

# 断熱温度上昇過程における マスコンクリートの力学的性質

浅上 修<sup>1</sup>・中村秀明<sup>2</sup>・浜田純夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 宇部興産㈱ 建設資材事業本部 (〒755 山口県宇部市大字小串字沖の山1-6)

<sup>2</sup>正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

<sup>3</sup>正会員 Ph.D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

マスコンクリートでは、セメントの水和熱に伴う温度上昇は断面内の位置で著しく異なっており、コンクリートの力学的性質の発現状況も断面内の位置により差異があるものと思われる。マスコンクリートの中心部は断熱状態に近く、精度の高い温度ひび割れ解析を行うには断熱状態で養生されたコンクリートに対する力学的物性値が必要となる。そこで本研究では、断熱状態におけるマスコンクリートの硬化過程の力学的物性値を明らかにすることを目的として、力学的物性値（圧縮強度、割裂引張強度、弾性係数）の測定を行った。普通ポルトランドセメントおよび低発熱形セメントについて打込み温度を変えた実験を行い、あわせて断熱温度上昇過程における力学的性質の発現性の推定方法について検討した。

**Key Words:** mass concrete, adiabatic temperature rise, compressive strength, splitting tensile strength, young's modulus, placing temperature, low heat portland cement, maturity

## 1. まえがき

マスコンクリートの温度応力を解析し、ひび割れ対策を検討するためにはコンクリートのヤング係数、クリープ性状、引張強度等の基礎的な力学的物性値が必要であり、精度の良い解析結果を得るためにには、的確なコンクリートの力学的物性値の把握が重要となる。セメントの水和熱に伴う温度上昇は断面内の位置で著しく異なっており、それに伴いコンクリートの力学的性質の発現状況も断面内の位置により差異があるものと思われる。セメントの水和反応は時間と温度履歴に依存していることがよく知られており、一般にはコンクリートの力学的物性値の経時変化を、材齢および温度履歴の関数ではなく、有効材齢やマチュリティ（積算温度）の関数として取り扱われていることが多い。これは、異なる養生温度履歴下においても、有効材齢やマチュリティーを用いれば、ほぼ一意的に強度や剛性が得られるという実験結果に基づいており<sup>1)</sup>、従来よりFEM解析を行う場合などではマチュリティーで力学的物性値を評価する方法がとられている。しかしながら、コンクリートの強度や剛性をマチュリティーから予想す

る方法では、硬化初期に高温に保たれたコンクリートは長期強度が低下する事実を表せないなどの制約条件があり<sup>2)</sup>、標準養生下での値をマチュリティーで使用した場合には長期材齢で誤差を生じる。マスコンクリートにおいては形状寸法の大きなコンクリートの中心部では断熱状態に近く、断熱状態で養生されたコンクリートに対しての力学的物性値が必要となる。断熱状態で養生されたコンクリート、特に低発熱形セメントを用いたコンクリートについての力学的物性値を取り扱った研究は少ない。

そこで本研究では、断熱状態におけるマスコンクリートの硬化過程の力学的物性値を明らかにすることを目的として、同一水槽内で断熱温度上昇実験と断熱養生が同時に実験される断熱温度上昇実験装置を試作して基礎的実験を行った。普通ポルトランドセメントおよび低発熱形セメントを用いたコンクリートについて実験を行い、断熱温度上昇過程における力学的物性値の発現性の推定方法について検討した。また、マスコンクリートの施工に際して行われるプレクーリングがコンクリートの強度発現に及ぼす影響についても検討を行った。対象とした力学的物性値は、圧縮強度、割裂引張強度、割線弾性係数である。

表-1 実験条件

セメント種類	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	断熱養生		標準養生	コンクリートの配合							
		打込み温度 (°C)				水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		10	20	30	20			水	セメント	細骨材	粗骨材	
普通(N)	250		○			61.6	44.1	154	250	828	1096	1.0
	300	○	○	○	○	51.3	43.0	154	300	789	1094	1.2
	350		○			44.0	41.4	154	350	743	1099	1.4
低熱(L)	300	○	○	○	○	51.3	42.0	154	300	773	1117	1.2

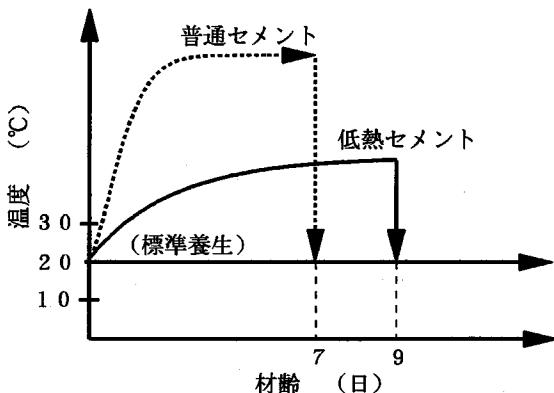


図-1 供試体の温度履歴

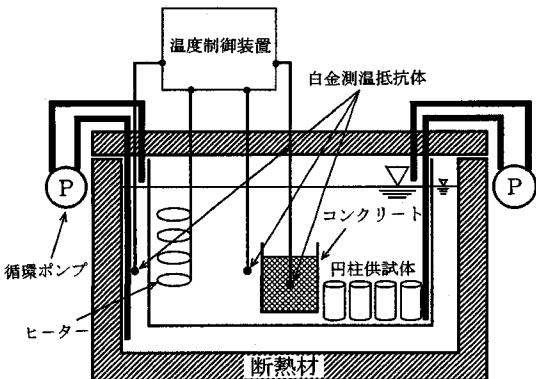


図-2 断熱温度上昇試験装置の概要

表-2 セメントの鉱物組成および物理試験結果

セメント種類	鉱物組成 (%)				比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF		
普通	55	19	9	9	3.15	3200
低熱	27	52	3	12	3.23	3380

## 2. 実験概要

### (1) 実験概要

本研究は、断熱状態におけるコンクリートの硬化過程の力学的物性値を明らかにする目的で、主にセメントの種類と打込み温度を変えて力学的物性値(圧縮強度、割裂引張強度、割線弾性係数)の測定を行った。表-1に実験条件を示す。実験には普通ポルトランドセメント(以下、普通セメントと略す)と最近マスコンクリート用途に用いられている低発熱ポルトランドセメント(以下、低熱セメントと略す)を取りあげ、両者の比較を試みた。また、マスコンクリートの施工に際して行われている打設温度の低温化(プレクーリング)がコンクリートの強度発現性に及ぼす影響を検討する目的で、コンクリートの打込み温度を変えた実験を行った。あわせ

