

論文 若材齢における高強度コンクリートの断熱温度上昇に関する研究

小林俊秋*¹・呉 承寧*²・大熊 晃*³

要旨：本研究では、24時間以内の若材齢における高強度コンクリートについて、セメントの種類、単位セメント量、コンクリートの練り上がり温度を変えて断熱温度上昇特性を比較検討した。その結果、断熱温度上昇特性と凝結時間に相関性があることがわかった。それを考慮して、土木学会の断熱温度上昇量の算定式と比較し、より正確な算定式を提案した。

キーワード：断熱温度上昇量、若材齢、高強度コンクリート、凝結時間、

1. はじめに

プレストレストコンクリート部材などは、使用するコンクリートの強度が50~80N/mm²と高く、また一般的に、促進養生し材齢16時間程度で35N/mm²と高い強度が要求される。コンクリートの強度発現は、材齢の関数として与えられるが、養生の温度にも大きな影響を受け、マチュリティによって支配される¹⁾。従って強度管理の面から24時間以内の若材齢における温度上昇特性の解明は重要となる。既往の研究では、各種の断熱温度上昇式が提案されている。しかし高強度コンクリートの温度上昇特性の基礎的物性は十分には明らかになっていない。そこで本研究は、簡易型試験装置を用い24時間以内の若材齢における高強度コンクリートの断熱温度上昇特性を調べ、土木学会の算定式と比較し、より正確な算定式を提案する。

2. 試験の概要

2.1 コンクリートの使用材料および配合

本試験に使用した材料および配合を表-1、表-2に示す。セメントは、普通および早強ポルトランドセメントの2種類とした。配合は、表-2に示すように単位水量を一定として、単

位セメント量を400~600kg/m³の範囲で変化させた。また混和剤のセメント水和への影響を考慮して使用量を一定(セメント質量比)としたため、スランプおよび空気量の調整は行わなかった。試料は0.01m³とした。

表-1 使用材料の種類および物性

材料名	種類	物性
セメント	早強ポルトランドセメント	比重=3.14
	普通ポルトランドセメント	比重=3.14
粗骨材	碎石2005(砂岩)	F.M.=6.78 比重=2.68
細骨材	砕砂	F.M.=2.80 比重=2.61
混和剤	ポリカルボキシル酸系高性能AE減水剤	液体 比重=1.05
水	水道水	比重=1.05

表-2 コンクリートの配合

配合番号	セメント種類	水セメント比 (%) W/C	単 位 量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP
N400	普通	37.5	150	400	833	982	4.00
N500		30	150	500	759	972	5.00
N600		25	150	600	689	958	6.00
H400	早強	37.5	150	400	833	982	4.00
H500		30	150	500	759	972	5.00
H600		25	150	600	689	958	6.00

*1オリエタル建設(株)技術研究所 研究員 (正会員)

*2オリエタル建設(株)技術研究所 主任研究員 工博(正会員)

*3オリエタル建設(株)技術研究所 研究員 修士(正会員)

2.2 練混ぜ方法

練混ぜ方法は、セメント、細骨材の順に投入した後30秒空練りを行い、次に混和剤入りの水を投入して90秒間練混ぜ、最後に粗骨材を投入して60秒間練混ぜを行った。

2.3 断熱温度上昇試験方法

コンクリート練り上がり温度をそれぞれ10℃、20℃および30℃に調整した試料(0.01m³)について、**図-1**に示す簡易型試験装置を用いて断熱温度上昇試験を行う。

