

論文 温度依存性を考慮したコンクリートの力学的特性

藤森勇希*1・安 紀幸*1・田中 友樹*2・溝渕 利明*3

要旨：セメントの水和熱に起因する温度応力によるひび割れは、コンクリート構造物自体の耐久性に影響を与える場合があることから、事前に精度よく評価する必要がある。本研究では、簡易断熱温度上昇試験法を用いて、打込み温度、セメントの種類などを変化させた場合のマス養生下での力学的特性を検討し、さらに、簡易断熱温度上昇試験と断熱温度上昇試験を比較し、熱容量の違いが断熱温度上昇特性に与える影響についても検討を行った。その結果、断熱温度上昇特性および積算温度と強度についての関係のある程度整理することができた。

キーワード：温度応力，温度依存性，水和熱

1.はじめに

マスコンクリート構造物において、セメントの水和熱に起因する温度応力によって生じる温度ひび割れは、コンクリート構造物の耐久性を損なうばかりではなく、鉄筋を降伏させ、構造物の耐久性の低下を招く場合がある。

本研究では、この温度ひび割れの原因となる水和熱の特性、温度依存性を考慮した圧縮、引張強度などの力学的特性やヤング係数を把握することを目的とし、簡易断熱温度上昇試験、断熱温度上昇試験、圧縮強度および引張強度試験を行った。

2.試験概要

本研究では、現場等で比較的簡単に断熱温度上昇特性を把握でき、さらに断熱状態に近い温度履歴を受けるコンクリートの強度特性を把握することができる簡易断熱温度上昇試験方法を用いて、セメントの種類、打込み温度などを変化させた場合の力学的特性値、温度上昇特性、および断熱状態でのコンクリートの温度上昇特性について検討を行った。

2.1 簡易断熱温度上昇試験

セメントの水和熱によるマッシュなコンクリート部材中央部の温度上昇を簡易的に評価するために、紙製の使い捨て型枠（外径φ100 mm×高さ200 mm）52本にコンクリートを打ち込み、それを4つの発泡スチロール製の容器内（写真-1、図-1、図-2）に13本ずつ入れ、6月、8月、10月は普通ポルトランドセメントを、7月、9月、11月は低熱ポルトランドセメントを用いて、温度上昇量を測定した。配合は表-1に示す。

また、7月と8月の試験時において、2種類のプラスチック容器（容器大：外径φ300 mm×高さH200 mm、容器賞：外径φ450 mm×高さH200 mm）にコンクリートを打ち込み、それぞれ温度上昇を測定した。



写真-1 簡易断熱養生試験

* 1 法政大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

* 2 法政大学 工学部都市環境デザイン工学科

* 3 法政大学教授 工学部都市環境デザイン工学科 工博（正会員）

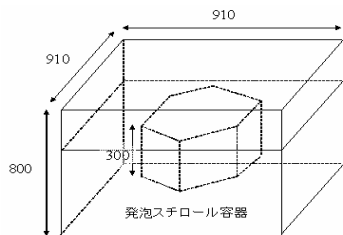


図 - 1 簡易断熱養生方法(概要)

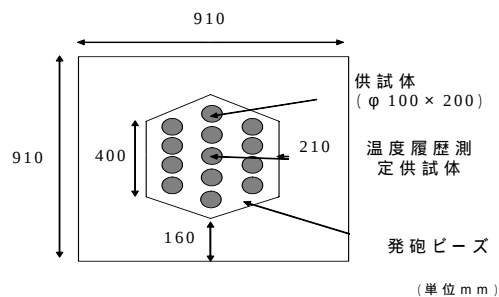


図 - 2 簡易断熱養生方法(内部上断面)

表 - 1 各セメントの配合

	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメン ト比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤	AE減衰 剤
普通セメント	20	12	55	4.5	47.3	162	295	848	925	3.1	1.14
低熱セメント	20	12	55	4.5	47.3	152	276	868	985	3.7	1.01