て、それぞれのセメントについて比較のために、標準養生状態における実験も行った。図-1に供試体が受ける断熱温度上昇過程における温度履歴の概略を示す。普通セメントについては、供試体を打込み後7日間断熱温度上昇過程で養生し、それ以降は標準水中養生とした。低熱セメントについては、断熱温度上昇曲線が終局する材齢が普通セメントよりも長いことを考慮し、供試体を打込み後9日間断熱温度上昇過程で養生し、それ以降を標準水中養生とした。

### (2) 使用材料および配合

実験で使用したセメントは、普通ポルトランドセメントおよび低発熱ポルトランドセメントである。使用したセメントの鉱物組成の概略値および物理試験の主な結果は表-2に示すとおりである。表-1に実験条件に対応したコンクリートの配合を示す。配合は単位水量を一定とし、目標スランプ8cm、目標空気量4%となるように試し練りにより決定した。空気量は補助AE剤を使用して調整した。打込み温度を変えた場合には空気量の調整は行ったが、配合の修正は行わなかった。

### (3) 実験装置および実験方法

図-2に断熱温度上昇実験装置の概要を示す。断熱温度上昇実験は20cm高さのφ29cmの円柱型コンクリート供試体中心の温度と水槽内の水温を白金測温抵抗体で測定し、水温がコンクリートの中心温度に追従するようにヒーターのオンオフをパソコンのプログラムで制御することにより行った。力学的物性値を測定する円柱供試体(φ10×20cm)は、初期の温度履歴を厳密にするために上面をラップで覆い、型枠ごと水槽内で養生した。力学的物性値の測定は、材齢1, 2, 4, 7, 14, 28, 91日で行った。供試体は試験直前に断熱温度上昇実験水槽または標準養生水槽(20±3°C)より取り出し、乾燥しないように温水および水道水で室温まで徐冷し、端面を研磨後、直ちに試験に供した。圧縮強度・割裂引張強度試験は、JIS A1108・JIS A1113に準じて行った。圧縮強度試験においては、静弾性係数試験方法(案)JSCE-G502-1988に準じて、コンプレッソメーターを使用して破壊荷重の1/3点における割線弾性係数を求めた。一回の強度試験に使用する供試体は3個とし、結果はそれらの平均値を用いた。

### (4) 断熱温度上昇の近似

コンクリートの断熱温度上昇に関する研究は数多くなされているが、統一した試験方法がないために研究者によってまちまちの装置で実験を行っているのが現状である<sup>3), 4)</sup>。また、コンクリートの断熱温度上昇曲線を近似する式も数多く提案されている。本研究では断熱温度上昇実験の結果を以下の3式を用いて近似した<sup>5), 6), 7)</sup>。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (1)$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma S}) \quad (2)$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - (1 + \gamma t)e^{-\gamma t}) \quad (3)$$

ここに、 $Q(t)$ は材齢 $t$ 日における断熱温度上昇量であり、 $Q_{\infty}$ は終局断熱温度上昇量、 $\gamma, S$ は実験定数である。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 断熱温度上昇特性

本研究の目的は、図-2に示す断熱温度上昇実験装置を用いて、断熱状態におけるコンクリートの硬化過程の力学的物性値を明らかにすることである。既往の研究<sup>8)-12)</sup>では、高価な断熱温度上昇実験装置

で別途測定した断熱温度上昇曲線をシミュレイトして、断熱温度上昇過程におけるコンクリートの強度発現性を検討したものが多い。そこで、本実験はこれらの二つの実験を一度に行う<sup>13)</sup>目的で、簡易的な断熱温度上昇実験装置を試作して行った。

図-3に各セメントコンクリートにおける断熱温度上昇実験の実測結果と式(2)で近似した結果を示す。実測結果は、ところどころ温度が下がっているところがあるが、これは図-2に示す断熱温度上昇試験装置から実験供試体を取り出すときに水槽内の温度が下がってしまうためである。図中に示す凡例の[N-300-20°C]は普通ポルトランドセメント、単位セメント量300kg/m<sup>3</sup>の配合で打込み温度20°Cを意味し、[L-300-10°C]は低発熱ポルトランドセメント、セメント量300kg/m<sup>3</sup>の配合で打込み温度10°Cを意味する。

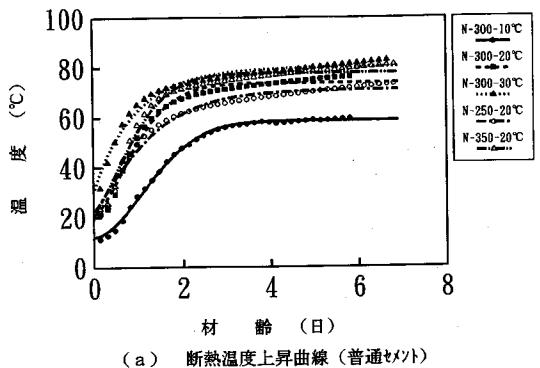
### (2) 断熱温度上昇過程における力学的物性値の発現性

図-4に断熱温度上昇過程(以下、断熱養生と称す)におけるコンクリートの力学的物性値の材齢に対する発現性を示す。

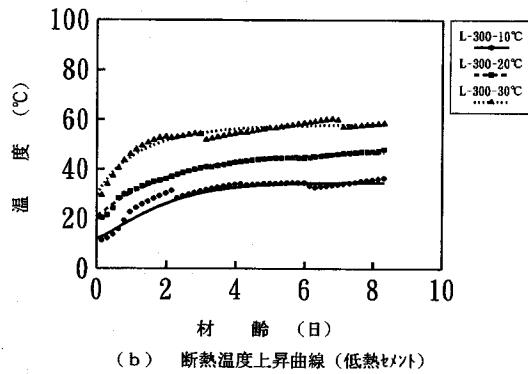
普通ポルトランドセメント(普通セメントと略す)、低発熱ポルトランドセメント(低熱セメントと略す)とともに、強度の発現性は図-3に示す断熱温度上昇特性と相関が見られる。これは、セメントの水和発熱はその水和反応に起因するものであり、水和発熱すなわち水和反応の進行は、セメントの凝結・硬化が進み、強度が増進することと比例関係にあることから推察される。ただし、普通セメントでは、打込み温度が高い場合には、コンクリートの長期強度の発現を阻害する温度領域における養生期間が長くなり、断熱温度上昇特性のように打込み温度が高いほど大きな値を示すとは限らない。

