

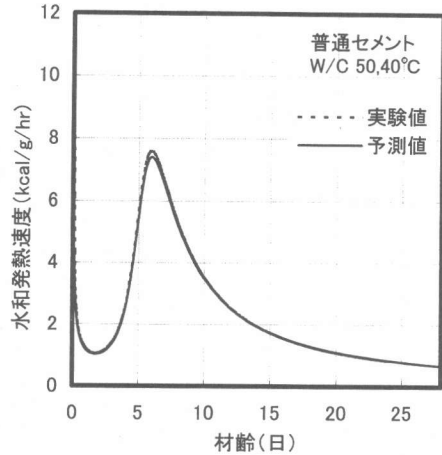


図-3 セメントの水和発熱速度予測 (一例)

の係数算定プログラムは、実験結果から入力値を見つけるための試行錯誤的な作業を必要とし、得られる係数には、個人差があった^{3),8)}。

しかし、NNs を利用するためには、学習データの正確さが基本になる。そこで、既存の係数算定プログラムを改良し、より正確にまた統一的に係数を求めることが行われた。その結果の一例として水セメント比 50%、環境温度 40°C での普通セメントペーストの水和発熱速度の予測結果を図-3 に示す。実験値と予測値はよい一致を示す。

本研究の NNs の学習データ数は 35 個で、水セメント比 35~50%、環境温度 10~60°C の条件下で普通セメント及び高ビーライトセメントを用いたものである^{7),8),9),10)}。

表-1 に入力項目を示す。

入力層の各ユニットへ与えられたデータは、セメントの鉱物組成(C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF)、セメントの平均粒子半径、セメント密度、水セメント比、環境温度である。それらを式(5)~(7)の処理により、順次伝達させた後、誤差逆伝播学習法により、出力値として水和反応式の係数 B, C, D, Kr を求めた。

その後、式(4)による温度の影響を導入し、水和反応係数の $\beta_1, \beta_2, \beta_3, E/R$ を求めた。水和反応モデル係数を表-2 に示す。

表一 入力項目

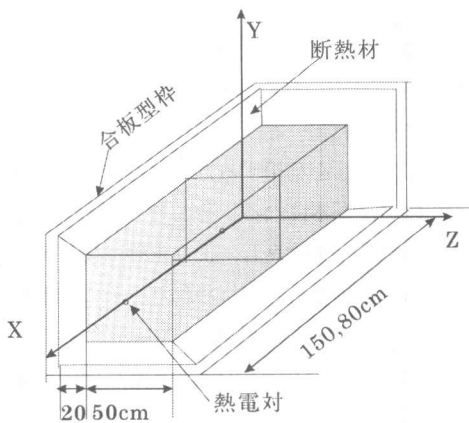
No	入力項目	単位	入力値	
			N	L
1	環境温度	℃	60,40,20,10	
2	水セメント比	%	33	
3	C3S	%	62	35
4	C2S	%	15	47
5	C3A	%	8	3
6	C4AF	%	9	8
7	セメント粒子半径	μ	6.18	7.42
8	セメント密度	g/cm ³	3.16	3.20

表二 水和反応モデル係数

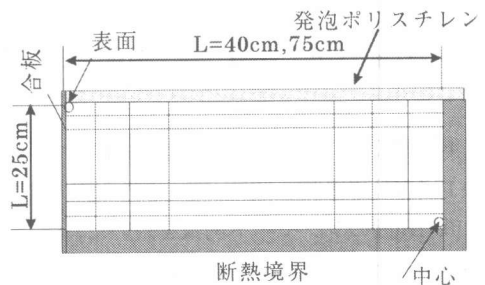
Cem. (W/C)	B	C	D	Kr
N (33%)	2.07E-9	3.60E-2	5.10E-10	4.70E-6
L (33%)	3.02E-9	6.90E-2	5.43E-10	5.01E-6
Cem. (W/C)	β1	β2	β3	E/R
N (33%)	27	474	8458	6086
L (33%)	3945	2195	7316	5483

表三 コンクリート調合

Cem.	w/c (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
			W	C	S	G
N	33	49	170	516	787	870
L	33	53	170	516	854	776