2.2 断熱温度上昇試験

本試験は、図 - 3 に示すプラスチック製の円柱型容器(外径φ 170 mm × 高さ 240 mm)にコンクリートを打込み、断熱温度上昇試験装置を用いてコンクリートの温度上昇量を測定した。(写真 - 2)

本試験は 8 月、9 月の簡易断熱温度上昇試験と並行して行った。使用セメント及び測定期間は 8 月、9 月の簡易断熱温度上昇試験と同じである。



写真 - 2 断熱温度上昇試験

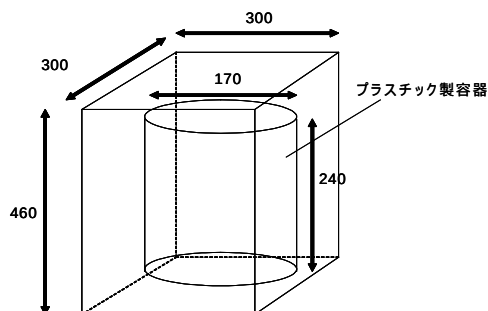


図 - 3 断熱温度上昇試験装置内部の
供試体寸法(概要)

2.3 温度解析

1) 温度解析は、試験体同様のモデルを作成して行った。本解析では、内部コンクリートと型枠部を連続体とした。メッシュレイアウトを図 - 1 に示す。解析に用いた物性値を表 - 2、表 - 3 に示す。

内部コンクリートの断熱温度上昇式は、以下の式を用いた。

$$T = k [1 - \exp(-\alpha t)]$$

k : 終局断熱温度上昇量 ()

α : 上昇速度に関する定数(1/日)

t : 材齢 (日)

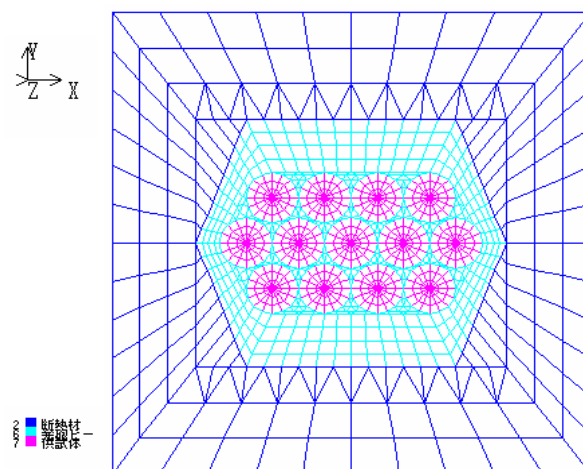


図 - 4 メッシュレイアウト

表-3 各セメントの熱伝導率

	熱伝導率(w/m)	
	簡易断熱養生箱	発泡ビーズ
普通セメント	0.06	0.05
低熱セメント	0.04	0.03

表-4 各部材の物性値

	簡易断熱養生箱	発泡ビーズ	内部コンクリート
比熱(KJ/kg)	125	225	115
密度(kg/m ³)	11	12	23
熱伝導率(w/m)	—	—	27
温度上昇/水和	考慮しない	考慮しない	考慮しない

2.4 強度試験およびヤング係数

コンクリート打込み後，8 材齢(1，2，3，4，5，7，14，28 日)，8 月，9 月の試験時では，4 材齢(1，3，7，14 日))で圧縮試験と引張試験で行った。また，圧縮試験時にひずみの測定を行い，ヤング係数を求めた。

3.結果および考察

3.1 簡易断熱温度上昇試験

簡易断熱温度上昇試験の結果を図 - 5～図 - 8 に示す。図 - 5～図 - 8 から普通ポルトランドセメントは打込み後約 22 時間で最高温度に達し，その後温度降下し，打込み後約 150 時間でほぼ外気温と同様となった。低熱ポルトランドセメントは打込み後約 28 時間で最高温度に達し，その後徐々に温度下降をし，打込み後約 210 時間でほぼ外気温と同様となった。