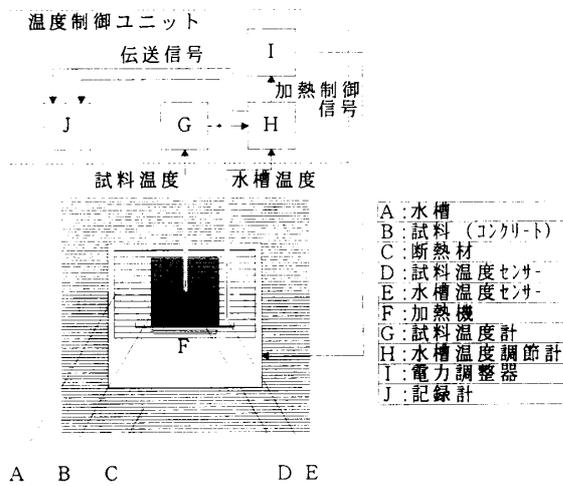


図-1 断熱温度上昇試験用装置の概要

2.4 凝結時間試験方法

フレッシュコンクリートの凝結時間試験は、JIS A 6204 付属書1に準拠して行った。試験温度は、コンクリート練り上がり温度と同じとした。

3. 試験の結果および考察

3.1 若材齢におけるコンクリートの断熱温度上昇

(1) 断熱温度上昇特性とセメントの種類

セメントは、種類によって水和速度が異なり、若材齢におけるコンクリートの断熱温度上昇に大きな影響を与えると考えられる。**図-2**に断熱温度上昇とセメント種類との関係を示す。同図より注水時からの温度上昇開始時間に違いが

みられる。早強セメントを使用したコンクリートは、普通に比較して、注水時からの温度上昇開始時間が約1.5時間早い。また早強セメントの方が断熱温度上昇速度が早く、材齢15時間で温度上昇量が約20℃高い。ただし、温度上昇開始時間は、10分間隔で測定した温度データより0.1℃以上継続して上昇し始めた時点とした。

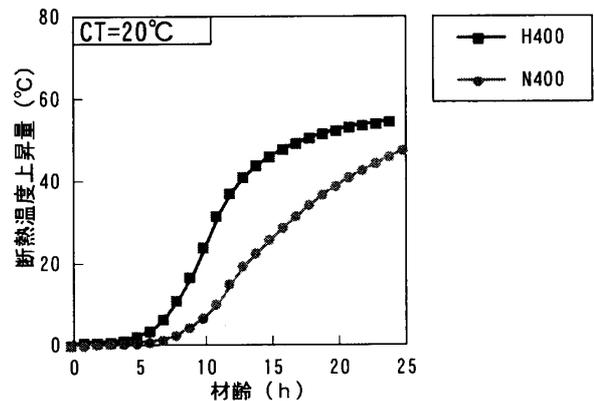


図-2 断熱温度上昇とセメント種類との関係

(2) 断熱温度上昇特性と単位セメント量

断熱温度上昇は、セメントの水和発熱に起因するため、単位セメント量が断熱温度上昇特性を支配する。**図-3**に示すように、普通セメントを用いるコンクリートでは、注水時からの温度上昇開始時間が、単位セメント量400kg/m³および500kg/m³ではほぼ同じであるが600kg/m³では約1.8時間早い。また単位セメント量が多いほど、温度上昇速度が早く、したがって若材齢における温度上昇量が高くなる。

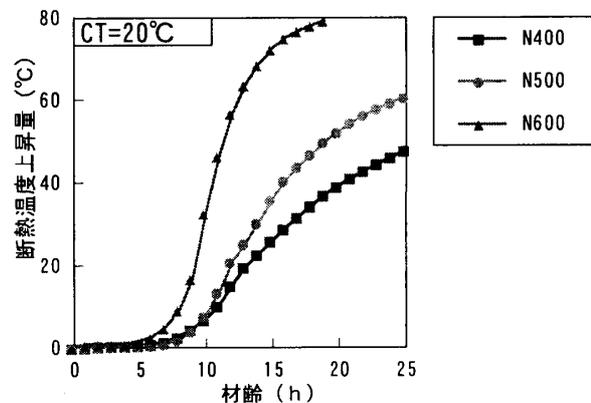


図-3 断熱温度上昇と単位セメント量との関係

(3) 断熱温度上昇とコンクリートの練り上がり温度

コンクリートの練り上がり温度 (C. T.) は、セメントの水和速度に影響することから、若材齢においてコンクリートの断熱温度上昇に大きな影響を与えると考えられる。例として、普通セメントを用いるコンクリートは、図-4に示すように、練り上がり時のC. T.が高いほど、注水時からの温度上昇開始時間が早く、30℃は、10℃に比べ、約7.5時間早い。また温度上昇速度が速く、したがって温度上昇量が大きい。

