

論文

[1082] 構成鉱物の水和に基づく若材令コンクリートの強度発現モデル

加藤佳孝\*1・岸利治\*2

1. はじめに

近年、構造物の大型化に伴い、若材令における温度ひびわれの危険度予測の精度向上が急務となっている。温度ひびわれは一般に局所化が顕著で部材を貫通してしまう場合もあるため、温度ひびわれによるコンクリート構造物の損傷を回避することは極めて重要である。そのために事前の温度ひびわれ発生に対する危険度を解析によってチェックし、それに応じた対応が必須である。解析にあたって強度発現モデルが必要となるが、若材令コンクリートではセメントの水和に伴って強度発現と発熱が同時に進行する。強度発現モデルを水和反応に立脚したものにする事は、一層の精度向上に資するものである。

コンクリート中のセメントの水和は、鈴木ら[1]の巨視的な発熱速度式の形でまず定量化された。次に岸[2]は、セメントの鉱物組成に基づいてセメントの水和発熱の一般化を図った。更に Santhikumar[3]の研究によって、混合セメントに対する適用性の拡大が追求された。

本研究はセメント各鉱物の水和度がおよそ定量評価可能となった現状を鑑み、任意のコンクリート及び粉体配合と、構造物の各部位によって異なる温度履歴に対応可能な、強度発現モデルを、セメント鉱物とポゾランの個々の水和に立脚して提案することを目的とする。水和の進行は積算発熱量を用いて表現した。

2. 強度発現に関する実験

2.1 実験概要

セメントの水和度と強度発現との関係を定式化するために、圧縮強度試験を行なった。ここで、温度履歴の相違による強度発現の水和度依存性を明らかにする目的で、図-1の温度履歴を採用した。

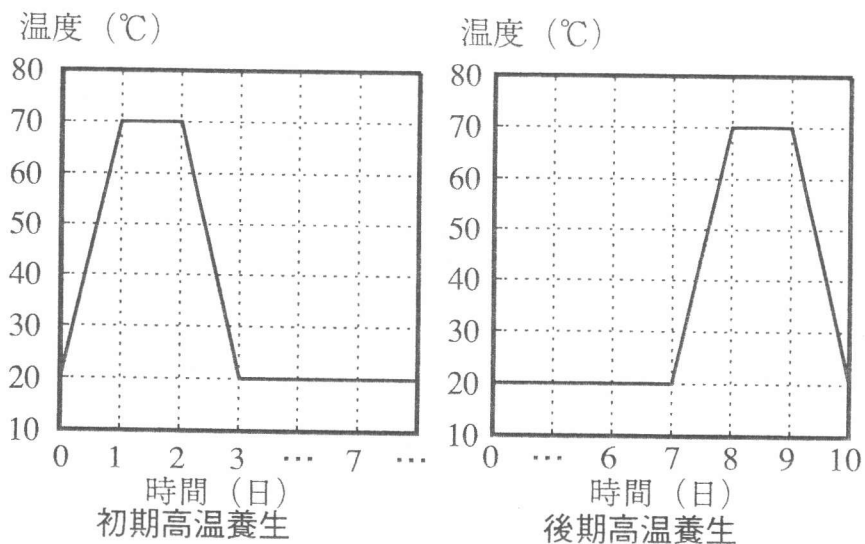


図-1 練り混ぜ以後のコンクリートの温度履歴

2.2 方法

マスコンクリート

内部のセメントが受ける環境を考慮して本研究では、恒温恒室槽内で供試体を封緘養生し（水分の移動を与えない）、初期に高温を経験した後に冷却される温度履歴を再現した。更に同じ配合

\*1 東京大学大学院生 土木工学専攻、 (正会員)

\*2 東京大学助手 工学部総合試験所、 工修 (正会員)

の供試体に異なる温度履歴（図1参照）を与えたものに対しても、強度発現を測定した。セメントを構成する各鉱物の積算発熱量は水和発熱モデル[2,3]を用いて、材令ごとに計算した。水和発熱モデルでは構成鉱物ごとに基準発熱速度曲線と見かけの温度活性値を規定しており、環境温度と配合が決定すれば、積算発熱量は各鉱物ごとに水和の進行を表す状態量として算定される。

表-1 圧縮強度試験配合表

供試体の種類	単位量(Kg/m <sup>3</sup> )					
	W	MC	SG	FL	S	G
M C	181	761	0	0	720	808
SG + MC	181	360	360	0	720	808
FL + MC	181	478	0	192	720	808

