

論文 低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートにおける 複合水和発熱モデルの適用

小田部裕一*1・鈴木康範*2・岸利治*3

要旨: 高強度コンクリートの実用例が増し、硬化時の温度もしくは自己収縮の低減ばかりでなく施工性を確保する目的で低熱ポルトランドセメントが使用される。コンクリート構造物の施工に際して、温度解析による発熱に関する事前検討が加えられる中で、温度解析技術の向上は必須となり、様々な事例に応じた適用性の検討も必要となる。本研究では低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの発熱特性を推定する上で、複合水和発熱モデルを適用させる場合の簡易手法を検討した。その手法によって解析結果の適合性向上が確認された。

キーワード: 複合水和発熱モデル, 低熱ポルトランドセメント, 高強度コンクリート

1. はじめに

高強度コンクリートは水結合材比が小さく結合材量が多くなるため、水和反応による発熱が大きくなる。したがって、高強度コンクリートを比較的部材寸法が大きな構造物に適用した場合、高温履歴を受けることによって、長期に亘る強度発現が標準養生の供試体に比べて劣るとの指摘がある¹⁾。高強度生コンクリートの実用化を向かえて、上記のような標準養生における強度と構造体強度の差を的確に把握することは重要であり、そのためには高強度コンクリートの温度履歴を実規模レベルの実験、より好ましくは温度解析などで把握することが重要となる。ただし、高強度コンクリートとして総称される種別のコンクリートは無数に存在し、実用化に合わせて実規模レベルの実験を随時実施することは得策と言ひ難い。一方、温度解析技術が発達する中で高い解析精度が得られる水和発熱モデルを用いた温度解析を実施し、高強度コンクリート構造物の温度履歴を捉えることが得策であると思われる。中でも複合水和発熱モデル²⁾

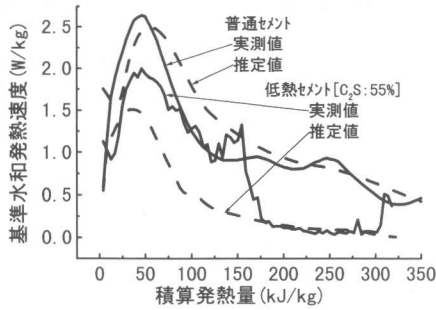
は、セメントの相組成や配合に基づく諸条件を入力値とすることで解析が可能となり、解析条件を変えた数多くの数値解析を行う上で好都合であると言える。しかしながら、複合水和発熱モデルを上記のような目的に使用するにあたっては、低水セメント比となる域での硬化体組織内部での水の消費や移動といった水分形態を捉え、モデルに反映させる必要がある³⁾、反応生成物の析出空間として考えられる空隙の形態とサイズについても十分把握すべきである。更に、低熱ポルトランドセメント（以下、低熱セメントと称す）のように他のセメントと鉱物組成が大きく異なる場合には鉱物間相互作用についても考えるべきである。

本研究では、低熱セメントを用いた高強度コンクリートといった上記課題の枠の中で、複合水和発熱モデルの適用について検討した。ここでは、段階的検討の一部として、上記コンクリートを用いた模擬部材の温度履歴を推定する上で、解析精度を向上させるための簡易手法について報告する。

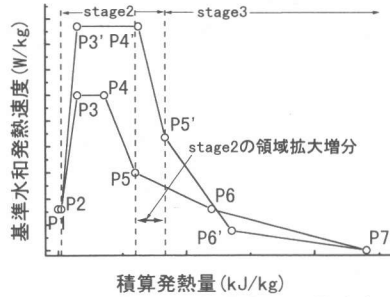
*1 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 研究員 (正会員)

*2 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 関東技術センター所長 工博 (正会員)

*3 東京大学助教授 生産技術研究所 物質・生命大部門 工博 (正会員)