普通セメントでは、既往の研究<sup>14), 15), 16), 17)</sup>と同様に、断熱養生は標準養生に比べて初期の力学的物性値の発現が早いものの、長期にわたっての強度増進が見られない。特に打込み温度が高いほどその傾向が顕著に現れている。

一方、低熱セメントでは、打込み温度30°Cの断熱養生は標準養生に比べて、初期の力学的物性値の発現が著しく早く、断熱養生後も力学的物性値の増進がみられた。打込み温度10°C, 20°Cでは、標準養生に比べて初期の力学的物性値の発現に大差はみられないが、4日目以降に差異が表れた。打込み温度10°C, 20°Cでは一部データが逆転している。これは同一配合ではあるが、品質管理用コンクリート(標準養生28日)の強度が両者で異なっており、コンク

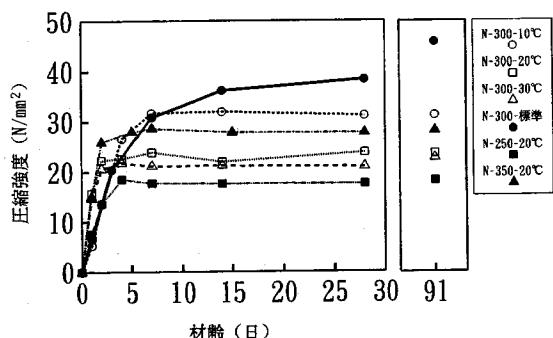


(a) 断熱温度上昇曲線（普通セメント）

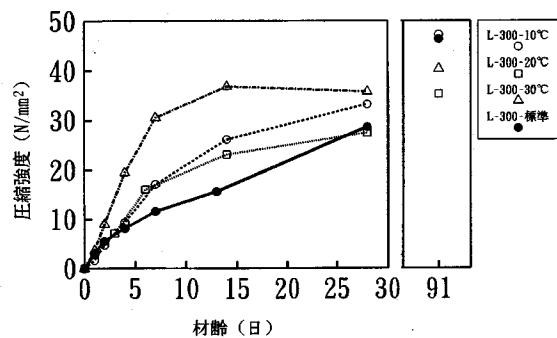


(b) 断熱温度上昇曲線（低熱セメント）

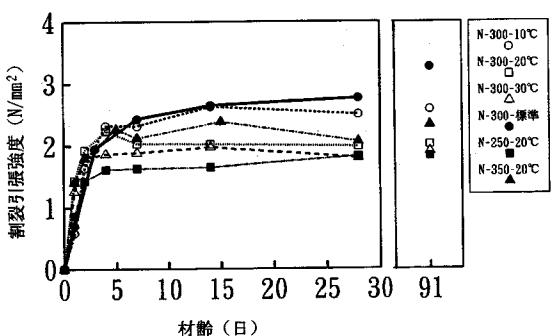
図-3 断熱温度上昇実験の結果



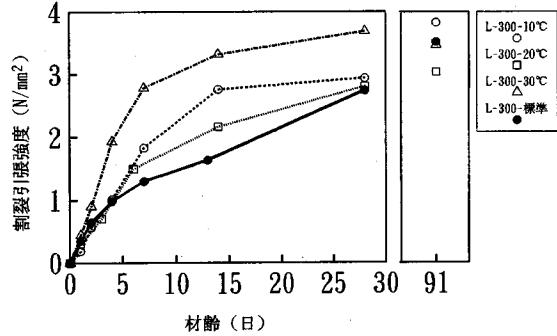
(a) 材齢と圧縮強度（普通セメント）



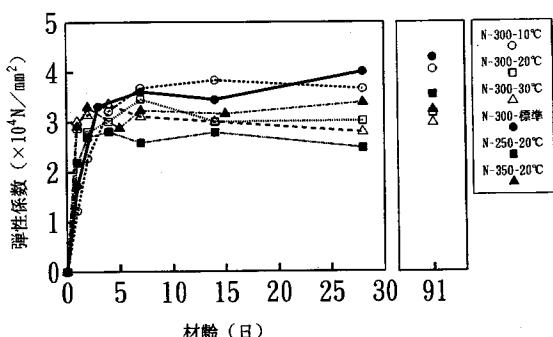
(d) 材齢と圧縮強度（低熱セメント）



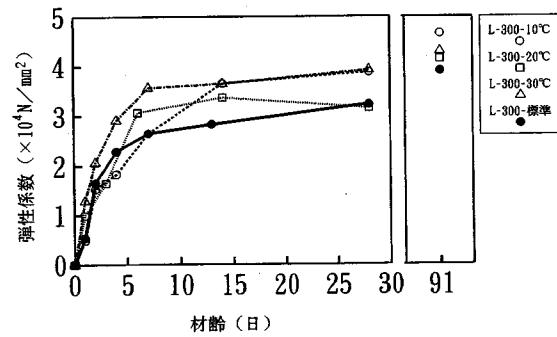
(b) 材齢と割裂引張強度（普通セメント）



(e) 材齢と割裂引張強度（低熱セメント）



(c) 材齢と弾性係数（普通セメント）



(f) 材齢と弾性係数（低熱セメント）

図-4 力学的物性値の発現

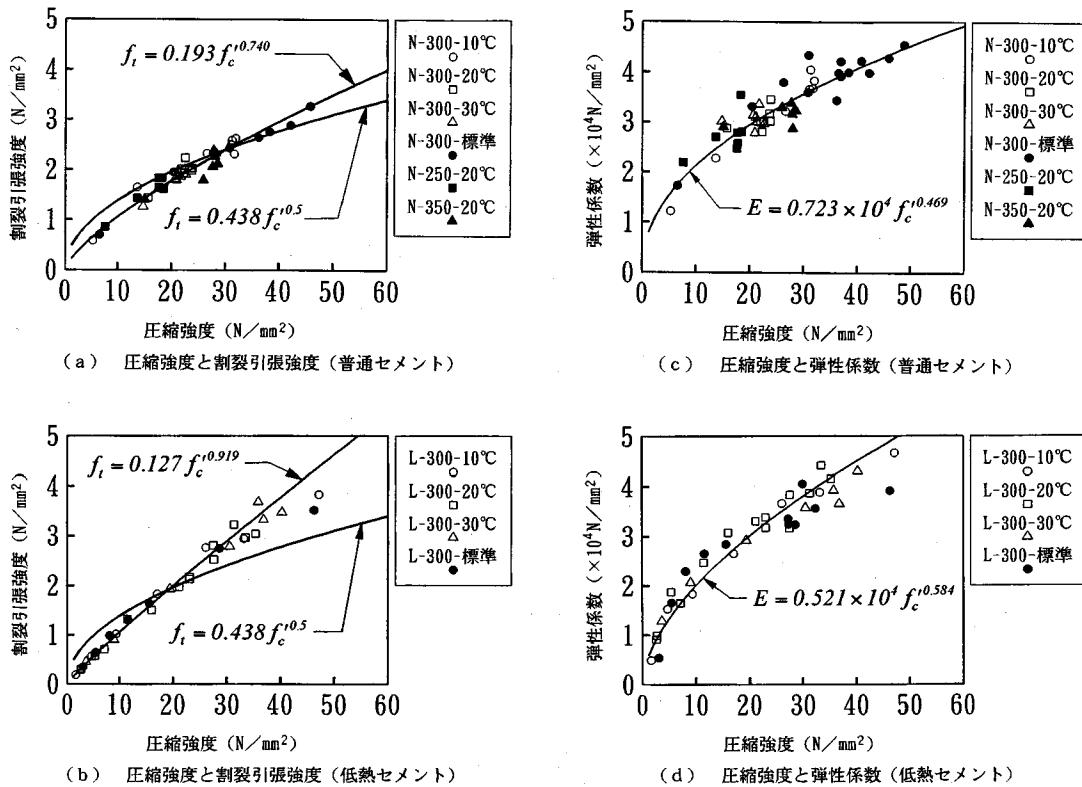


図-5 力学的物性値間の関係

リートそのものに若干のばらつきがあったためと考えられる。低熱セメントでは、初期に断熱養生したコンクリートでも長期材齢においても強度が徐々に増進する。

以上に示すように普通セメント・低熱セメントでは断熱養生における力学的物性値の発現性に違いがみられる。表-2に示す鉱物組成からもわかるように普通セメントでは短期強度発現性には優れるものの水和熱の大きなエーライト ( $C_3S$ ) の含有率が多く、低熱セメントでは、長期強度発現性に優れ水和熱の小さいビーライト ( $C_2S$ ) の含有率が多い。エーライト ( $C_3S$ ) の含有率が多い普通セメントでは断熱養生であるため、初期の水和が促進され、初期強度の発現は早くなつた。しかし、断熱温度上昇量が約50°Cあるため、コンクリートの長期強度の発現を阻害する温度領域における養生期間が長くなり、長期強度は増進できなかつたものと考えられる。一方、ビーライト ( $C_2S$ ) の含有率が多い低熱セメントでは、長期強度発現性に優れるビーライト ( $C_2S$ ) の影響と、断熱温度上昇量が約30°Cであり、強度の発現を阻害する温度領域での養生期間が

短いため、長期強度も安定して得られたものと考えられる。したがつて、マスコンクリート用途に断熱温度上昇量が大きい配合のコンクリートを使用する場合には、中心部における長期強度の面からも、極力打設温度を下げることが重要であり、プレクリング等が効果的であると考えられる。一方、断熱温度上昇量が小さい低熱セメントについては、打設温度によるコンクリート強度への影響は少なく、どちらかというと、温度応力解析の結果次第では打設温度を高くすれば初期に引張強度の発現が期待できる面もあり、適正打設温度があるものと考えられる。