供試体は、直径5cm・高さ10cmの円柱である。圧縮強度は各材令ごとに3供試体の試験値を平均して求めた。配合を表-1に示す。表中のMCは中庸熱セメント・SGは高炉スラグ・FLはフライアッシュを示す。本実験における封緘状態とは、供試体表面をラップし、更に空気の出入りを抑えるように全体をビニール袋をで覆った状態を言う。図-1の後期高温養生で温度を上げ始めた材令はそれぞれ、MC：7.4日、SG+MC：6.8日 FL+MC：9.1日である。

### 2. 3 実験結果及び考察

実験結果を表-2～表-4に示す。表中のQは積算発熱量、C<sub>3</sub>S・C<sub>2</sub>S・SG・FLはそれぞれの水和発熱量の解析値・f<sub>c</sub>'はシリンダー圧縮強度を示している。高炉スラグ・フライアッシュの置換率は中庸熱セメント100%の重量に対するものである。

表-2 圧縮強度試験結果（中庸熱セメント100%）

初期高温養生					後期高温養生				
材令	Q	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	f <sub>c</sub> '	材令	Q	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	f <sub>c</sub> '
0.5	22.1	29.4	0.74	11.2	0.67	18.9	22.2	0.94	7.8
0.58	28.4	42.3	1.17	22.8	1.0	26.4	35.8	2.97	20.2
0.75	36.7	56.9	3.42	28.1	3.0	45.4	55.7	21.6	34.1
1.0	46.4	67.5	11.7	35.0	7.38	50.1	61.1	25.6	43.5
1.33	52.7	71.9	20.0	41.8	8.29	51.4	63.4	26.1	49.3
2.25	53.1	74.5	22.4	46.7	10.3	54.9	69.7	26.9	50.0
7.38	56.6	75.6	24.1	45.8					

注) 表中のそれぞれの単位は材令(日)・熱量(Kcal/Kg)・シリンダー圧縮強度(MPa)。  
以下全てにおいて同様とする。

表-3 圧縮強度試験結果（高炉スラグ50%置換：重量）

初期高温養生						後期高温養生					
材令	Q	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	SG	f <sub>c</sub> '	材令	Q	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	SG	f <sub>c</sub> '
0.42	10.1	13.1	0.47	2.24	3.7	0.63	11.9	18.9	0.83	3.1	4.0
0.5	14.0	27.3	0.72	3.52	12.7	0.86	16.3	30.9	1.81	5.71	11.6
0.67	23.5	49.6	1.97	11.5	23.1	1.88	39.0	51.5	14.2	35.8	26.3
0.85	42.0	64.9	6.35	39.4	33.4	5.56	54.2	57.8	22.8	59.2	47.9
1.88	63.4	70.0	17.9	74.8	54.0	7.82	56.1	60.0	23.7	61.5	53.7
9.77	63.4	70.0	18.0	74.8	54.0	9.78	59.3	63.5	24.3	66.0	53.9

表-4 圧縮強度試験結果（フライアッシュ30%置換：重量）

初期高温養生						後期高温養生					
材令	Q	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	FL	f <sub>c</sub> '	材令	Q	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	FL	f <sub>c</sub> '
0.52	11.5	16.3	0.52	2.25	4.8	0.9	13.7	20.6	1.15	4.0	3.3
0.69	21.3	42.5	1.19	5.81	16.1	1.1	16.9	28.0	2.04	5.71	8.2
0.88	29.8	60.6	3.58	11.1	25.9	2.0	26.7	45.3	10.5	9.68	25.2
1.08	37.2	74.5	9.78	12.9	32.8	3.0	33.8	55.5	19.4	11.0	33.0
2.0	47.3	83.7	25.2	17.2	52.6	10.0	46.4	74.0	30.3	18.1	51.3
13.0	51.2	86.2	29.5	21.9	53.5	13.0	50.1	81.6	31.6	20.6	53.8

若材令においてコンクリート供試体に与える温度履歴が異なる場合、各材令に対する強度発現及び、積算発熱量に対する各鉱物の発熱の内訳は、相互に大きく異なっている。しかし積算発熱量に対する強度発現は、さほど温度履歴に影響されていない（図-2参照）。

初期において高温養生したものの長期強度（91日強度）は、標準養生したものの長期強度よりも低い値を示すという現象についての研究報告[4]があるが、本研究の範囲内（高粉体量及び低水セメント比）では異なる温度履歴を与えても、最終強度について特段の差は見られなかった。これは、温度ひびわれの検討を要する若材令においては水和履歴を代表するものとして各材令の水和度をパラメータに用いることで、強度発現を一意的に表せる可能性を示唆している。