図一 標準水和発熱速度の比較



図二 モデル中の標準水和発熱速度の変化

2. 低熱セメントに対する複合水和発熱モデルの適用

複合水和発熱モデルは、各クリンカー鉱物の水和反応を個々にモデル化し、その上で各要素間の反応相互依存性を考慮したものである。同モデルを、低熱セメントを用いた普通コンクリートに適用させた場合、解析結果は、低熱セメントの特徴的な温度上昇曲線に対して十分な適合性が得られなかった。その原因として、普通セメントや早強セメントなどに比べて相組成が大きく異なる低熱セメントでは、水和発熱速度の実測値とモデルによる解析結果から得られたそれとが大きく異なっていることが判明した(図一参照)。よって、低熱セメントに対するモデルの適合性を高めるため、モデル中のエラーライトおよびピーライトの発熱速度を式(1)や図二に従って変化させ、複合水和発熱モデルの低熱セメントへの適用を図った⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned}
 & \text{P2, P3 について} \\
 & Q'_{ij} = Q_{ij}, \quad HS'_{ij} = HS_{ij} \cdot (1 + \kappa_{H1} r_s) \\
 & \text{P4, P5 について} \\
 & Q'_{ij} = Q_{i\max} - ((Q_{i\max} - Q_{ij}) / (1 + \kappa_Q r_s)) \\
 & HS'_{ij} = HS_{ij} \cdot (1 + \kappa_{H2} r_s) \\
 & \text{P6 について} \\
 & Q'_{ij} = Q_{i\max} - ((Q_{i\max} - Q_{ij}) / (1 + \kappa_Q r_s)) \\
 & HS'_{ij} = HS_{ij} \cdot (1 + \kappa_{H3} r_s)
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 j は発熱速度関数におけるポイント、 Q_{ij} および HS_{ij} は i 鉱物の j における積算発熱量および発熱速度、 r_s は鉱物間相互依存性による発熱速度促進を表す指標、 $\kappa_{H1}, \kappa_{H2}, \kappa_{H3}, \kappa_Q$

は発熱速度促進効果の貢献度を表す係数である。

3. 実験概要

本実験は、低熱セメントを用いた高強度コンクリートに対する複合水和発熱モデルの適用性を検討するものである。モデルの適用性を検討するにあたっては、低熱セメントを用いた高強度コンクリートブロックを作製し、ブロック内の温度計測結果を基にした。

3.1 実験項目

(1) ブロック実験

高強度コンクリートブロックは、1m 角の柱状構造物を模擬したものであり、高さ 1m 部分を抽出し(寸法: 1m×1m×1m)、高さ方向の温度勾配が発生しないように上下面に断熱材(厚さ 20cm)を設けた。また、温度計測点は、各中央断面の中心線に沿って、幅、奥行き方向に等間隔 7 点、高さ方向に 3 点とした。ブロックの作製に関しては、生コンクリート工場においてコンクリートを製造し、アジテータ車からブロックの型枠内に直接投入した。温度計測はブロック内に所定量のコンクリートが投入された後、上面の断熱材と上蓋を被せた直後から行った。このブロック試験体の作製と温度計測については、打込み温度の相違による温度依存性を評価するために、春(20℃前後)、夏(30℃前後)の 2 シーズンにおいて実施した。

(2) 硬化体中の細孔量の測定

試験の対象とした試料は、水セメント比が 25, 35, 45, 55% のセメントペーストである。こ

れら試料を所定の材齢において 3~5mm 程度の大きさに砕き、アセトン浸漬後 D-乾燥によって水和を停止し、水銀圧入ポロシメーターによって細孔量 (40 μ m~2nm) を測定した。なお、試験材齢は 1, 3, 7, 28 日である。

(3) 硬化体中の自由水残存率の測定

試料および試験材齢は細孔量測定と同様である。自由水残存率は、アセトン浸漬後真空乾燥で水和を停止し、更に 35 $^{\circ}$ C の乾燥炉で試料を乾燥させ、水和停止前の試料と乾燥後の試料の差によって求めた。上記の温度設定は、自由水のみを蒸発させ、結晶水を蒸発させないためである。

3.2 使用材料およびコンクリート配合

使用材料の一覧は表-1 に示す通りである。コンクリートの配合は、設計基準強度 60N/mm² を満足するような 3 水準の配合を定め (表-2 参照)、何れもスランプフローが 65 \pm 5cm、空気量 2.0 \pm 0.5% となるように混和剤量を調整した。

表-1 使用材料

材料	銘柄および産地
セメント	低熱ポルトランドセメント (密度 3.24g/cm ³ , C ₂ S=56%, C ₃ A=2%)
細骨材	君津産山砂 鳥形山産石灰砕砂
粗骨材	鳥形山産石灰砕石
混和剤	ポリカルボン酸塩系

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	W	C	S	G	SP
26	160	615	830	842	10.76
30		533	896		8.79
34		471	948		7.54

