

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

東京大学 学生会員 谷口健司
東京大学 正会員 岸 利治
東京大学 正会員 石田哲也

1. はじめに

コンクリート構造物の設計において、温度ひび割れを防止することは性能照査型の設計が要求されるようになり、一層重要視されている。任意の材料特性・配合・環境条件からコンクリートの温度上昇履歴の評価を可能とする複合水和発熱モデル (COMH3) が提案されたが¹⁾、水セメント比が 25% から 35% 程度の配合での評価精度は不十分であることが高精度の断熱温度上昇試験により明らかとなった²⁾。本研究は、低水セメント比配合における複合水和発熱モデルの改善を通して得られた、水分の形態変化に関する知見をもとに考察を行ったものである。

2. 実験概要

低水セメント比配合のコンクリートに関する断熱温度上昇試験を行った。実験におけるコンクリートの配合を表 1 に示す。

表 1 実験に用いたコンクリートの配合

水セメント比	水(kg)	セメント(kg)	細骨材(kg)	粗骨材(kg)	高性能AE減水剤(対セメント重量比)
30%	171	569	893	714	1.3%
25%	150	600	876	730	1.5%

3. 実験結果および考察

図 1 および図 2 は、実験結果と従来の複合水和発熱モデルによる解析結果、および改善を加えた提案モデルによる解析結果である。実験結果と従来のモデルによる解析結果を比較すると、いずれも実験より解析の方が低い温度で温度の上昇が停止しており、その傾向は水セメント比が低いものほど顕著になっている。複合水和発熱モデルでは、自由水の減少による水和反応の低減を、残存している自由水量と内部生成層厚さの比を変数とする関数で表現している¹⁾。

当初、このモデル化が不適切であるために、従来のモデルは実験結果を良好に追跡できなかったものと考え、材料定数の変更を主とする様々な感度解析を行った。しかし低水セメント比の配合においては、反応の低減を与えない場合でも温度上昇量が再現できないことが判明し、反応に必要な自由水の絶対量が不足していると考えに至った。

複合水和発熱モデルでは、単位水量から、水和反応に伴い消費・固定された水量を差し引いたものを自由水量として与えている。そして、水和反応により化学的に結合した水に加えて、水和生成物表面に物理的に吸着された水も以後の水和進行には関与しないものとして取り扱っている。従来のモデルでは、このような物理的拘束水量を常に水和したセメント量の 15% と仮定してきた。しかしこのような拘

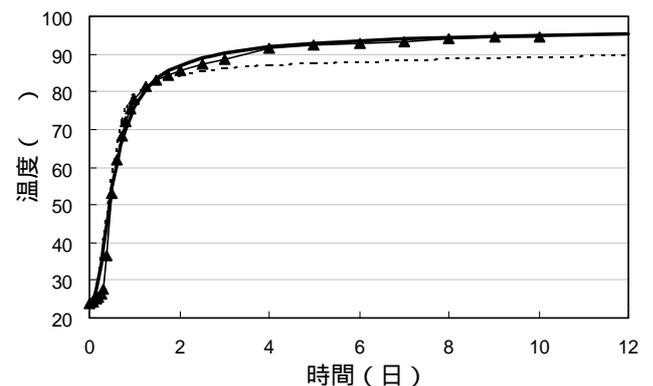


図 1 断熱温度上昇試験 (W/C=30%)

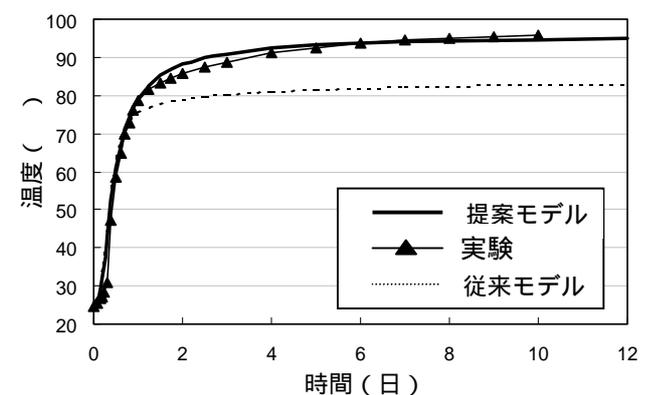


図 2 断熱温度上昇試験 (W/C=25%)

キーワード 断熱温度上昇、低水セメント比、水和、拘束水、BET 理論

連絡先 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1 電話 03-5841-6146 FAX 03-5841-6010)

束水の割合は、自己乾燥状態の程度に応じて異なりえるものと考え、拘束水率を変化させた感度解析を実施した。その結果、図3および図4に示すように、最大でも、水セメント比(W/C)が30%では12%程度、W/Cが25%では9%程度の拘束水率と考えることが妥当であることが判明した。低水セメント比配合のコンクリート中において、水和反応が進行すると内部の湿度が低下し拘束水率が小さくなると考えることは、水分の吸着機構を記述したBET理論³⁾によれば当然な現象と考えられる。