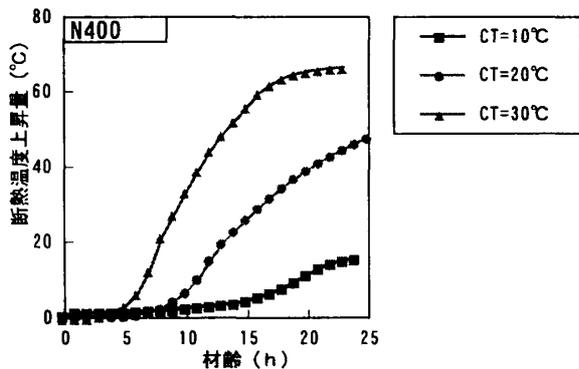


図-4 断熱温度上昇とコンクリートの練り上がり温度との関係

3.2 若材齢におけるコンクリートの断熱温度上昇の算定式

コンクリートの圧縮強度、ヤング係数、自己収縮および温度応力等の特性を解析するために、コンクリートの断熱温度上昇の算定式は必要となる。コンクリートの断熱温度上昇に関して、土木学会の算定式を式(1)に示す2)。

$$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-at)\} \quad (1)$$

この式(1)に基づいて計算した若材齢におけるコンクリートの断熱温度上昇量と実測値を、図-5, 6, 7に示す。同図より式(1)の計算値は、実測値と異なり、特に、セメントの水和が遅れる場合、この計算値と実測値との差が極めて大きくなる。本研究は、若材齢におけるコンクリートの断熱温度上昇試験の実測値を回帰

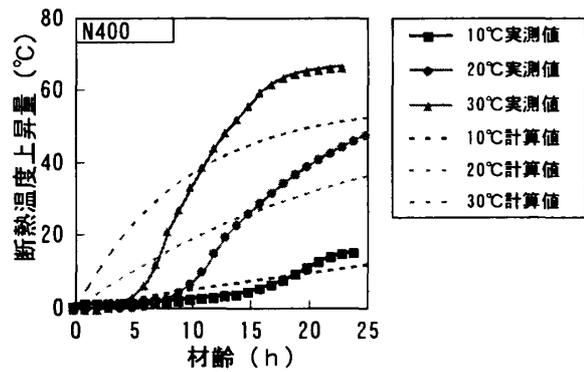


図-5 断熱温度上昇量の実測値と計算値 (N400)

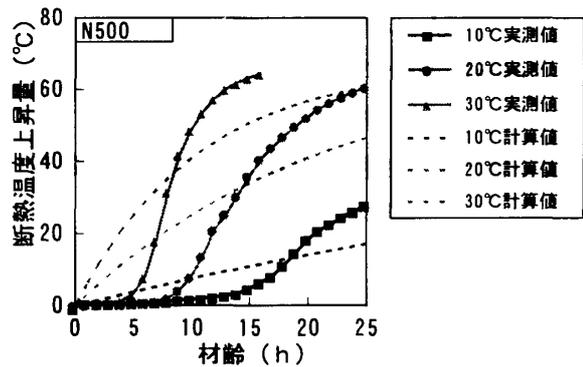


図-6 断熱温度上昇量の実測値と計算値 (N500)

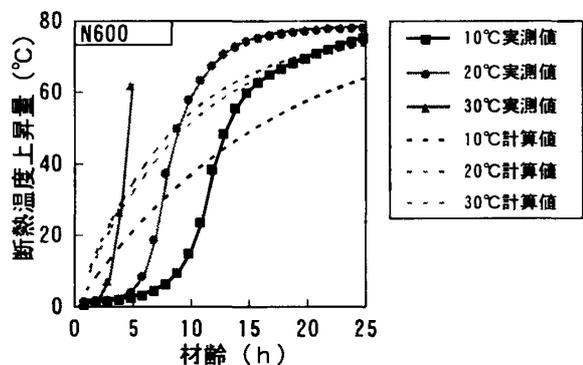


図-7 断熱温度上昇量の実測値と計算値 (N600)