※SP: 高性能 AE 減水剤

4. 実験結果

4.1 低熱セメント対応モデルの解析結果

各水セメント比および打込み温度における温度計測結果と普通コンクリート用に修正されたモデルによる解析結果を比較した一例を図-3, 4 に示す。なお、解析結果における

熱伝達境界の条件は、高さ方向に温度勾配が発生していないことを考慮し上下面は断熱境界とし、側面方向は温度低下率の適合性を観察しながら行った感度解析結果より 3.5W/m²C の熱伝達率を設定した。その他の熱特性値は一般的な数値を用いた。図-3, 4 より、何れのケースにおいても温度計測結果と解析結果の乖離が大きく、特に、水セメント比が小さくなるにしたがって大きくなっているのが分かる。よって、普通コンクリート用に修正されたモデルでは十分な適合性が得られないことが判明した。乖離状況からこの原因を判断すると、普通コンクリート用に变化させた発熱速度はピーク値およびそれに対応する領域とも過大に設定しているものと考えられる。

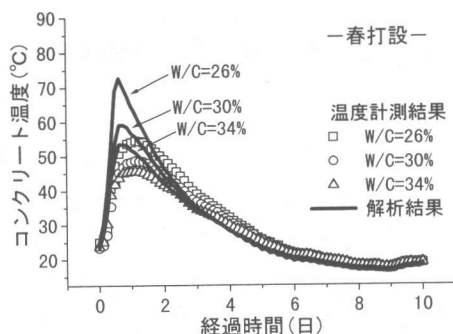


図-3 低熱セメント用モデルの解析結果

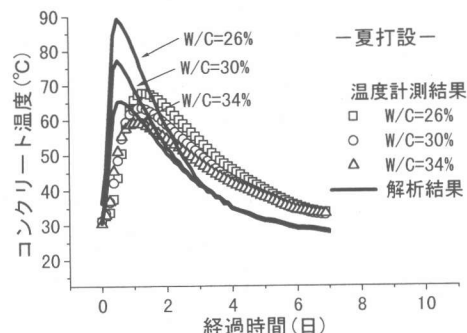


図-4 低熱セメント用モデルの解析結果

4.2 高強度コンクリートの発熱速度

図-5 は、低熱セメントを用いた高強度コ

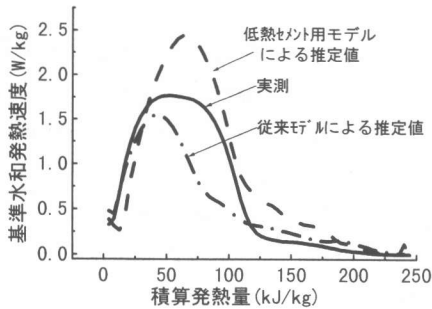


図-5 標準水和発熱速度の比較

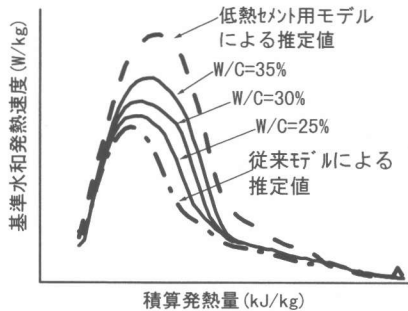


図-6 標準水和発熱速度の推移概念図

ンクリート（水セメント比：30%，単位セメント量：550kg/m³）の標準水和発熱速度（20℃）の実測値と従来モデルの解析値および普通コンクリート用に修正されたモデルの解析値とを比較したものである。実測値は従来モデルの解析値と修正モデルの解析値の中間にあり、従来モデルでは、発熱速度を過小評価するが、修正モデルでは過大評価していることが分かる。水セメント比を変化させた場合の積算発熱量と標準水和発熱速度との関係の推移を示した例が図-6である。普通コンクリート用に修正したモデル発熱速度の変化（発熱速度の促進）は、セメント粒子から析出する反応生成物の析出空間の増加によるものと思われる。しかし、高強度コンクリートの領域になると内部組織が比較的初期の段階から緻密になるため、普通コンクリートに比べて反応生成物の析出空間が減少するものと思われる。したがって、普通コンクリートほどの発熱速度の促進効果は得られないものと思われる。

