

論文 中庸熱フライッシュメントを用いたコンクリートの基礎物性

庄司芳之¹・佐原晴也²・林伊佐雄³・清水康記⁴

要旨: マスコンクリート構造物のひとつであるコンクリートダムの温度応力解析検討を行う上で得た資料とするため、中庸熱フライッシュメントを用いたダムコンクリートを対象に、その力学特性および熱特性に関する確認・検討を行った。その結果、圧縮強度と弾性係数の関係、圧縮強度と引張強度との関係、打込み温度の違いによる断熱温度上昇式における実験定数の補正係数等について温度応力解析の一助となるデータが得られた。

キーワード: ダムコンクリート、圧縮強度、引張強度、断熱温度上昇量

1. はじめに

マスコンクリートの温度応力解析で必要な物性値としては、熱解析に用いる断熱温度上昇量、熱伝導率、比熱などの熱特性値と、応力解析に用いる強度、弾性係数、ポアソン比等の力学特性値などがある。そして、これらの物性値は解析精度を支配する要因となるため、その設定にあたっては十分に注意するとともに、できる限り実際に用いられるコンクリートにより各種試験を行って確認するほうが良いとされている。

コンクリートダムの温度応力解析を行う場合の力学特性や熱特性についても、既往の文献^{[1][2]}等を参考に定めるケースがある。しかし、最近のコンクリートダムに用いられるセメントは、主に中庸熱フライッシュメントとなりつつあり、また、ダムの合理化施工技術の向上とともに、ダムコンクリートに使用する単位結合材量も減少しつつある。さらには、設計基準強度の目標材齢の見直し等によりさらなる貧配合化を図る動きもあり、このようなコンクリートの物性値データは十分にあるとは言い難い現状と考えられる。

そこで、本報では、中庸熱フライッシュメントを用いた、粗骨材最大寸法80mmのダム

コンクリート2配合（外部コンクリートおよび内部コンクリート対象）について、各種試験を行い、温度応力解析に必要な力学特性や熱特性を検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

実験に使用した材料を表-1に、セメントおよびフライッシュの化学成分等の詳細を表-2に示す。粗骨材（最大寸法80mm）の混合割合は、G1 : G2 : G3 = 33 : 30 : 37%とした。また、セメントに対するフライッシュの置換率は質量で内割30%である。配合を表-3に示す。同表中のA配合は外部コンクリートを、B配合は内部コンクリートを対象としたものである。

表-1 使用材料

セメント	C+F : 中庸熱フライッシュメント 密度 2.78g/cm ³ 比表面積 3,140cm ² /g
細骨材	S : 花崗岩系碎砂 比重 2.60
粗骨材	G1 : 砂岩系碎石 80~40mm 比重 2.67
	G2 : 砂岩系碎石 40~20mm 比重 2.68
	G3 : 砂岩系碎石 20~5mm 比重 2.68
AE減水剤	AD : リグニンスルホン酸化合物

*1 日本国土開発株式会社 技術開発研究所 コンクリート研究室
 *2 日本国土開発株式会社 技術開発研究所 コンクリート研究室
 *3 日本国土開発株式会社 東北支店
 *4 日本国土開発株式会社 東北支店

工修（正会員）
 工博（正会員）

表-2 セメントおよびフライアッシュの化学成分および物理的性質

試験項目		試験値
中庸熟 ポルトランド セメント	化学成分(%)	酸化マグネシウム 1.3
		三酸化いおう 1.9
		強制熱量 0.8
		全アルカリ 0.57
		塩化物イオン 0.003
	物理的性質	密度 (g/cm³) 3.22
		比表面積 (cm²/g) 3,140
		凝結 始発(h:m) 2:40
		終結(h:m) 4:15
		圧縮強さ (N/mm²) 3日 19.1 7日 31.6 28日 55.6
フライアッシュ	化学成分(%)	水和熱 (J/g) 7日 268 28日 334
		二酸化けい素 58.4
		湿分 0.2
	物理的性質	強制熱量 2.1
		密度 (g/cm³) 2.11
		粉末度 45μ 残分(%) 28.6 比表面積(cm²/g) 3,160
	フロー値比(%) 99	
	活性度指数(%) 28日 83 91日 95	