### (3) 力学的物性値間の関係

図-5に圧縮強度と割裂引張強度、圧縮強度と弾性係数の関係を示す。圧縮強度と割裂引張強度の関係は既往の文献<sup>[18], [19]</sup>によるとべき乗の関係式で表されることが多い。本実験の結果によると、普通セメントは単位セメント量や温度履歴には関係なく、ほぼ一つの関係式として  $f_t = 0.353 f_c'^{0.740} [\text{kkg}/\text{cm}^2]$  ( $f_t = 0.193 f_c'^{0.740} [\text{N}/\text{mm}^2]$ ) で回帰できる。また、

低熱セメントでも同様に圧縮強度と割裂引張強度の関係は、単位セメント量や温度履歴に関係なくほぼ一つの関係式で回帰できる。ただし、その関係式はべき乗の形でも直線式に近く、 $f_t = 0.153 f_c^{0.919}$  ( $f_t = 0.127 f_c^{0.919}$ ) で表された。したがって、コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>等で示されている従来の引張強度の推定式  $f_t = 1.4 f_c^{0.5}$  ( $f_t = 0.438 f_c^{0.5}$ ) を使用すると若材齢（圧縮強度が小さい領域）においては、引張強度を実際よりも大きく見積もってしまう。特に、低熱セメントについては関係式が直線に近いため、この傾向が顕著にあらわれやすい。<sup>19)</sup>

圧縮強度と弾性係数の関係は、既往の文献<sup>18), 19)</sup>によると上記と同様にべき乗の関係式であらわされることが多い。本実験の結果によると普通セメント・低熱セメントとも養生条件に関係なくそれぞれ一つの関係式であらわされる。普通セメントは、 $E = 2.48 \times 10^4 f_c^{0.469}$  ( $E = 0.723 \times 10^4 f_c^{0.469}$ ) で回帰され、低熱セメントは、 $E = 1.37 \times 10^4 f_c^{0.584}$  ( $E = 0.521 \times 10^4 f_c^{0.584}$ ) で回帰された。

#### (4) 積算温度と力学的物性値

力学的物性値を積算温度で評価するために、実験で得られた温度履歴から積算温度の計算を行った。積算温度は温度の基準点を-10°Cとして下記の計算式より算出した。

$$M = \sum (T + 10) \cdot \Delta t \quad (4)$$

ここに、 $M$ は積算温度(°C · day)， $T$ は養生温度(°C)， $\Delta t$ は $T$ に保持された時間(day)である。

図-6に積算温度の対数と力学的物性値の関係を示す。普通セメント、低熱セメントとともに、積算温度の対数と各力学的物性値の関係は養生条件ごとに近似的に二直線で表すことができる。しかしながら二直線の関係は、普通セメントでは上に凸となり、低熱セメントでは下に凸となり、様相が異なる。これは普通セメントはエーライト( $C_3S$ )の含有率が高いため、初期強度の発現に優れているのに対し、低熱セメントはビーライト( $C_2S$ )の含有率が高いため、長期強度の発現性に優れているためと考えられる。普通セメントでは、コンクリートの配合が異なるN-250-20°C, N-350-20°C（打込み温度が20°Cで単位セメント量がそれぞれ250kg/m<sup>3</sup>, 350kg/m<sup>3</sup>）を除くと、積算温度が小さい領域では養生条件によらず積算温度の対数と各力学的物性値は一つの直線によって関係づけられる。しかししながら、 $M = 210^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ 以上では養生条件ごとに直線関係がある