し、近似式の適合性を良好にし発熱速度の指標を表す定数 a および c、注水時からの水和発熱の遅れを表す定数 b 含む式(2)を提案した。

$$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - a / [a + ((t-b)/24)^c]\} \quad (2)$$

ここに、Q(t)は材齢t時間における断熱温度上

昇量(°C), Q_{∞} は終局断熱温度上昇量(°C), aとb, cは温度上昇速度に関する定数, tは材齢(時間)である。表-3に式(2)を用いて回帰した結果を示す。表-3および図-8, 9, 10より, 式(1)より式(2)の方が適合性が良い。

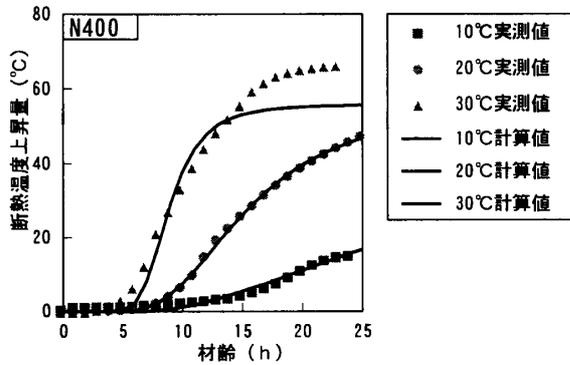


図-8 断熱温度上昇量の実測値と式(2)の計算値 (N400)

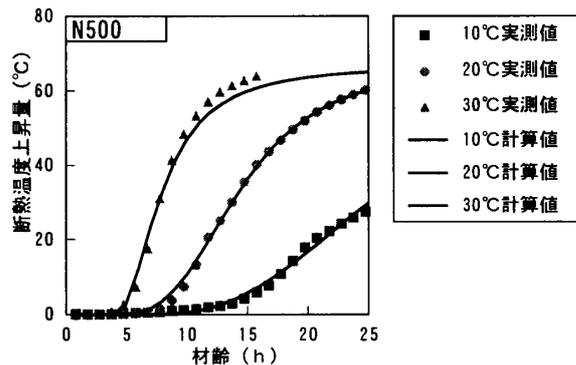


図-9 断熱温度上昇量の実測値と式(2)の計算値 (N500)

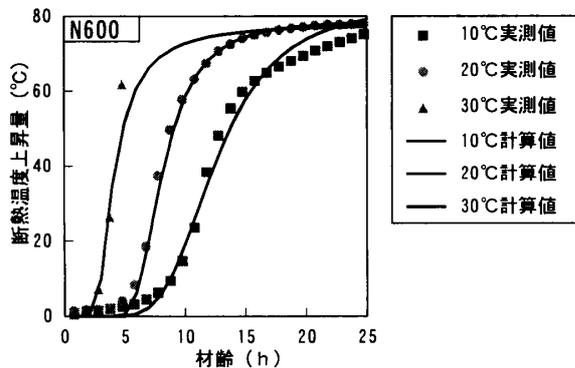


図-10 断熱温度上昇量の実測値と式(2)の計算値 (N600)