表-5 フレッシュ性状の試験結果

配合	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)	単位容積質量(t/m³)
A	3.5	4.5	19.0	2.406
B	3.5	5.8	19.0	2.317

表-6 力学特性の試験結果

配合	試験項目	材齢				
		3日	7日	28日	91日	6ヶ月
A	圧縮強度(N/mm²)	7.05	10.1	19.3	29.3	34.6
	静弾性係数(×10⁴N/mm²)	2.08	2.16	3.00	3.51	3.70
	ボアソン比	0.183	0.171	0.185	0.187	0.190
	引張強度(N/mm²)	—	1.40	1.76	2.90	—
B	圧縮強度(N/mm²)	2.85	4.68	8.56	14.4	17.9
	静弾性係数(×10⁴N/mm²)	0.89	1.30	2.03	2.54	2.93
	ボアソン比	0.154	0.158	0.179	0.181	0.185
	引張強度(N/mm²)	—	0.48	0.79	1.68	—

表-3 コンクリート配合表

配合	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプの範囲(cm)	空気量の範囲(%)	水結合材比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m³)					AE 減水剤(C+F×%)	
						W	C+F	S	G1	G2		
A	80	4±1	5±1	53.3	28	112	210	576	493	450	555	0.25
B	80	4±1	5±1	75.0	33	120	160	676	464	424	523	0.25

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	試料を40mmふるいでウェットスクリーニングし、JIS A 1101によってスランプを測定した。
空気量	試料を40mmふるいでウェットスクリーニングし、JIS A 1128に準じて空気量を測定した。
単位容積質量	80mmフルサイズ試料を用いて、JIS A 1116に準じて測定した。
練上り温度	棒状アルコール温度計を用いて測定した。
圧縮強度	40mmふるいでウェットスクリーニングした試料を用いてJIS A 1132により供試体を作成した。供試体寸法はφ15cm×h30cmとし、標準水中養生とした。圧縮強度試験はJIS A 1108により行った。
引張強度	40mmふるいでウェットスクリーニングした試料を用いてJIS A 1132により供試体を作成した。供試体寸法はφ15cm×h20cmとし、標準水中養生とした。引張強度試験はJIS A 1113により行った。
静弾性係数	供試体は圧縮強度試験用供試体を併用し、JSCE-G502により測定した。
断熱温度上昇	断熱温度上昇試験器は、2層構造の空気循環式を用いた。試験は、80mmフルサイズ試料を円筒形のステンレス製容器（容量約40リットル）に打込み、内層と外層との間の温度勾配が生じないよう外層に取り付けたヒーターを制御することで断熱状態を保ちながら、コンクリート中心部の上昇温度が定常状態になるまで行った。なお、打込み温度は5、10、20、30℃とした。
熱伝導率	80~40mmの粗骨材を40mm以下に置き換える粗骨材量を一定とした試料を用いて、供試体（□15×53cmの角柱供試体）を作成した。そして、材齢91日に迅速熱伝導率計を用いて、プローブ法により熱伝導率を測定した。
熱拡散率	80~40mmの粗骨材を40mm以下に置き換える粗骨材量を一定とした試料を用いて、供試体（φ15×30cmの円柱供試体（中央部に熱電対を埋設））を作成した。そして、材齢91日に水中冷却法（GLOVER法）により試験を行い、熱拡散率を求めた。
熱膨張係数	80~40mmの粗骨材を40mm以下に置き換える粗骨材量を一定とした試料を用いて、供試体（□15×53cmの角柱供試体（中央部にひずみ計を埋設））を作成した。そして、材齢91日に供試体を温度可変水槽に入れ、水温とコンクリート内部温度が同一になり温度勾配が生じていない状態でのひずみ量を10~50℃毎に測定した。測定した温度とひずみ量の関係から熱膨張係数を算出した。

2.2 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは、容量80ℓおよび210ℓの強制2軸型ミキサを使用し、モルタル練り30秒、コンクリート練り60秒で行った。

2.3 試験項目と試験方法

試験項目および試験方法を表-4に示す。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表-5に示す。いずれの配合ともスランプ、空気量は目標値を満足した。また、単位容積質量についてはコンクリートダムの概略設計値2.3t/m³を満足した。