### 3. 構成鉱物の水和に基づく若材令コンクリートの強度発現モデル

前章で行った実験によって、強度発現は積算発熱量と密接な関係があることが求められた。積算発熱量に対する圧縮強度をプロットしてみると（図-2～図-4中の実験値プロット）、高い相関性を有する2直線関係が存在することが分かる。そこで水和発熱モデルにより各鉱物の水和度を追跡し、それを強度発現モデルに組み込むことにする。ここで、粉体の混入率を変化させた

場合、算定される発熱量すなわち水和度と圧縮強度の直線関係も変化することが分かる。従って任意の配合に対しても水和度から強度発現を予測するには、ボゾランを含む各種粉体の特性も組み込んだものにならなければならない。そこでセメント水比則を各鉱物ごとに拡張することを念頭におき、(鉱物の重量) / (水の重量) 比をパラメータとして採用した。更に強度に貢献する鉱物としては、 $C_3S \cdot C_2S$ ・スラグ・フライアッシュの4つを考えた。 $C_3A \cdot C_4AF$ については、他の4つに比べると強度への貢献度は低いため、本研究では無視した。具体的な強度発現モデルは、強度の増分を表現するものとして、以下の式を提案した。

$$df_c' = 250dQ_{3S} + 400dQ_{2S} + 270dQ_{SG} + 400dQ_{FL} \quad (1)$$

ここに、 $f_c'$  : 圧縮強度(Kgf/cm<sup>2</sup>)

$Q_i$  :  $R_i \cdot *$  (セメント中の鉱物の重量) / (水の重量)

$R_i$  : 鉱物  $i$  の積算発熱量を鉱物  $i$  の理論反応熱で除したもの

$i$  : 各鉱物における値を示している

(1) 式は、全ての鉱物は強度への貢献度に関して加算則が成り立つとしたものである。これは、水和発熱モデルにおいて、各鉱物の相互作用が既に表現されているため[2]、このモデルのアウトプットとして得られた各鉱物の水和の進行は独立として扱えると考えたためである。

検証実験として前章で行った実験を用いる。積算発熱量に対する圧縮強度のグラフに実験結果と解析結果をそれぞれプロットしたものを、図-2~図-4に示す。中庸熱セメントについては、かなり精度良く予測がなされている。高炉スラグについては初期において、初期高温養生・後期高温養生のどちらも若干の違いがあるが、これは水和発熱モデルの精度においてさらに改良の余地が残されているものと思われる。本研究の範囲ではフライアッシュについての精度は良好である。フライアッシュについてもスラグと同様に精度の向上が期待される。

積算温度法(マチュリティー法)が強度発現の予測法として広く用いられてきた。ただし積算温度と強度の関係は非線形であり、しかも鉱物組成やコンクリート配合に対する一般化は図られていない。本解析モデルの適用性はまだ十分に検証されたとは言いが、水和発熱モデルによって構成鉱物の水和の進行を追跡し、これに基づいて強度を予測しており、積算温度法に比べ一般性とモデルとして簡易性を有している。これは、強度発現の根源であるセメントの水和を、陽な形でとり入れることで達成されたものである。

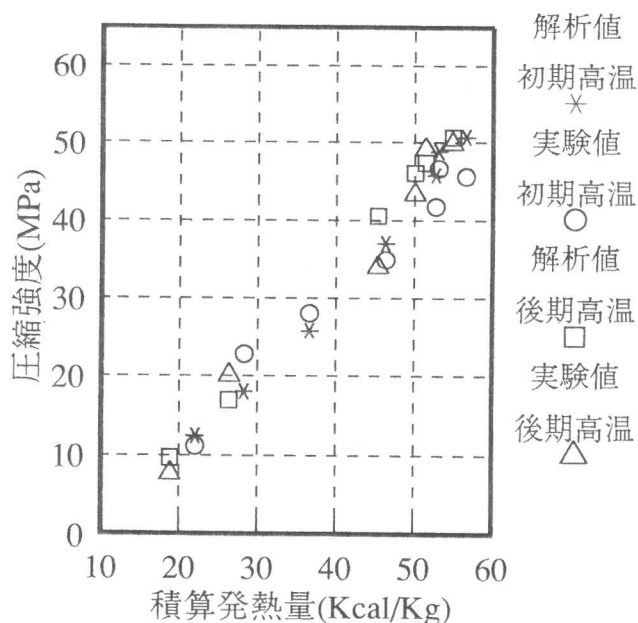


図-2 水和度と圧縮強度の関係  
(中庸熱セメント)