そこで、修正BET理論を採用し、かつ熱力学平衡を考慮して空隙組織中の含水状態を厳密に取り扱う熱力学連成解析システム DuCOM³⁾を用いて、解析から拘束水率を便宜的に同定した結果、その値は本研究で行った感度解析で用いたものと一致する結果となった。(図5)

図5に示す結果から注目すべきは、水セメント比50%では、時間とともに拘束水率は単調増加を示すのに対して、水セメント比30%および25%の解析結果では、ピークを示した約3日後から減少し始める点である。これは、一度粒子表面に吸着した水が、セメントの水和反応によって自由水が不足した際に再び離脱して水和反応に寄与するためと考えられる。拘束水の離脱は空隙中の湿度に依存するので、水和に伴う自己乾燥の程度に応じて非常に緩やかな速度で進行すると考えられる。したがって、離脱した水分が凝縮水となってセメントの水和反応に寄与すると考えた場合、水和反応も緩やかな速度で進行すると考えられる。図1および図2における実験結果をみると、急激な温度上昇の後に緩やかな温度上昇が続き、実験期間を過ぎた後も温度上昇が続くものと考えられる。実験結果におけるこのような挙動は、低水セメント比コンクリートにおいて、拘束水から自由水への転移が非常に緩やかな速度で進行するという考察を裏付けるものといえる。

4. まとめ

低水セメント比のコンクリートにおいては、水和反応の進行に伴い自由水の不足から拘束水率が変化すると考えられ、そのような考慮をした複合水和発熱モデルによる解析は実験結果と良好な適合を示した。

参考文献

- 1) 岸 利治、前川宏一：高炉スラグとフライアッシュを用いた混合セメントの複合水和発熱モデル、土木学会論文集、No.550/V-33、1996.11
- 2) 鈴木康範、原田修輔、前川宏一、辻 幸和：温度解析における断熱温度上昇試験結果の適用性、第7回コンクリート工学年次講演論文集、pp25-28、1985
- 3) Koichi Maekawa, Rajesh Chaube, Toshiharu Kishi: MODELING OF CONCRETE PERFORMANCE, E & FN SPON, 1999

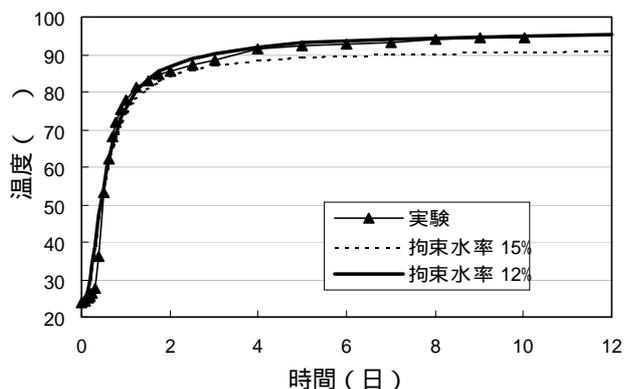


図3 拘束水率を変化させた感度解析 (W/C=30%)

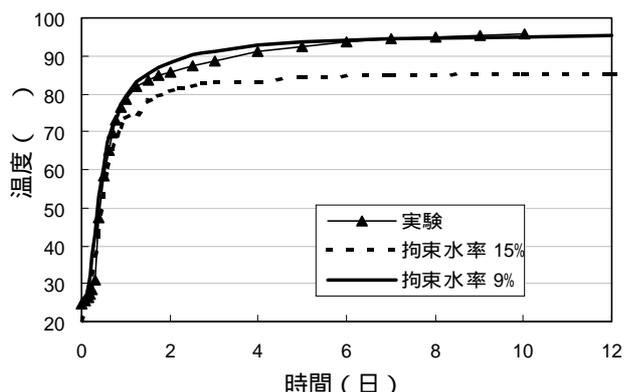


図4 拘束水率を変化させた感度解析 (W/C=25%)

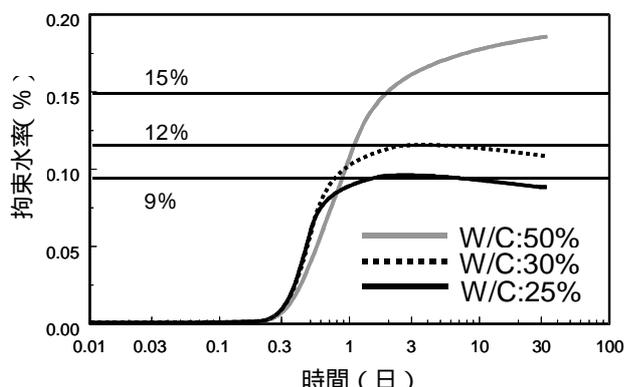


図5 拘束水率の経時変化 (石田)