3.2 力学特性

力学特性の試験結果を表-6に示す。

(1) 圧縮強度

圧縮強度の発現性を図-1に示す。同図から分かるように、AおよびB配合とともに材齢91日における圧縮強度は設計基準強度以上が得られ、材齢6ヶ月では材齢91日に対し約20%程度の強度増進がみられた。なお、図にはコンクリート標準示方書¹⁾に採用されている圧縮強度発現式 $f_c(t) = t/(a+bt) \times f(91)$ の係数 a , b を求めた結果も併せて示した。

一方、温度応力解析や施工中の部材の強度推定を行う場合には、積算温度 [Σ (平均養生温度 + 10°C) × 経過時間] と圧縮強度との関係を算出する必要がある。その算出結果を図-2および表-7に示す。なお、A, B配合ともに積算温度 (M) が 360°C h 以下 (20°C 養生で 12h) の場合、圧縮強度 $f_c(t)$ を 0 と仮定した。同図表から分かるように、本報で検討した A, B 配合では積算温度と圧縮強度の関係は、A 配合では材齢 7 日を境界とした 2 つの近似式で表現でき、また、B 配合では材齢 7 日、28 日を境界とした 3 つの近似式で表現できるものと考えられる。しかしながら、中庸熱フライアッシュセメントを用いたダムコンクリートの終結時間は約 24 時間程度であることから、仮定した 12 時間よりも遅れて強度が発現する可能性があり、今後機会があれば若材齢時の強度発現性に関する確認実験を行う必要があると考えている。

(2) 引張強度

引張強度については、表-6 から分かるように、材齢 7, 28 および 91 日における圧縮強度に対する比率は 0.09~0.13 であり、これは既往の文献²⁾で言られている範囲内であった。また、温度応力解析において引張強度を近似的に求める場合、文献³⁾には 2 割程度低減した値を用いることが提案されているが、本実験結果をこの引張強度と圧縮強度との関係で整理してみると、図-3 に示したようになる。同図から分かるように、強度関係係数は文献³⁾の推奨値 0.35

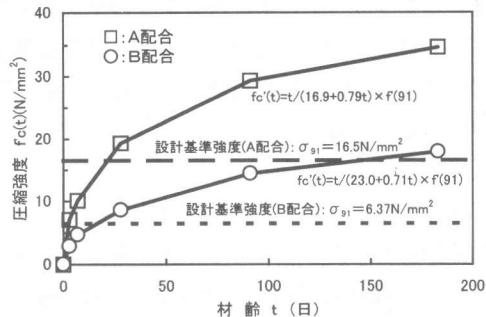


図-1 圧縮強度の発現性

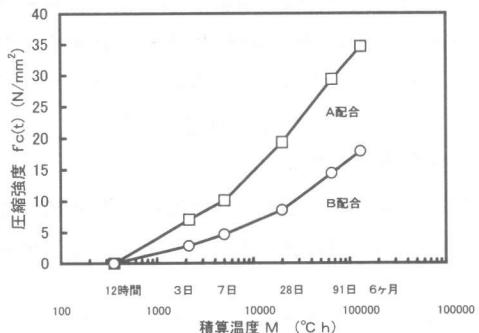


図-2 積算温度と圧縮強度の関係

表-7 積算温度による圧縮強度推定式

配合 積算温度	A配合	B配合
$M \leq 360$	$f_c(t) = 0$	
$360 < M \leq 5040$	$f_c(t) = 8.85 \log M - 22.6$	$f_c(t) = 4.02 \log M - 10.3$
$5040 < M \leq 20160$		$f_c(t) = 6.44 \log M - 19.2$
$20160 < M$	$f_c(t) = 17.5 \log M - 55.0$	$f_c(t) = 11.5 \log M - 40.5$

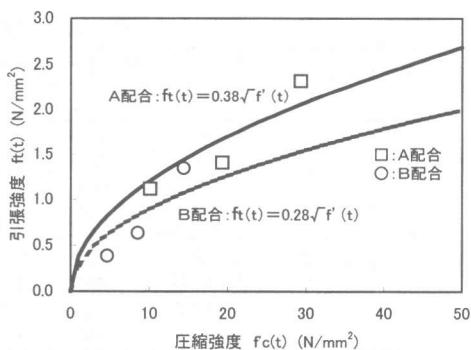


図-3 圧縮強度と引張強度との関係

より小さくなる場合がある。このことからも、ダムコンクリートのような貧配合のマスコンクリートのひび割れを検討する場合、できる限り実験にて引張強度の発現性を確認しておく必要があると言える。