ことが認められる。したがって、積算温度が小さい範囲では積算温度則は成立するが、積算温度が大きい範囲では若材齢時の養生条件によりコンクリートの強度発現に影響がでる。また低熱セメントでも、同様に積算温度が小さい領域では養生条件によらず、積算温度の対数と各力学的物性値は一つの直線によって関係づけられる。しかし $M = 210^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ 以上では普通セメントほど顕著ではないが、各養生条件ごとに直線関係があることが認められる。岸ら<sup>20)</sup>はセメントの水和反応の進行度合をあらわす積算発熱量と強度との間も、本実験結果と同様に二直線で近似できるとしている。

岡田ら<sup>21)</sup>による既往の研究では、積算温度の対数と力学的物性値の間は本実験結果と同様に二直線で近似できるとし、直線勾配は  $M = 41.7^\circ\text{C} \cdot \text{day}$  ( $1000^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$ )付近で変化するとしている。ところが、本実験では  $M = 210^\circ\text{C} \cdot \text{day}$  ( $5040^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$ ) すなわち標準養生で 7 日に相当する積算温度で直線勾配が変化する結果が得られた。岡村ら<sup>22)</sup>は、標準養生あるいは促進養生の 1, 3, 7, 28 日強度より、これらの二直線を求めて強度を推定する方法を提案している。本研究の結果である  $M = 210^\circ\text{C} \cdot \text{day}$  で直線勾配が変化すると仮定すれば、積算温度で  $M = 210^\circ\text{C} \cdot \text{day}$  (標準養生では 7 日) とその前後の各一点のデータから、すべての材齢に対して力学的物性値の推定が可能となると考えられる。

#### (5) 打込み温度による断熱温度上昇過程における強度発現性の比較

本実験では、打込み温度が断熱温度上昇過程におけるコンクリートの強度発現性に与える影響を正確に把握する目的でコンクリートの打設ごとに標準水中養生28日の圧縮強度（以下、標準強度と称す）で品質管理を行った。図-7にこの標準強度で圧縮強度を除した圧縮強度百分率と打込み温度の関係を示す。普通セメントでは打込み温度が低い方が断熱養生で発現する強度が大きいことがわかる。これは断熱温度上昇量が同じでも打込み温度が高いと、コンクリートが受ける温度履歴が大きくなるためと考えられる。換言すると、打設温度が低くないと断熱状態ではコンクリートの設計強度が保証できないといえる。一方、低熱セメントでは28日強度の発現は早いが、91日強度では普通セメントと同様打込み温度が高くなると強度百分率が小さくなる。しかし、その低下割合は普通セメントに比べて小さい。