本試験では，打込み時期の違いにより最高温度は異なるものの，温度の上昇量自体に大きな差異は見られず，温度の上昇量は普通ポルトランドセメントで約 25℃，低熱ポルトランドセメントで約 17℃だった。また，図 - 7，図 - 8 から容器が大きいほど最高温度に達するまで，時間が長く，温度下降時においても下降速度は小さい結果となった。容積が大きいほど，水和反応が遅い理由については，明らかでなく今後検討していくつもりである。

本試験では，セメントの違いによる温度の上昇

速度の差異は見られなかった。ただし，温度降下時では低熱ポルトランドセメントの方が下降速度は小さい結果となった。

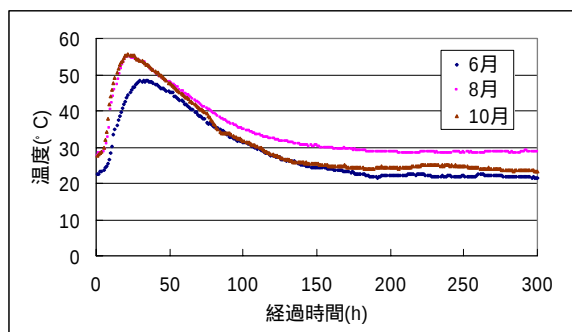


図 - 5 普通ポルトランドセメント

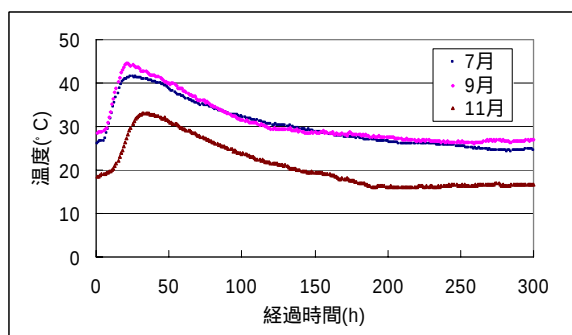


図 - 6 低熱ポルトランドセメント

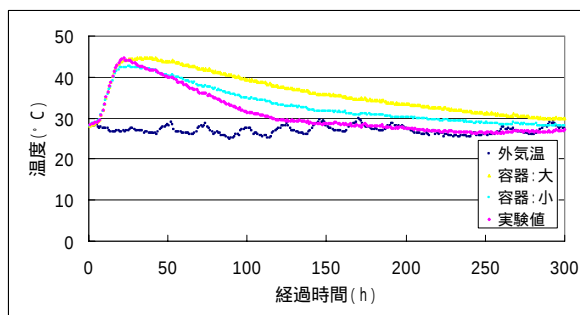


図 - 7 各容器の温度履歴
(普通ポルトランドセメント)

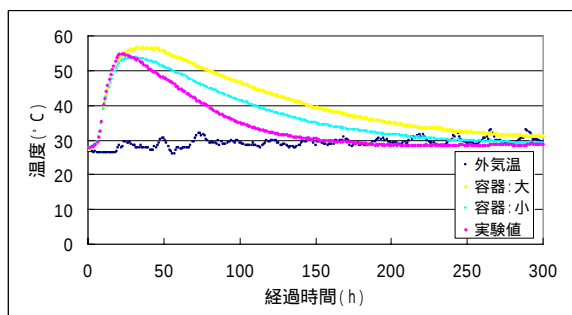


図 - 8 各容器の温度履歴
(低熱ポルトランドセメント)

3.2 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験の結果を図 - 9，図 - 10 に示す。断熱状態では簡易断熱状態と比べ，最高温度に達する時間も遅く最高温度も高い結果となった。

また，最高温度に達するまでの時間は普通ポルトランドセメントが打込み後，約 100 時間後に対し，低熱ポルトランドセメントでは約 200 時間後であった。

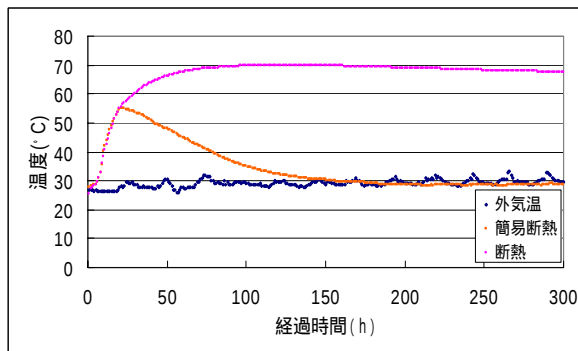


図 - 9 断熱温度上昇試験 (普通セメント)