(3) 静弾性係数

表-6に示したように、静弾性係数は、A、B配合とも材齢とともにその値は大きくなっています。材齢91日ではA配合が $3.51 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、B配合が $2.54 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ であった。これらの値は、文献²⁾で言われている範囲内にあった。また、圧縮強度と静弾性係数との関係（近似式 $E_e(t) = c \cdot \sqrt{f'_c(t)}$ ）を求めるに図-4のようになる。係数cの値は文献¹⁾では4700であるが、これよりも4割程度大きな値であった。

(4) ポアソン比

ポアソン比は一般に0.18～0.20程度²⁾であるといわれているが、表-6に示したようにB配合

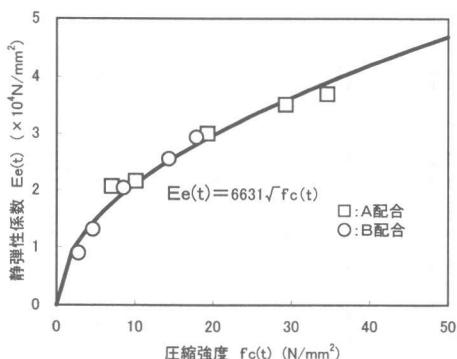


図-4 圧縮強度と静弾性係数との関係

の材齢3日および7日の値が若干小さいものの、材齢28日以降ではほぼ一般値と同程度であった。

3.3 断熱温度上昇

打込み温度5, 10, 20°Cおよび30°Cにおける断熱温度上昇試験結果を図-5（A配合）および図-6（B配合）に、現在提案されている断熱温度上昇回帰式²⁾により各実験定数を求めた結果を表-8にそれぞれ示す。

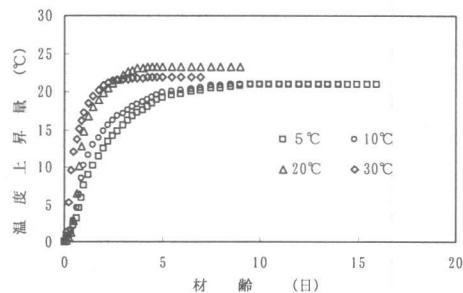


図-5 断熱温度上昇試験結果（A配合）

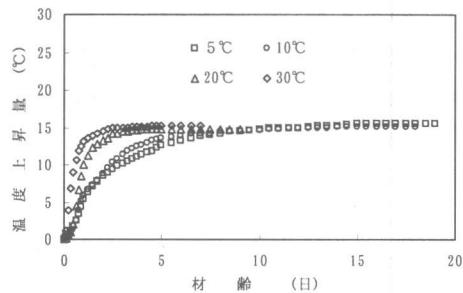


図-6 断熱温度上昇試験結果（B配合）

表-8 断熱温度上昇量回帰式

配合	打込み温度 (°C)	$T = K [1 - \exp(-\alpha t^\beta)]$				$T = K [1 - \exp(-\alpha t)]$		
		K	α	β	γ	K	α	γ
A	5	20.9	0.379	1.18	0.998	21.3	0.424	0.996
	10	20.7	0.533	1.16	0.995	21.0	0.560	0.993
	20	22.8	0.817	1.68	0.992	23.9	0.772	0.979
	30	21.7	1.605	1.15	0.997	21.9	1.483	0.996
B	5	15.4	0.368	0.96	0.997	15.3	0.348	0.997
	10	14.9	0.400	1.15	0.997	15.1	0.438	0.995
	20	14.5	0.971	1.99	0.995	15.2	0.848	0.975
	30	15.0	2.157	1.34	0.997	15.2	1.727	0.992