また、実験では標準強度を圧縮強度だけで評価したが、本文 3 (3) に示したように圧縮強度は温度履歴によらず、割裂引張強度・弾性係数と相関関係が

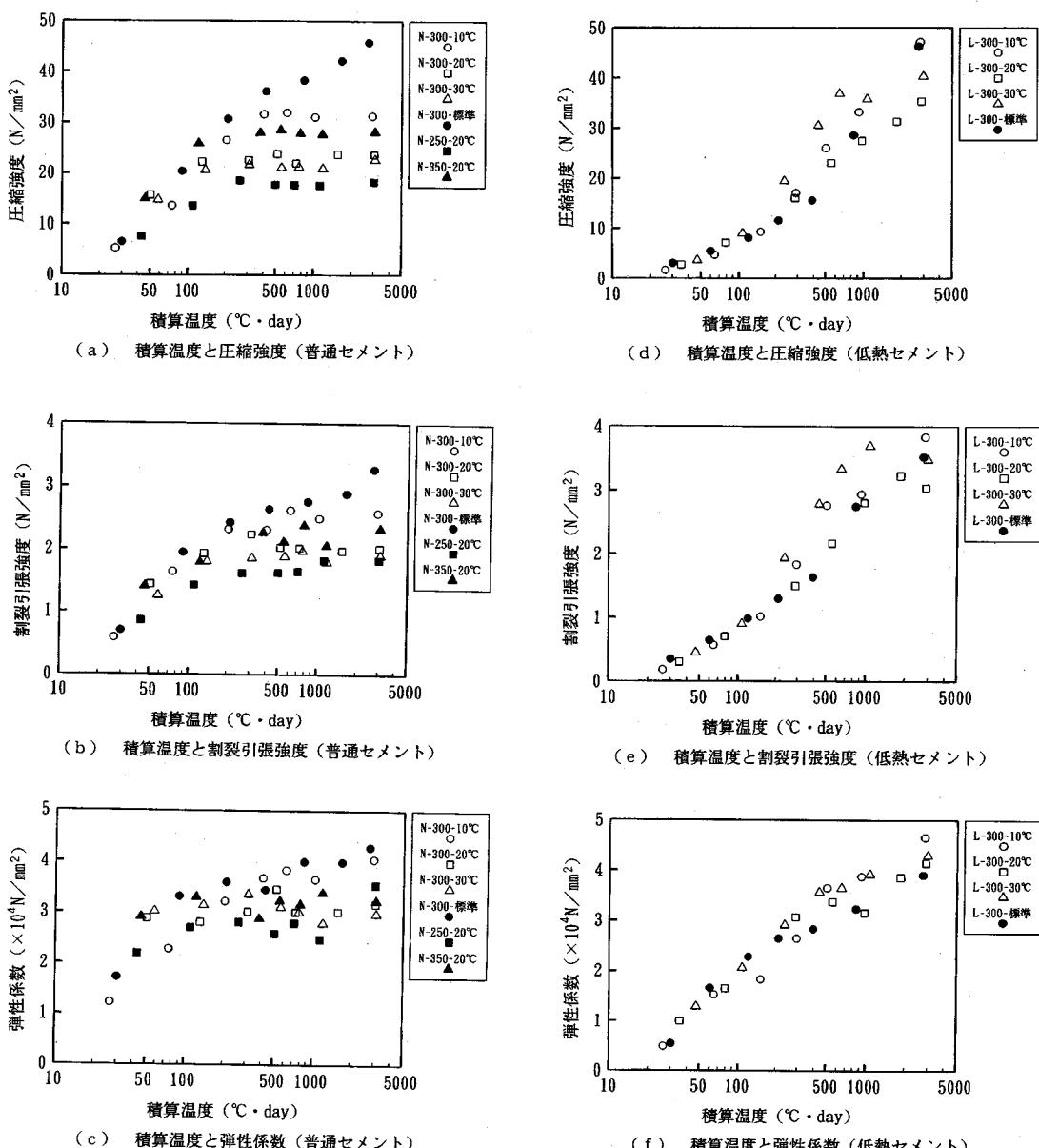


図-6 積算温度と力学的物性値

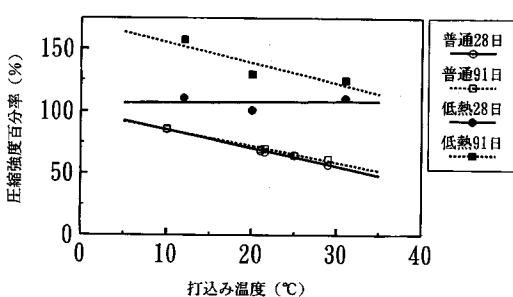


図-7 打込み温度と圧縮強度

ある。したがって、図-7に示す打込み温度と強度発現性の相関性は割裂引張強度・弾性係数にも適用できると推察される。

#### 4. 力学的物性値発現性の推定に関する検討

これまでに断熱養生における力学的物性値の発現性はその温度履歴により異なり、積算温度による方法を用いても一意的に推定することは難しいことを示した。そこで本研究では本文3(2)で示したよう

表-3 変数の対応と近似式

断熱温度上昇曲線		力学的物性値の発現性	
材齢	$t$	材齢	$t$
温度上昇量	$Q(t)$	力学物性値	$\sigma(t)$
打込み温度	$T_0$	物性値の初期値	(=0)
終局断熱温度上昇量	$Q_\infty$	終局物性値	$\sigma_\infty$
近似定数	$\gamma, S$	近似定数	$\alpha, \beta$
近似式		近似式	
$Q(t) = Q_\infty(1 - e^{-\gamma t})$	(1)	$\sigma(t) = \sigma_\infty(1 - e^{-\alpha t})$	(1)'
$Q(t) = Q_\infty(1 - e^{-\gamma t^S})$	(2)	$\sigma(t) = \sigma_\infty(1 - e^{-\alpha t^\beta})$	(2)'
$Q(t) = Q_\infty(1 - (1 + \gamma t)e^{-\gamma t})$	(3)	$\sigma(t) = \sigma_\infty(1 - (1 + \alpha t)e^{-\alpha t})$	(3)'

式(1)', (2)', (3)'の終局物性値 $\sigma_\infty$ と近似定数 $\alpha, \beta$ が求まれば力学的物性値の発現性を推定できる。

$\sigma_\infty$ の算出

$\alpha, \beta$ の算出

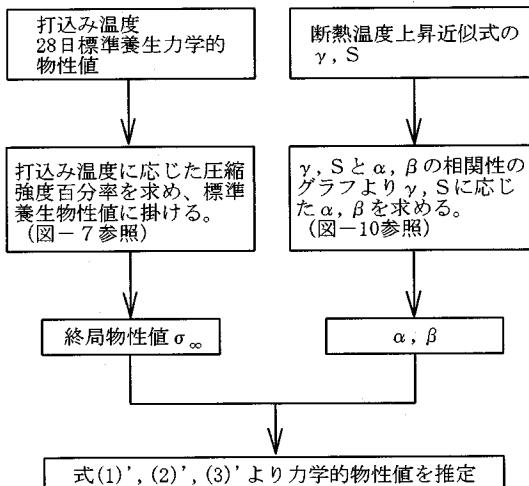


図-8 力学的物性値発現性の推定フローチャート

に図-3の断熱温度上昇曲線と図-4の力学的物性値の発現性のグラフの相似性に着目し、断熱温度上昇曲線よりその断熱温度上昇過程における力学的物性値の発現性を推定する方法について検討した。セメントの発熱はその水和反応に起因するものであり、反応の進行は、すなわちセメントの凝結・硬化が進み、強度が増進することと比例関係にあることを根拠とする。推定方法は断熱温度上昇曲線の3つの近似式を用いて、変数の対応と近似式を表-3の様に

考え、力学的物性値の推定を行った。式(1)', (2)', (3)'における終局物性値 $\sigma_\infty$ と近似定数 $\alpha, \beta$ が求まれば力学的物性値の発現性を推定できる。推定方法のフローチャートを図-8に示す。

図-9に単位セメント量が300kg/m<sup>3</sup>で打込み温度が20℃の場合の普通セメント、低熱セメントの圧縮強度の実測結果と推定結果との適合性を示す。各式ともに材齢と強度の関係をよく近似していることがわかる。図-10に断熱温度上昇曲線の近似定数 $\gamma, S$ と力学的物性値発現性の近似定数 $\alpha, \beta$ の関係を示す。それぞれの近似定数は単位セメント量や打込み温度が変わっても良い相関を示しており、セメントの種類ごとにこれらの関係がわかっていれば、断熱温度上昇曲線の近似定数 $\gamma, S$ より、力学的物性値発現性の近似定数 $\alpha, \beta$ が推定可能である。割裂引張強度・弾性係数における相関は、圧縮強度での相関と比較して、式(2)における近似定数 $\gamma - \alpha, S - \beta$ の対応が悪い。図-4に示すように割裂引張強度・弾性係数では、材齢の経過に対して力学的物性値が低下している、すなわち試験データのばらつきが大きい。このため、式(2)における実験定数 $\gamma - \alpha, S - \beta$ の近似がうまくいかないものがあったためと考えられる。

一方、終局断熱温度上昇量 $Q_\infty$ に対応する長期材齢における力学的物性値（以下、終局物性値と略す）は、図-7に示した打込み温度と圧縮強度百分率との関係より、標準強度が既知であれば標準強度に打込み温度に応じた圧縮強度百分率を掛けることにより求めることができる。