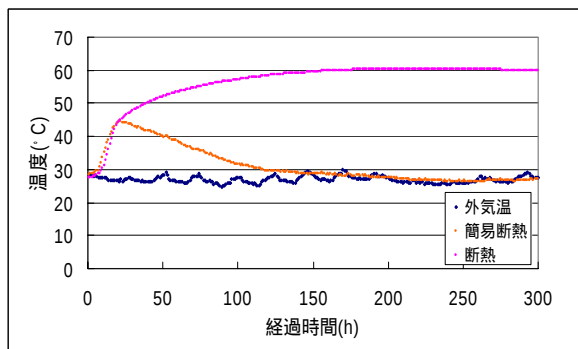


図 - 10 断熱温度上昇試験 (低熱セメント)

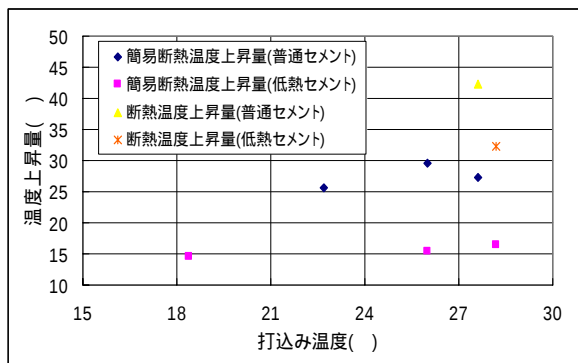


図 - 11 打込み温度と温度上昇量の関係

3.3 温度解析

簡易断熱温度試験時での温度履歴から算定した断熱温度上昇量の解析結果と断熱温度上昇試験の実験値を比較した結果を図 - 12，図 - 13 に示し，簡易断熱試験から算定した解析結果の打込み温度と終局断熱温度上昇量及び上昇速度に関する定数に対する関係を図 - 14，図 - 15 に示す。

断熱温度上昇量は普通ポルトランドセメントのほうが低熱ポルトランドセメントと比べ大きくなっている。上昇速度に関する定数も普通ポルトランドセメントの方が早い傾向であった。

終局断熱温度上昇量は，普通ポルトランドセメント，低熱ポルトランドセメントともに打込み温度の上昇に伴い低下する傾向となり，上昇速度に関する定数は打込み温度の上昇に伴い上昇する傾向となった。

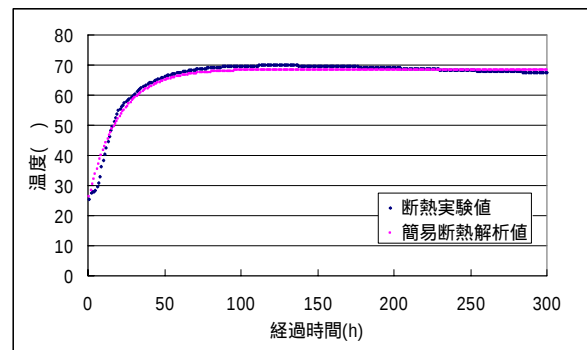


図 - 12 温度上昇特性の比較
(普通ポルトランドセメント)

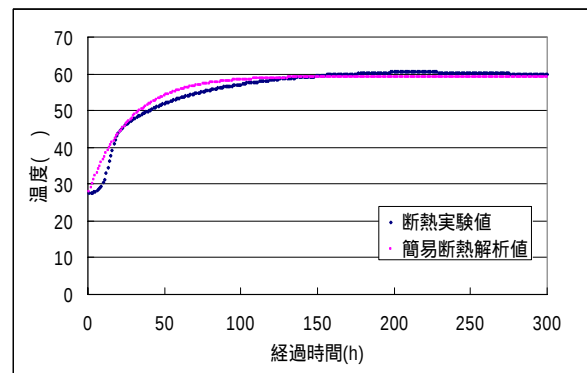


図 - 13 温度上昇特性の比較
(低熱ポルトランドセメント)