T : 温度上昇量 (°C), K : 実験定数 [終局断熱温度上昇量] (°C)

t : 材齢 (日), α , β : 実験定数, γ : 相関係数

(1) 終局断熱温度上昇量

表-8に示すように、終局断熱温度上昇量(以下K値とする)は、A配合(単位結合材量:210kg/m³)が20~24℃の範囲、B配合(単位結合材量:160kg/m³)が15℃前後であり、当然のことながら単位結合材量が多くなるほど高くなる結果となった。また、表-9には、既往の文献¹⁾を参考にして求めた中庸熟ボルトランドセメントのK値を示すが、本実験のK値はこれに比べて約8℃小さい値であった。既往の研究⁴⁾では、中庸熟セメントにフライアッシュを30%混合した場合の終局断熱温度上昇量は、セメント量に関係なく単味の値の82%になることが示されている。表-9にはこの関係を用いて補正した結果も示したが、本実験のK値は約3℃以上小さい値であった。

表-9 終局断熱温度上昇量の比較

配合	打込み温度	実測値	土木学会 ¹⁾	
			文献 ⁹⁾ に基づく補正值	中庸熟ボルトランド ¹⁾
A	10℃	20.7℃	29.1℃	23.9℃
	20℃	22.8℃	30.0℃	24.6℃
	30℃	21.7℃	32.1℃	26.3℃
B	10℃	14.9℃	23.6℃	19.4℃
	20℃	14.5℃	25.0℃	20.5℃
	30℃	15.0℃	22.1℃	21.8℃

(2) 打込み温度と終局断熱温度上昇量の関係

打込み温度と終局断熱温度上昇量(K値)について、打込み温度20℃の値を1.00としたときの、各打込み温度での比率を求めた結果(K値の温度補正係数)を図-7に示す。

同図から分かるように、打込み温度とK値の温度補正係数との関係は、A配合で上に凸、B配合で下に凸の曲線となった。既往の研究では、図-8に示すように、K値の温度補正係数は打込み温度が高くなると減少する結果と、図-9に示すように、セメントの種類によっては、必ずしも打込み温度が高くなつても温度補正係数が減少する傾向が認められないという結果がある。本実験では後者の傾向に近い結果が得られたと言える。このように、打込み温度とK値の

温度補正係数の関係は、使用するセメントの種類や量に大きく影響を受けると考えられる。精度の高い温度応力解析を行うためには、このような点に留意して適切な解析定数を設定する必要があると言える。

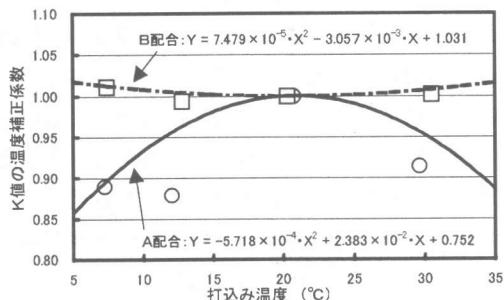


図-7 打込み温度とK値との関係

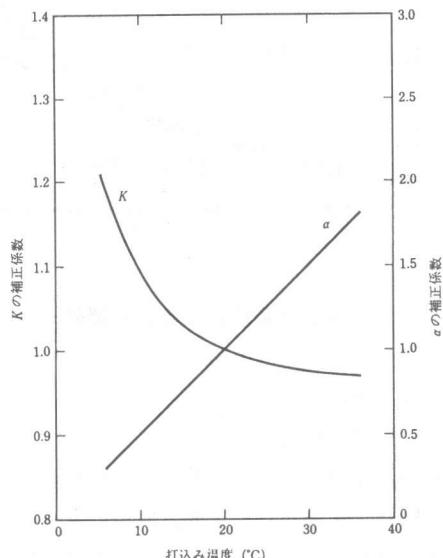


図-8 打込み温度とK値、α値との関係²⁾

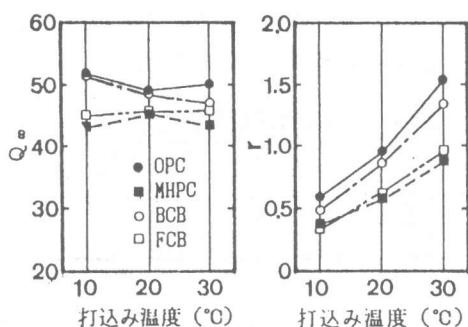


図-9 打込み温度とK値(Q∞)、α値(γ)との関係⁵⁾

(3) 打込み温度と温度上昇速度に関する定数の関係

打込み温度と温度上昇速度に関する定数 α 値について、打込み温度20°Cの値を1.00としたときの、各打込み温度での比率（ α の温度補正係数）を求めた結果を図-10に示す。