以上に示したように、断熱温度上昇曲線、打込み温度および標準強度が既知であれば、本研究で得られた各実験定数の相関関係より、断熱温度上昇過程における力学的物性値の発現性が推定できるものと考えられる。ただし、本研究は断熱状態を一定期間

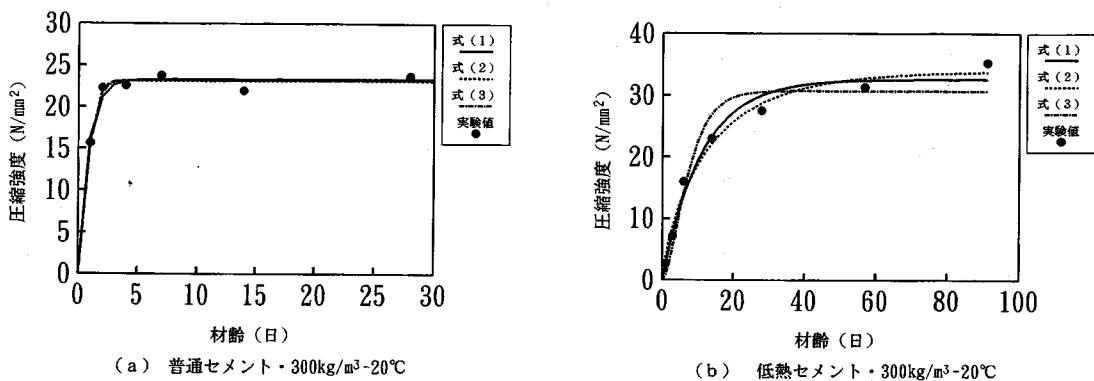


図-9 近似式の適合性

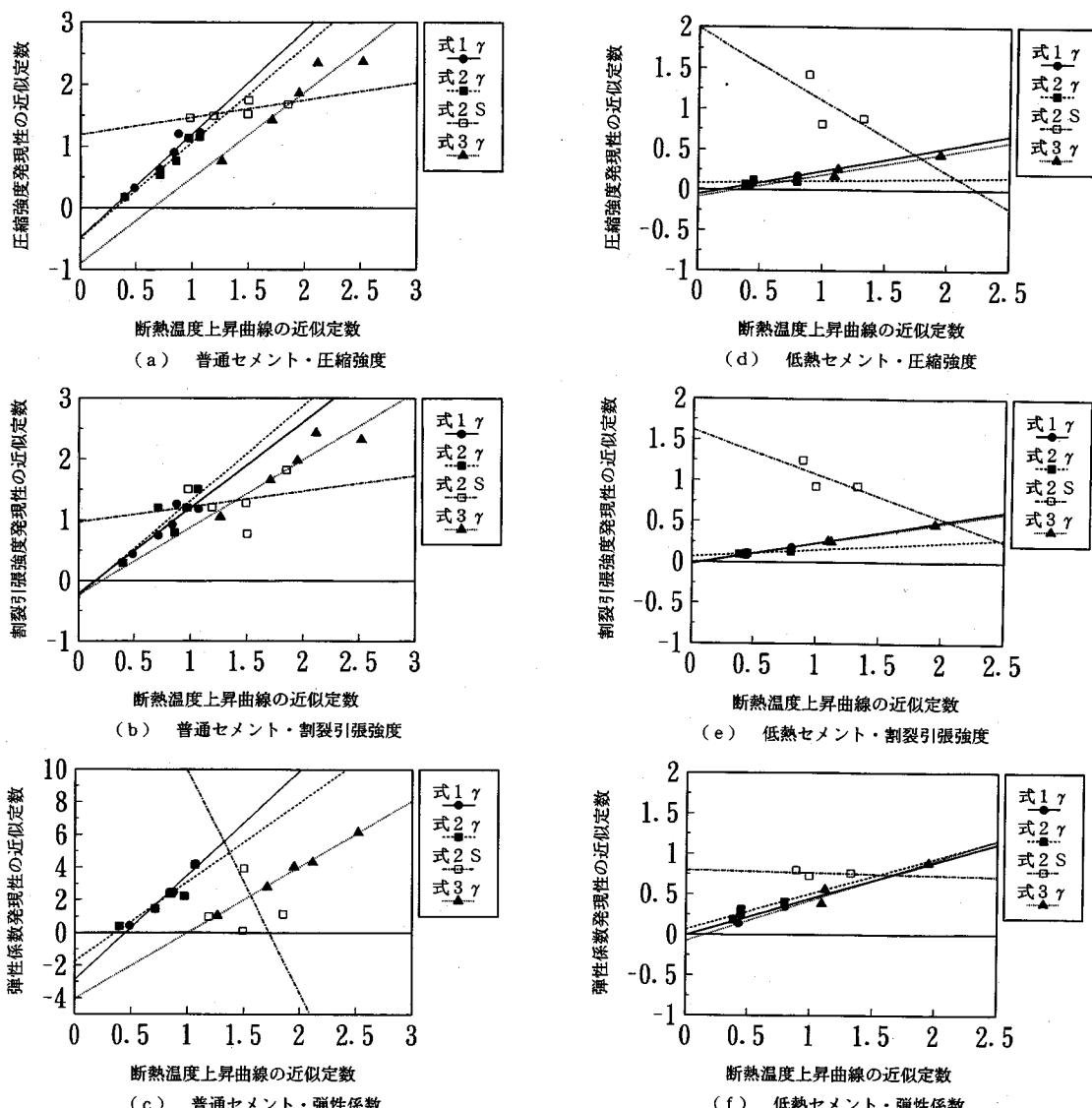


図-10 近似定数の相関性

保持した場合のモデル的な基礎実験である。実際の構造物においては放熱等の影響により、断熱状態は厳密には長期間保持しないので、コンクリートが受ける高温履歴は短くなるはずである。したがって、この温度降下の力学的物性値発現性、特に終局物性値へ及ぼす影響は今後検討する必要がある。また、マスコンクリートの任意の部位における終局物性値は、打込み温度と同様にして、最高到達温度（温度上昇量+打設温度）の関数で推定できるものと考えられる。

セメントの水和発熱に起因するマスコンクリートの任意の部位における（断熱）温度上昇曲線が温度解析あるいは実測により与えられれば、その部位における力学的物性値の発現性が上記の方法により推定できる。