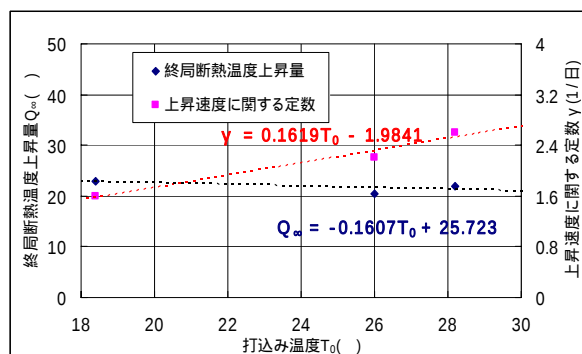


図 - 14 打込み温度と終局断熱温度上昇量，
上昇速度に関する定数との関係
(普通ポルトランドセメント)

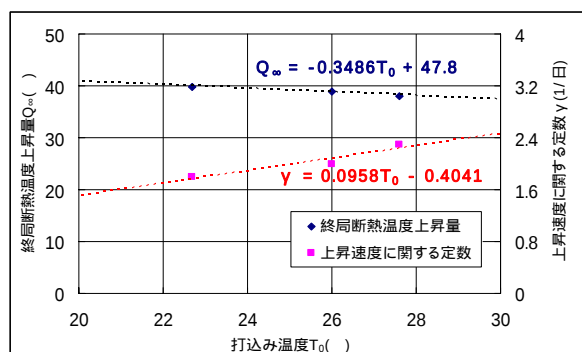


図 - 15 打込み温度と終局断熱温度上昇量，
上昇速度に関する定数との関係
(低熱ポルトランドセメント)

3.4 強度試験およびヤング係数

3.4.1 各強度，ヤング係数と積算温度との関係

圧縮強度と積算温度との関係を図 - 16 に示し，引張強度と積算温度との関係を図 - 17 に示す。また，ヤング係数と積算温度との関係を図 - 18 に示す。

普通ポルトランドセメントの圧縮強度発現はほぼ積算温度と比例する結果となった。低熱ポルトランドセメントは2つの近似曲線を用いて近似し，積算温度が 300 ・day 前後で変曲点を有する結果となった。引張強度も圧縮強度とほぼ同様の傾向が見られた。