図一四 に模擬部材試験体の形状・寸法



図一五 解析部材の要素分割

4. 実験概要

セメントは普通セメント(N)と低熱セメント(L)を用いた。表一に使用したセメントの物性及び鉱物組成を示す。細骨材は大井川水系陸砂(表乾密度 2.58, FM 2.69, 吸水率 2.07)を粗骨材は青梅産硬質砕岩砕石(表乾密度 2.65, FM 6.0, 吸水率 0.72)を用いた。検討したコンクリートの調合は表三に示す。

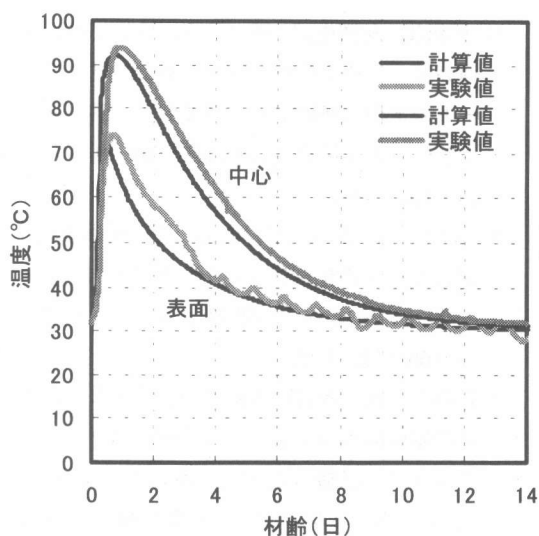
解析対象になる模擬部材は、断面寸法 50×50cm、部材厚さ 150.80cmの無筋コンクリート直方体部材で、長さ無限大の壁部材を想定して壁方向の側面を除き厚さ 20cmの断熱材(発泡ポリ

スチレン)で覆った。実験は、外気温度 31℃の夏期に行われた。

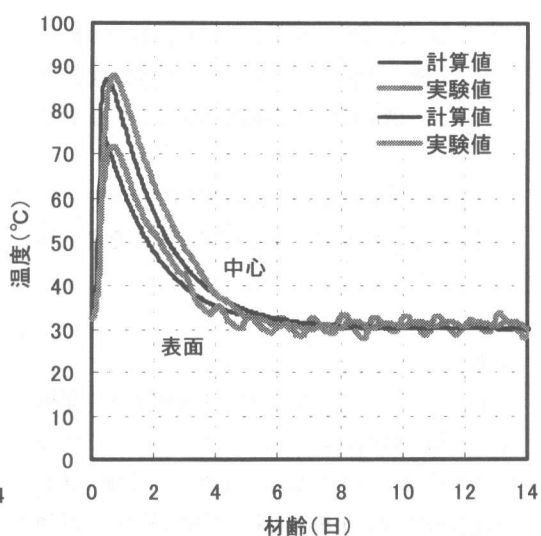
図一四に模擬部材試験体の形状・寸法および熱電対(TYPE T)の設置位置を示す。

5. 有限要素法による温度履歴予測

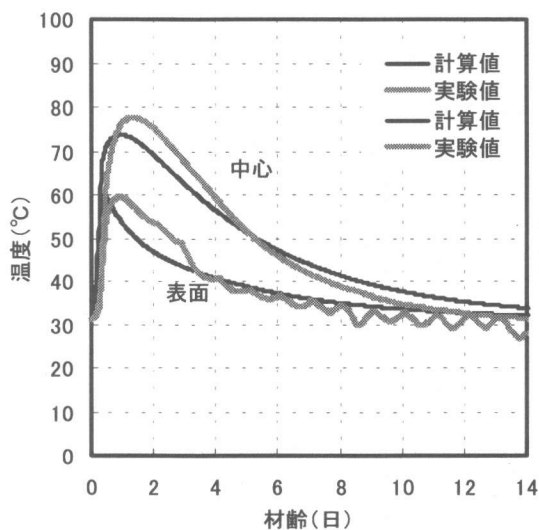
解析対象になるコンクリート部材の要素分割を図一五のように行った。表面の熱伝達率は型枠が合板の場合 4.652W/mK, 断熱材(発泡ポリスチレン)の場合 3.489W/mK, コンクリートの熱伝導率は 1.977W/mK, コンクリートの比熱は 0.325W/mK の一定値で仮定して解析を行った。