## 5. 結論

本研究では、断熱温度上昇過程におけるマスコンクリートの力学的性質の発現性を明らかにする目的で、基礎的実験を行った。本研究で得られた結果を整理すると以下のようにまとめられる。

- (1) 断熱温度上昇過程で養生されたコンクリートの強度の発現性は、断熱温度上昇特性と相関性が見られた。また、従来の研究と同様に、断熱温度上昇過程で養生された普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートは初期の力学的物性値の発現が早く、長期にわたっての強度増進は見られなかった。これに対し低発熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは長期にわたっての強度増進が見られた。
- (2) 圧縮強度と割裂引張強度、圧縮強度と弾性係数の相関性は、断熱養生においても従来の相関性と大差はない。ただし、圧縮強度と割裂引張強度の関係は従来のべき乗式とは異なり直線式に近い。したがって、圧縮強度から割裂引張強度を推定する際に従来の関係式を用いると、若材齢において引張強度を大きく見積ることになる。
- (3) 積算温度を用いる方法により、温度履歴の異なるコンクリートの力学的物性値を一意的に推定することは困難である。積算温度と力学的物性値の関係は、養生条件ごとに近似的に二直線で表すことができ、普通ポルトランドセメントでは上に凸となり、低発熱ポルトランドセメントでは長期強度の発現性に優れるため下に凸な二直線となる。
- (4) 断熱温度上昇曲線を回帰した近似定数とその断熱養生下における強度発現性を回帰した近似定数には相関性がみられる。また、断熱温度上昇過程における終局物性値はコンクリートの打込み温度と関係

がある。したがって、断熱温度上昇曲線の近似定数と打込み温度により、その断熱温度上昇過程におけるコンクリートの力学的物性値を推定できる。

**謝辞：**本研究を遂行するにあたり、コンクリート標準示方書改訂小委員会のマスコンクリート部会（國府主査、小野幹事）の皆様から貴重な意見を頂きました。また、本研究の実験を実施するにあたっては、谷直彦氏（現山口大学大学院）をはじめとする山口大学工学部社会建設工学科施設材料学研究室の卒論生各位に多大の協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) S. G. Bergstrom: Curing Temperature, Age and Strength of Concrete, *Mag. of Conc. Res.*, 4-14, 1953.12.
- 2) S. Mindes and J.F. Young: *Concrete* (Prentice-Hall, 1981), pp.389-393.
- 3) 小野 定：各種断熱温度上昇試験方法比較、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 7-10, 1982. 10.
- 4) 鈴木康範, 原田修輔, 前川宏一, 辻 幸和：コンクリートの断熱温度上昇試験装置に関する性能試験について、土木学会論文集, 第402号/V-10, pp. 81-86, 1989. 2.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書施工編, 1991.
- 6) 佐藤純夫, 川田忠芳：ポルトランドセメントの水和熱およびモルタル強度などを計算する新しい公式の提案、セメント・コンクリート, No. 166, pp. 42-46, 1960. 12.
- 7) 平賀友晃, 倉林 清：コンクリートの断熱温度上昇特性に関する既往の研究成果について、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 1-6, 1982. 8.
- 8) 青木 茂, 三浦律彦, 竹田宣典, 十河茂幸：ビーライト高含有セメントを用いた高強度コンクリートの高温履歴下での強度発現性状、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 1317-1322, 1994.
- 9) 加藤和巳, 松崎 茂, 沢木省一郎：断熱温度上昇過程におけるセメントの強度発現性、第45回セメント技術大会講演集, pp. 122-127, 1991.
- 10) 玄 哲, 友澤史紀, 野口貴文：断熱温度上昇におけるコンクリートの強度・弾性係数発現に関する研究、第48回セメント技術大会講演集, pp. 492-497, 1994.
- 11) 高 範勲, 近藤吾郎, 森田司郎：水和熱による初期高温履歴を考慮したコンクリートの強度発現則に関する研究、第46回セメント技術大会講演集, pp. 872-877, 1992.
- 12) 土木研究所資料：マスコンクリートの配合条件が強度および発熱特性に及ぼす影響、建設省土木研究所地質化部コンクリート研究室, 1993. 2.
- 13) 曽根徳明, 藤山 修, 谷村 充：断熱上昇温度養生下におけるコンクリートの強度発現に関する検討、第46回セメント技術大会講演集, pp. 914-919, 1992.
- 14) 堀口浩司, 長曾我部徹, 大塚昭男, 鈴木康範：各種セメントを用いたコンクリートの高温養生強度、第

- 47回セメント技術大会講演集, pp. 808-813, 1993.
- 15) 堀口浩司ほか: 水中不分離性コンクリートの高温養生強度について, セメントコンクリート論文集, No. 45, pp. 304-309, 1991.
- 16) 福手 勤ほか: マスコンクリートの耐久性に関する基礎的研究, 土木学会年次学術講演会概要集, No. 47, pp. 346-347, 1992.
- 17) 新開千弘ほか: 各種セメントを用いたコンクリートの養生温度と強度, セメント技術年報, No. 39, pp. 225-228, 1985.
- 18) マスコンクリートの温度応力研究委員会: マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム, (社) 日本コンクリート工学協会, pp. 1-19, 1985. 11.
- 19) 鈴木康範, 長曾我部 徹, 小田部裕一, 小野 定, 國府勝郎: 早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの発熱特性, 第48回セメント技術大会講演集, pp. 826-831, 1994.
- 20) Toshiharu KISHI,Kazumasa OZAWA,Koichi MAEKAWA: Multi-Component Model for Hydration Heat of Concrete Based on Cement Mineral Compounds, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp. 1211-1216, 1993.
- 21) 岡田 清, 小林和夫, 宮川豊章, 村本吉弘: マスコンクリートの基本的特性に関する一考察, セメント技術年報 34., pp. 230-233, 1980.
- 22) 岡村 甫, 前川宏一, 小沢一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, pp. 133-166, 1993.

(1995. 5. 19 受付)

## STUDIES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF MASS CONCRETE DURING ADIABATIC TEMPERATURE RISE

Osamu ASAKAMI, Hideaki NAKAMURA and Sumio HAMADA

The temperature rise due to cement hydration differs from locations of the mass concrete structure. The development of mechanical properties is dependent on the temperature rise condition. In this study, properties of concrete subjected to the adiabatic temperature rise condition were investigated experimentally. The super low heat cement is also used as well as normal cements. The evaluating procedure for the time dependent development of mechanical properties is also presented as the test results.