図-6からも上記のような傾向は認められ、普通コンクリートの域から低水セメントの域になるにしたがい、発熱速度の促進効果が小さくなっている。

4.3 硬化体内部組織の液相空間

前項において、反応生成物の析出空間の量がセメントの水和反応、つまり発熱速度に影響を及ぼすものと考えた。そこで、普通コンクリートと高強度コンクリートの反応生成物の析出空間（キャピラリー空隙）を把握するため、それを形成する因子となり得る細孔量（図-7参照）と自由水残存率（図-8参照）を測定した。ここでの自由水とは毛細管水、付着水から成る蒸発性水分を表している。

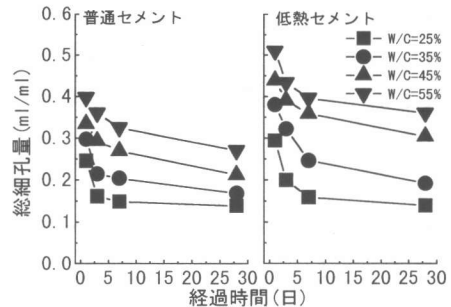


図-7 細孔量の測定結果

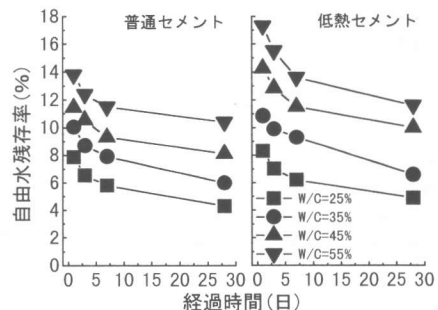


図-8 自由水残存率の測定結果

図-7, 8より、普通コンクリートの領域では材齢初期の細孔量および自由水量とも普通セメントに比べて低熱セメントの方が大幅に多くなっている。つまり、材齢初期の液相

空間は低熱セメントの方が多く存在するものと考えられる。一方、高強度コンクリートの領域では、材齢初期の細孔量および自由水量は普通セメントと低熱セメントとも普通コンクリートほどの大差は認められない。したがって、低熱セメントを用いた高強度コンクリートでは材齢初期の段階から内部組織が緻密化し、液相空間が減少するため、普通コンクリートで認められたような発熱速度の促進効果が小さくなるものと考えられる。

4.4 発熱速度の促進効果を表す指標

これまでの実験結果より、高強度コンクリートの領域では、セメント粒子から析出される反応生成物の析出空間が減少し、普通コンクリートに見られたような発熱速度の促進効果が小さくなるものと考えられる。そこで、高強度コンクリートの領域での上記促進効果を表す指標 r_s をパラメトリックに変えた感度解析を実施したところ、各水セメント比において表-3に示す値が得られた。

表-3 促進効果を表す指標 r_s

水セメント比 (%)	促進効果を表す指標 r_s
26.0	0.7
30.0	1.0
34.0	1.2

この数値による解析結果と実測値を比較した一例を図-9, 10に示す。ただし、式(1)における他の係数は全ケースにおいて暫定的に一定の値を用いた ($\kappa_{H1}, \kappa_{H2}, \kappa_{H3}, \kappa_Q=0.05, 0.05, 0.35, 0.00$)。図-9, 10より、当初の普通コンクリート用に修正したモデルの解析結果に比べると r_s を変化させた解析結果は適合性が大幅に改善された。つまり、反応生成物が析出される液相空間を評価し、その変化を発熱速度の促進効果として扱うことによって、低熱セメントを用いた高強度コンクリートの領域においても複合水和発熱モデルの適用が一応のところ可能と思われる。

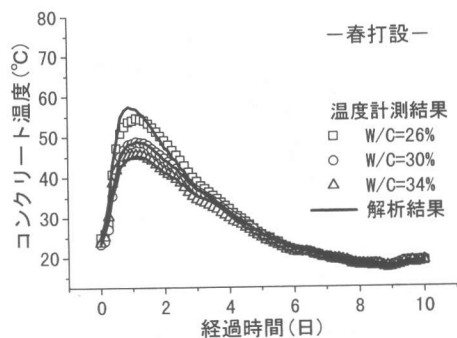


図-9 低熱セメント高強度用モデルの解析結果

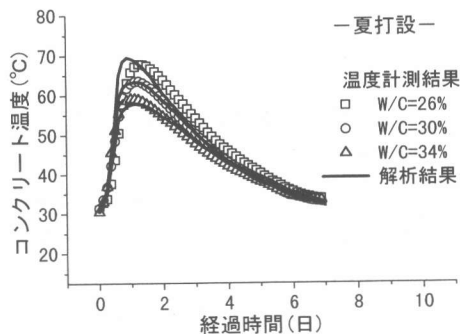


図-10 低熱セメント高強度用モデルの解析結果

4.5 水セメント比と促進効果を表す指標の関係

高強度コンクリートブロックの温度計測結果と解析結果の適合性を得るための促進効果を表す指標は表-3の通りとなった。また、低熱セメントを用いた普通コンクリートの解析結果も合わせて水セメント比と r_s の関係を求めたところ、図-11に示す結果が得られた。