同図から分かるように、 α 値の温度補正係数は、A配合、B配合ともに打込み温度が高くなるにつれて大きくなる傾向にあった。この傾向は図-8、図-9に示した既往の研究結果と同じであったが、各打込み温度に対する補正係数の値については、高温時の補正係数が本実験結果は若干大きい傾向が得られた。

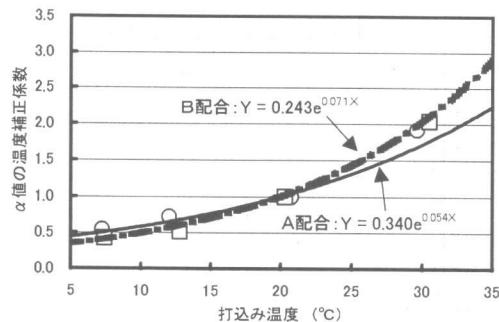


図-10 打込み温度と α 値との関係

4.4 热特性

(1) 热膨張係数

打込み温度20°Cでのコンクリートの熱膨張係数の試験結果を表-10に示す。同表に示すように、熱膨張係数はA配合、B配合ともに一般値の範囲内にあったが、若干小さめの値であった。これは、セメントの種類や量よりも、使用した骨材の品質の影響によるものと考えられる

表-10 热膨張係数試験結果

配合	実測値	土木学会 ¹⁾ 示方書	マスコン ⁶⁾ 指針	多目的ダムの建設 ²⁾
A	7.36		6.0	7.0
B	8.03	10.0	~13.0	~11.0

単位： $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

(2) 热伝導率、热拡散率

打込み温度20°Cでのコンクリートの热伝導

率、热拡散率の試験結果を表-11に示す。同表に示すように、热伝導率、热拡散率についてもマスコンクリートの一般的な値の範囲内にあると言える。また、热伝導率、热拡散率は一般にコンクリート中の骨材量が多くなるほど大きくなるとされているが、本実験の範囲ではA配合、B配合で大きな差はみられなかった。

表-11 热伝導率、热拡散率試験結果

試験項目	配合	実測値	土木学会示方書 ¹⁾	マスコン指針 ⁶⁾	多目的ダムの建設 ²⁾
热伝導率 (W/m°C)	A	2.22	2.56	1.50	1.74
	B	2.20	2.79	3.61	2.91
热拡散率 ($\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	A	0.93	0.83	0.69	0.69
	B	0.96	1.10	1.53	1.25

5.まとめ

中庸热フライアッシュセメント（フライアッシュ置換率30%）を用いたダムコンクリートについて、温度応力解析に必要な力学特性や热特性を検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) 終局断熱温度上昇量K値の温度補正係数は、打込み温度が高くなるほど減少するとは言えず、セメントの種類や使用量などの影響で傾向が異なる。

(2) 温度上昇速度に関する定数 α 値の温度補正係数は、既往の研究結果と同様に、打込み温度が高くなるほど大きくなるが、高温時の値が本実験結果は若干大きい傾向が得られた。

(3) 貧配合の内部コンクリートにおいては、圧縮強度に対する引張強度の値は、通常コンクリートよりも小さくなる場合がある。

(4) 热膨張係数、热伝導率、热拡散率は、マスコンクリートの一般値の範囲内にある。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕，1996.9
- 2) 建設省河川局監修：多目的ダムの建設－第3巻－設計II編，1987
- 3) コンクリート技術シリーズ14／最新のマスコンクリート技術，土木学会，pp15，1996.11
- 4) 徳田弘，伊藤勉：断熱養生したフライアッシュコンクリートの温度上昇および圧縮強度，セメント技術年報，Vol.16，pp321-326，1962
- 5) 佐藤利幸，鈴木康範，原田修輔，横田紀男：新試験装置による断熱温度上昇量の定量化，土木学会論文集，第396号，V-9，pp109-117，1988.3
- 6) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度ひびわれ制御対策指針，1989.3