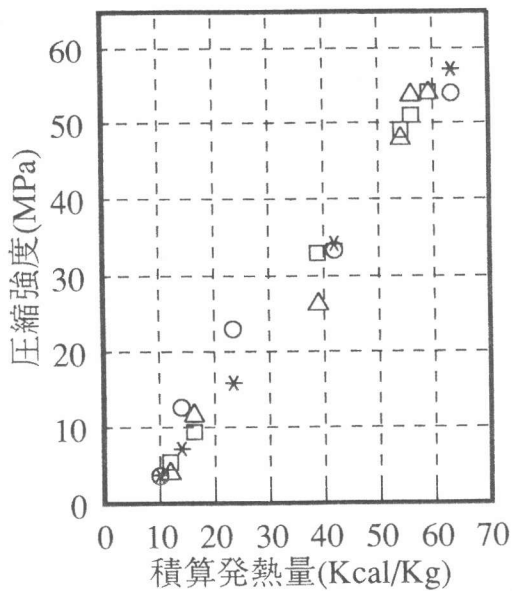


図-3 水和度と圧縮強度の関係  
(高炉スラグ50%置換：重量)

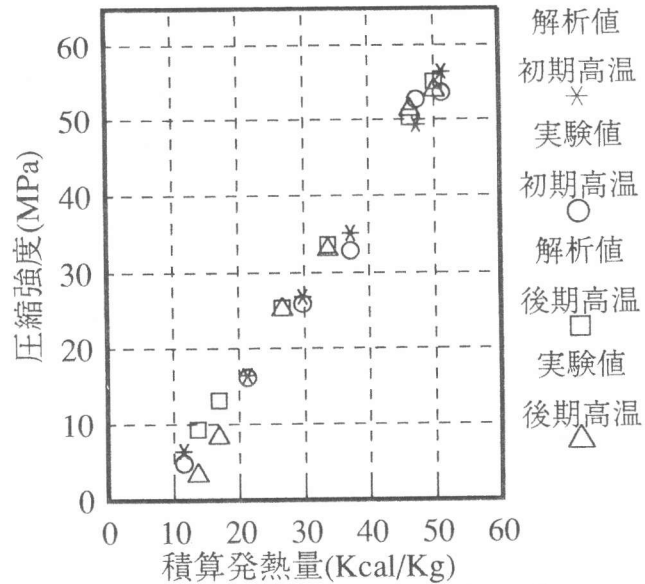


図-4 水和度と圧縮強度の関係  
(フライアッシュ30%置換：重量)

初期高温並びに後期高温養生履歴に対して、強度と積算発熱量との相関関係は高く、しかもほぼ等しいことが図-2～図-4から分かる。ただし、両者が一致する物理的、数学的必然性はない。つまり、同一の積算発熱量（各鉱物の発熱量の総和）においても、過去の温度履歴が異なれば、表-2～表-4のように、各鉱物の水和度は互いに異なり、対応する強度も厳密には異なるからである。

時間に対する圧縮強度の発現と解析結果をプロットしたものを図-5～図-7に示す。積算発熱量に対してプロットしたものと同様に、中庸熱セメントとフライアッシュについて精度は満足のいくものである。しかし、スラグについては材令初期において実験と解析値とは若干の違いがみられる。これも、水和発熱モデルの精度向上が図られることにより、一層の強度予測精度がもたらされられると思われる。供試体に異なる温度履歴を与えた場合の強度発現が、材令によって異なるという結果をこのモデルは正確に、かつ微視的現象にも忠実な形で合理的にとらえることができてきている。

以上より温度履歴が異なる場合でも、強度発現モデルを各鉱物の水和度及び粉体中に占める割合（量）の関数として表現する事ができた。本研究の範囲内では、各鉱物の水和度は強度予測の観点からは相互に独立し、かつ加算ができるものとして扱えることが明らかになった。

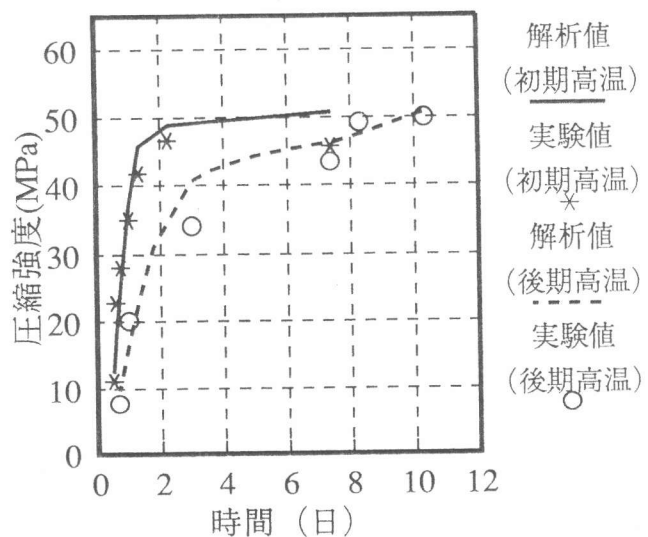


図-5 時間と圧縮強度の関係  
(中庸熱セメント)