図-11より、今回対象とした水セメント比 26~55.8%の範囲では、 r_s は最大 1.5、最小 0.7 の範囲で変化した。ここで、水セメント比が更に小さくなるに従い促進効果はなくなると仮定した場合、 r_s は 1.5 と 0.0 の二つの値を漸近線とするような Boltzman の式 (式(2)参照) による近似が可能であると思われる。

$$r_s = \frac{A1 - A2}{1 + \exp\left\{\frac{(W/C) - x_u}{dx}\right\}} \quad (2)$$

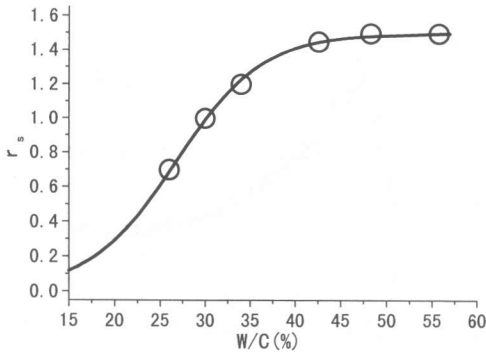


図-11 水セメント比と r_s の関係

ここに、 $A1$ は上限値、 $A2$ は下限値、 x_0 、 dx は実験定数である。

今回の場合、 $A1$ は1.5、 $A2$ は0.0となり、 x_0 および dx は最小二乗法による計算の結果、 x_0 は26.8、 dx は4.8となった。つまり、今回対象とした水セメント比の域では促進効果を表す指標 r_s は最大でも1.5となり、水セメント比が極端に小さくなる域では促進効果がなくなり、従来モデルの適用が妥当と思われる。このように、複合水和発熱モデルを低熱セメントコンクリートに適用する場合には、発熱速度の促進効果を水セメント比の変化に応じて捉えることによって、普通コンクリートおよび高強度コンクリートの何れにおいても解析精度を高めることが可能になった。今回の検討は、低熱セメントを用いた高強度コンクリートの温度履歴を推定する上で、便宜的にクリンカー鉱物の発熱速度を促進させるといった手法を用いた。しかし、冒頭で述べた水分、反応生成物の析出空間の形態および鉱物間相互依存性といったものを解明し、それらをモデルに反映させることが今後の検討課題である。

5. まとめ

- (1) 低熱ポルトランドセメントを普通コンクリートに用いた場合、材齢初期では細孔量および自由水量が多く、反応生成物の

析出空間が多く存在するが、高強度コンクリートになると材齢初期から硬化体組織が緻密化するため、析出空間が減少する。

- (2) 低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートに複合水和発熱モデルを適用させる場合、普通コンクリートと比較した内部組織の変化を捉え、モデルに反映させることによって解析結果の適合性を高めることが可能となる。
- (3) 低熱ポルトランドセメント用の複合水和発熱モデルにおけるクリンカー鉱物発熱速度の促進効果を表す指標は、水セメント比と相関関係が得られた。

謝辞

本研究を実施するに当り、東京エスオーシー(株) 金塚常務、同社芝浦工場 伊藤工場長、佐倉エスオーシー(株) 香取次長、日本シーカ(株) 斎藤要氏をはじめとする多くの方々にご協力頂いたことを感謝致します。

参考文献

- 1) 福手勤, 守分敦郎, 鈴木康範, 秋葉泰男, 堀口浩司: 水和熱による温度履歴がマスコンクリートの力学特性および耐久性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.641, Vol.46, pp.117~132, 2000
- 2) 岸利治, 前川宏一: ポルトランドセメントの複合水和発熱モデル, 土木学会論文集, No.526, Vol.29, pp.97-109, 1995
- 3) 谷口健司, 岸利治, 石田哲也: セメントの水和発熱過程における水分の形態変化に関する一考察, 土木学会第55回年次学術講演会概要集, V-255, 2000
- 4) 小田部裕一, 岸利治: 複合水和発熱モデルの低熱ポルトランドセメントへの適用, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.237~242, 1999