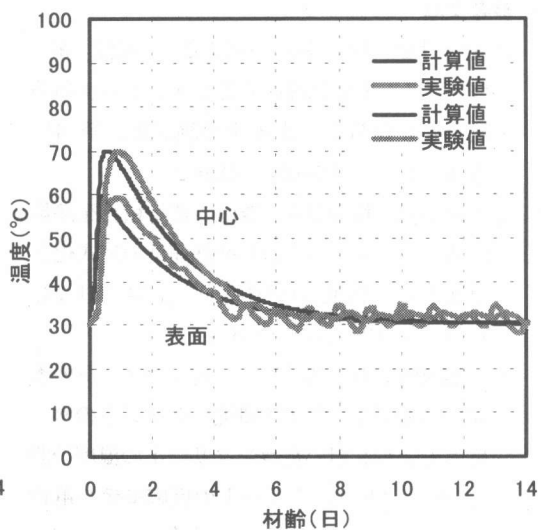
図—6 温度履歴分布予測
(普通セメント, 150cm)



図—7 温度履歴分布予測
(普通セメント, 80cm)



図—8 温度履歴分布予測
(低熱セメント, 150cm)



図—9 温度履歴分布予測
(低熱セメント, 80cm)

各セメントによる高強度マスコンクリートの温度履歴分布の予測結果を図—6～図—9に示す。図から、予測結果は実験結果とよい一致を見せていることがわかる。しかし、低熱セメントの場合には、低水セメント比の水和発熱速度の実験データが不足し、ニューラルネットワークのシステムでの十分な学習ができなかったため、特

に150cm部材の中心部位では予測値が実験値より5℃くらい低い値を示している。今後、データの補完が必要である。

6. 結論

本研究はセメントの水和反応モデルの係数算定にニューラルネットワークを適用した結果、

材料や調合の特性のみによって各係数を求めることができ、実験によらずとも、高強度マスコンクリート構造体内部の温度履歴分布の予測ができた。

今後、データの蓄積によって広範なセメントに対して温度履歴の予測が可能になると考えられる。

謝辞

本研究にあたり、東京大学生産研究所中埜研究室の楊元植氏にニューラルネットワークについてご助言を頂きました。また、太平洋セメント佐倉研究所の小澤尚志氏、清澄研究所の外川祥子さんに御協力頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木康範, 辻 幸和, 前川宏一, 岡村 甫 : コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化, 土木学会論文集, 第 414 号, V-12, pp. 155-164, 1990. 2
- 2) 内田清彦, 榊原弘幸, 斎藤 豊 : 積算発熱量に基づくセメントの水和発熱速度の定式化と温度上昇の予測, コンクリート工学, Vol. 24, No. 4, pp. 105-113, 1986. 4
- 3) 友澤史紀, 野口貴文, 玄 哲 : セメントの水和反応モデルに関する研究—セメントの水和反応モデルを用いたコンクリートの温度予測—, セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集, pp. 13-20, 1996. 5
- 4) 友澤史紀 : セメントの水和反応モデル, セメント技術年報, 28, pp. 53-57, 1974
- 5) 矢川元基 : ニューラルネットワーク, (社) 培風館, 1992. 5
- 6) 中野 馨ら : ニューロコンピュータ, 技術評論社, 1994. 5
- 7) 玄 哲 : 高強度コンクリート及びマスコンクリートの温度応力予測に関する基礎研究, 東京大学博士論文, 1994
- 8) 朴起蓬, 友澤史紀, 野口貴文, 村田芳樹 : 各種高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの水和発熱速度及び温度上昇予測, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, 187-192, 1997
- 9) 小澤尚志, 菅谷秀幸, 廣瀬 哲, 後藤孝治 : 遅延剤と活性化剤によるセメント・コンクリートの凝結時間制御, CSCT, No. 52, pp. 166-173, 1998
- 10) 原田 宏, 岡村隆吉, 外川祥子 : セメントの凝結時間のコントロールがペーストおよびモルタルの流動性と強度発現に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No. 51, pp. 270-275, 1997