表-3 式(2)を用いて回帰した結果

供試体名	Q_{∞}	a	b	c	相関係数
H400-10	67	0.131	6.79	3.48	0.992
H400-20	64	0.095	5.15	1.71	0.991
H400-30	62	0.001	1.19	5.57	0.983
H500-10	80	0.084	6.29	2.68	0.990
H500-20	77	0.038	5.22	2.13	0.987
H500-30	75	0.000	3.64	5.61	0.983
H600-10	93	0.117	3.01	2.65	0.976
H600-20	90	0.056	4.30	1.72	0.978
H600-30	88	0.000	2.10	4.41	0.991
N400-10	59	1.221	7.40	2.00	0.971
N400-20	57	0.128	6.15	2.30	0.996
N400-30	56	0.010	4.25	2.90	0.978
N500-10	71	0.657	6.80	2.69	0.985
N500-20	68	0.087	4.04	2.97	0.998
N500-30	67	0.023	4.08	2.10	0.992
N600-10	83	0.032	4.13	3.32	0.981
N600-20	79	0.007	4.45	2.73	0.999
N600-30	78	0.009	2.35	1.85	0.927

注: Q_{∞} は土木学会式のデータである。

3.3 コンクリートの凝結時間特性

若材齢における高強度コンクリートの断熱温度上昇開始時間は, 練り混ぜ時より数時間遅れて開始する。これは水和反応の誘導期に該当するか, または高性能AE減水剤の使用量が比較的多いために, 水和反応が混和剤により制御されるためと思われる。その後活発な反応が行われる段階(加速期)に移行する。前段階から本段階へ移行する境界点より若干本段階に入り込んだ所が凝結に相当する。この注水時からの発熱反応の遅れの程度を知ることは, 断熱温度上昇特性を正確に把握するために重要であると考えられる。式(2)での実験定数の物理的意味をコンクリート凝結時間試験により評価することを考えた。

(1) 凝結時間特性とセメントの種類

図-11にセメントの種類を変えた場合のコンクリートの貫入抵抗と材齢の関係を示す。同図より, 早強セメントを用いるコンクリートは, 普通に比較して, C_3A , C_3S の含有量が比較的多いため凝結始発時間および終結時間ともに約1時間早い。

(2) 凝結時間と単位セメント量

図-12に単位セメント量を変えた場合のコンクリートの貫入抵抗と経過時間の関係を示す。同図より、凝結始発時間および終結時間は、単位量が400kg/m³および500kg/m³ではほぼ同じであるが600kg/m³では約2.3時間早い。単位量が多いため水和反応は増加して凝結始発時間および終結時間もともに短くなる。

(3) 凝結時間特性とコンクリートの練り上がり温度

図-13にコンクリートの練り上がり温度 (C. T.) を変えた場合のコンクリートの貫入抵抗と経過時間の関係を示す。同図より、C. T. が高いほど、水和反応は促進され凝結始発時間が、30℃は、10℃に比較して、約6.5時間早い。