低熱ポルトランドセメントのヤング係数の発現は，1つの回帰式を用いて近似をした。

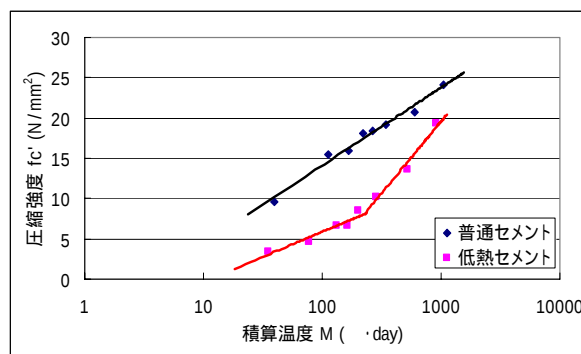


図 - 16 圧縮強度と積算温度との関係

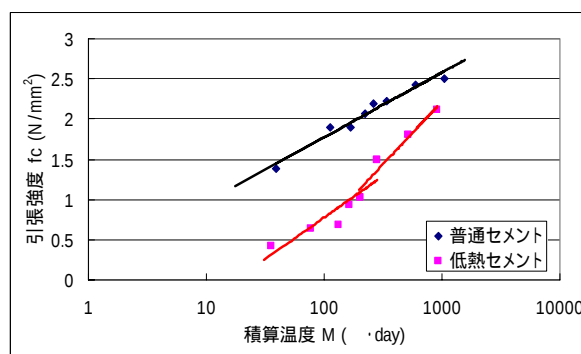


図 - 17 引張強度と積算温度との関係

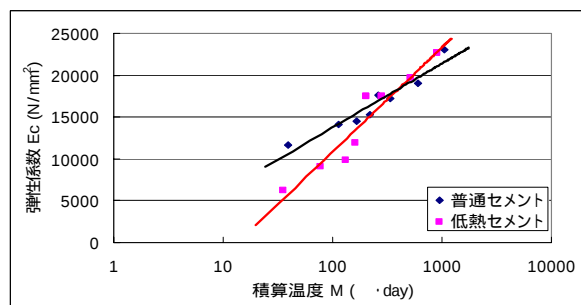


図 - 18 ヤング係数と積算温度との関係

3.4.2 ヤング係数と圧縮強度との関係

ヤング係数と圧縮強度との関係を図 - 19 に示す。普通ポルトランドセメント，低熱ポルトランドセメントともにヤング係数と圧縮強度との関係とを対数関数を用いて近似した。

同じ圧縮強度下では，普通ポルトランドセメントのヤング係数より低熱ポルトランドセメントのヤング係数の方が大きくなった。このことより，同じ応力下では，低熱ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントよりひずみが小さいことが覗える。

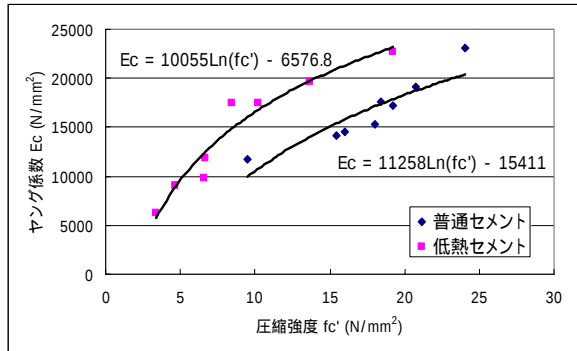


図 - 19 ヤング係数と圧縮強度との関係

3.4.3 圧縮強度と引張強度との関係

圧縮強度と引張強度との関係を図 - 20 に示す。図 - 20 から、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントともに同じ回帰式で近似することができた。セメントの種類が異なっても、圧縮強度と引張強度との関係に影響を及ぼさないと思われる。

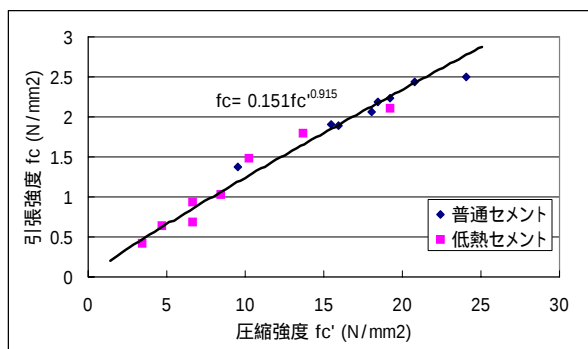


図 - 20 圧縮強度と引張強度との関係

4.まとめ

簡易断熱試験では、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントともに打込み温度の違いにより最高温度に影響を受けるものの、温度上昇量自体には打込み温度の影響を受けないことを確認した。

また、断熱温度上昇試験の温度履歴の実験値と簡易断熱試験の解析値の結果は、同様な形状となることが確認できた。

強度と積算温度との関係では、普通ポルトランドセメントの場合比例関係となり、低熱ポルトランドセメントの場合では、積算温度が

300 ・day 前後で変曲点を有し、確認できた。

今後の展望としては、水セメント比の変更、他のセメントの使用、28 日以降の強度試験の実施などを考えている。

参考文献

- 1) 藤本武助，佐藤俊：伝熱学概論，株式会社文献社，1956
- 2) S.P.ティモシェンコ，J.N.グーディア：弾性論，株式会社コロナ社，1973
- 3) 土木学会：最新のマスコンクリート技術，1996
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧，技報堂出版株式会社，1987