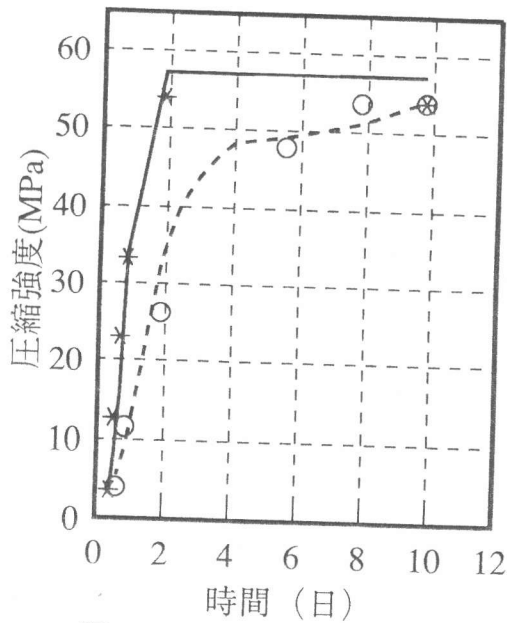


図-6 時間と圧縮強度の関係  
(高炉スラグ50%置換：重量)

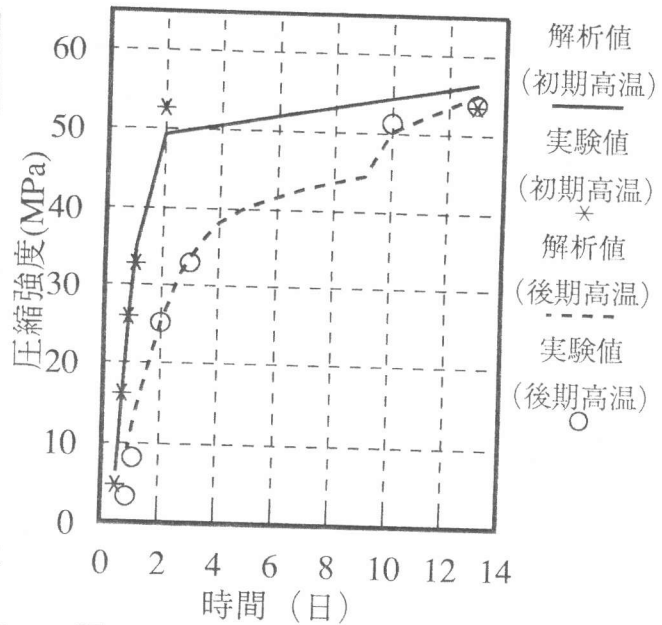


図-7 時間と圧縮強度の関係  
(フライアッシュ30%置換：重量)

#### 4. まとめ

従来の積算温度で表現した強度発現モデル（マチュリティー法）に代わり、各構成鉱物の積算発熱量に基づいた強度発現モデルを提案した。これは、従来のものと比較して一般性とモデルとしての簡易性を併せて有している。これによりコンクリートの配合をインプットすれば強度予測が行える一連のモデルのガイドラインを提案することができた。本研究では限られた配合について検証したものであるため、強度発現モデルの精度を向上させるために、今後、様々な配合と粉体割合に対する検証実験を行う予定である。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、東京大学・前川宏一助教授より研究の方向づけと有用なる御助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 鈴木康範：コンクリート中のセメントの水和発熱過程と定量化に関する研究、学位論文（東京大学）、1990
- 2) Kishi, T., Simomura, T. and Maekawa, K.: Termal crack control design of high performance concrete, concrete 2000, pp.447-457, sep.1993
- 3) Santhikumar, S., Kisi, T., Maekawa, K., : Heat generation model for arbitrary mixed Portoland cement, blast furnace slag and fly ash concrete, EASEC-4 International conference, 1993
- 4) 守分敦郎、福手勤、堀口浩司：マスコンクリートの耐久性に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.1, pp.859-864, 1993