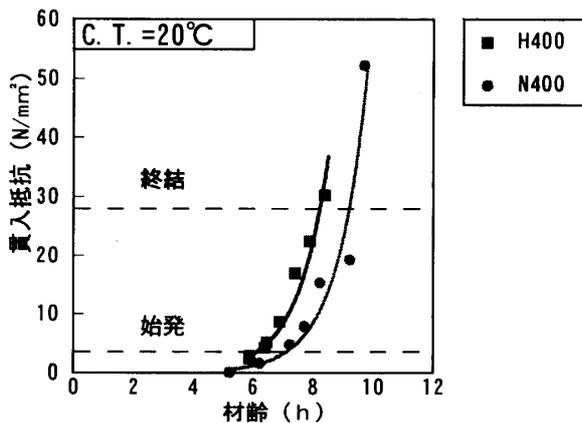


図-11凝結時間に及ぼすセメント種類の影響

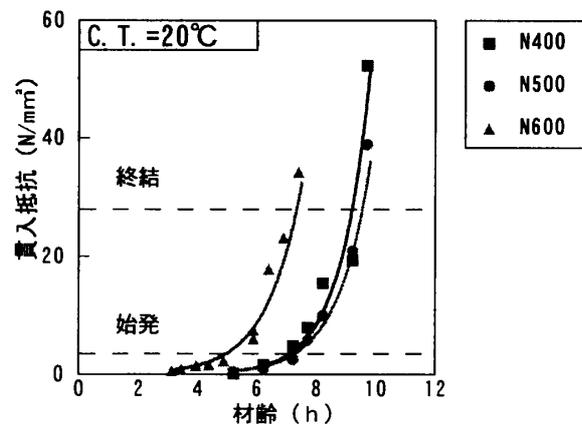


図-12凝結時間に及ぼす単位セメント量の影響

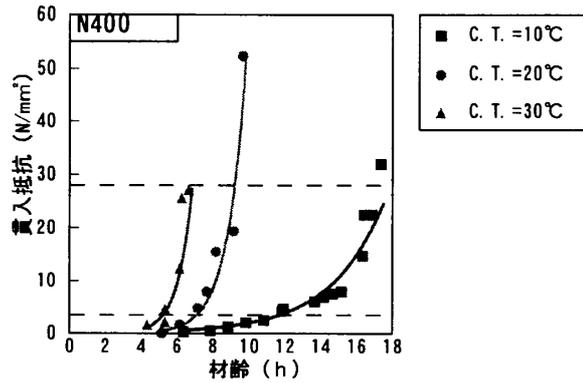


図-13 凝結時間に及ぼすC. T. の影響

3. 4 実験定数に関する検討

(1) 実験定数 a, b と凝結始発時間の関係

式(2)の実験定数 a は、発熱速度の指標、b は、水和発熱の注水時からの遅れと仮定した。a および b の物理的意味を評価するために、コンクリートの凝結始発時間と a の関係を図-14, b との関係を図-15, に示す。

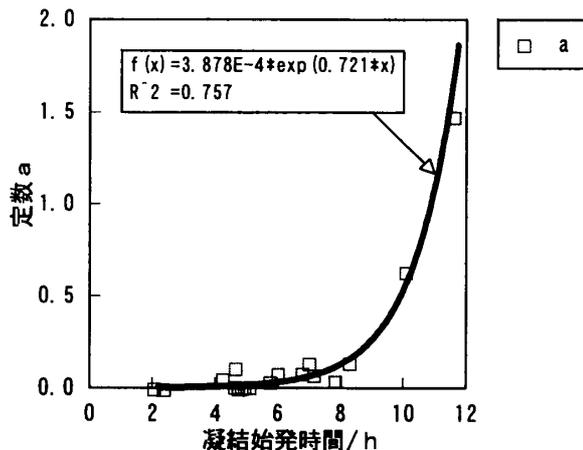


図-14 定数 a と凝結始発時間の関係

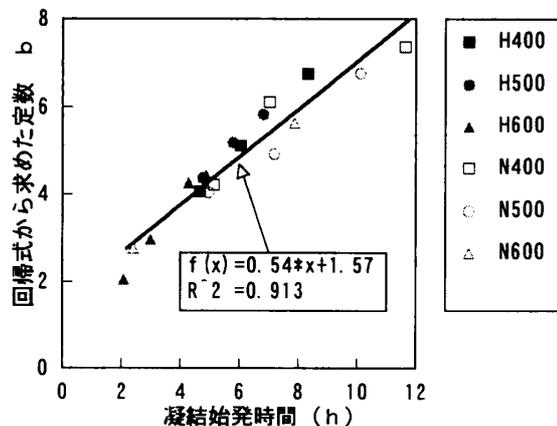


図-15 定数 b と凝結始発時間の関係

定数 a は、発熱速度の逆数を表す指標である。図-15に示すように、凝結始発時間の増加に伴い指数関数的に増大している。若干相関性は低い。定数 b は、セメントの種類、単位量および練り上がり温度によらず凝結始発時間と相関性がある。そこで、式(2)の定数 a および b を凝結始発時間の関数とする式(3)を提案する。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - a / \{a + ((t - b) / 24)^c\}] \quad (3)$$

$$a = 3.878E-4 * \exp(0.721 * x)$$

$$b = 0.54 * x + 1.57$$

ここで、 Q_{∞} は終局断熱温度上昇量(°C)、a, b, c は温度上昇速度に関する定数、x は、凝結始発時間(時間)、t は材齢(時間)

式(3)で回帰した結果を表-4, N500(10, 20, 30°C) および H500(10, 20, 30°C) を例として回帰結果を図-16, 17に示す。

表-4 式(3)の回帰結果

配合記号	凝結始発時間/h	定数 a	定数 b	定数 c	相関係数 R ²
H400-10	8.43	0.170	6.12	3.537	0.991
H400-20	6.15	0.033	4.89	2.529	0.988
H400-30	4.78	0.012	4.15	2.103	0.950
H500-10	6.92	0.057	5.31	3.434	0.993
H500-20	5.89	0.027	4.75	2.470	0.988
H500-30	4.88	0.013	4.21	1.795	0.977
H600-10	4.79	0.012	4.16	4.562	0.953
H600-20	4.39	0.009	3.94	2.982	0.955
H600-30	2.19	0.002	2.75	2.307	0.974
N400-10	11.75	1.863	7.92	1.276	0.938
N400-20	7.13	0.066	5.42	3.140	0.993
N400-30	5.24	0.017	4.40	2.407	0.974
N500-10	10.23	0.622	7.09	2.683	0.987
N500-20	7.3	0.075	5.51	2.679	0.999
N500-30	5.08	0.015	4.31	2.287	0.995
N600-10	7.97	0.122	5.87	1.644	0.962
N600-20	4.99	0.014	4.26	2.344	0.994
N600-30	2.5	0.002	2.92	2.114	0.947

これらの表および図より式(3)の定数 a および b を凝結始発時間の関数とすることにより十分適合性が良いと考えられる。定数 c は、測定値を良好に近似するために用いた。

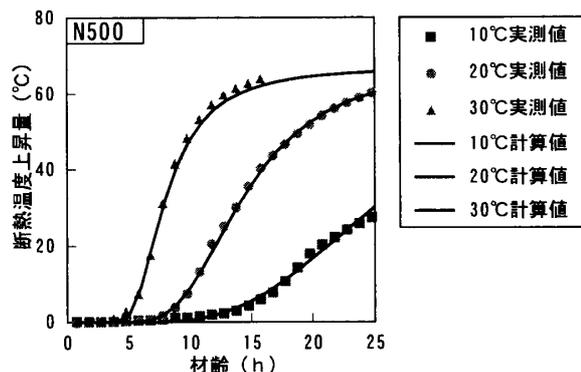


図-16 断熱温度上昇量の実測値と式(3)の関係N500(10, 20, 30°C)

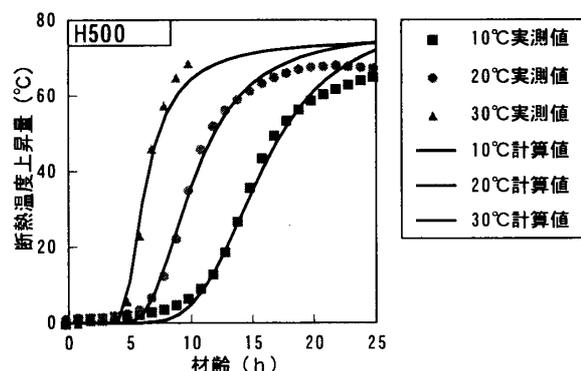


図-17 断熱温度上昇量の実測値と式(3)の関係H500(10, 20, 30°C)

4. まとめ

本試験の範囲内において、以下の結論が得られた。

- (1) 若材齢における高強度コンクリートの断熱温度上昇特性は、用いるセメントの種類、単位量および打設時温度に大きな影響を受ける。
- (2) 断熱温度上昇特性における水和発熱速度および注水時からの水和発熱の遅れを凝結始発時間の関数として評価できる。
- (3) 若材齢における高強度コンクリートの断熱温度上昇量が式 $Q(t) = Q_{\infty} [1 - a / \{a + ((t - b) / 24)^c\}]$ によって計算できる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会, 自己収縮研究委員会 報告書, pp. 93-122, 1996
- 2) 土木学会, コンクリート標準示方書, 施工編, pp. 185-186, 1996