

[1023] 酷暑条件下での温度応力を考慮した大型 PC タンク側壁の施工

正会員 ○西 尾 浩 志（安部工業所 福岡支店）

嘉手納 良啓（沖縄県 企業局）

新垣 允 啓（国建 土木設計部）

屋 良 朝 憲（大城組 土木部）

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下PC）タンクの側壁下端部付近は、コンクリート硬化時の温度変化による変形が底版により拘束されるため、円周方向に温度応力が生じ、底版に直角方向のひびわれが発生することがあった。このようなセメントの水和熱に起因する温度ひびわれに関しては、近年この予測・制御に関して研究がなされ、これらの成果が「指針」¹⁾や「示方書」²⁾に取り入れられるようになった。これらの中には、温度および温度応力を予測する際の解析に用いる定数の“めやす”も示され、実務レベルでも取扱い易くなっている。

今回、酷暑条件下（沖縄本島、夏期）において大型PCタンクを施工する機会を得た。この側壁に関して「示方書」等に基づき温度ひびわれの検討をおこない、パイプクーリング等の方法により温度ひびわれを発生させずに施工することができた。この際、コンクリートの温度やひずみ、使用コンクリートの強度・変形特性について測定実験をおこなった。これらを検討した結果、酷暑条件下におけるコンクリートの性質は「示方書」等に示される“めやす”では十分表せない場合もあり注意を必要とすることがわかったので、実際おこなったひびわれ制御方法とともに報告する。なお、本文中の“応力”は、特記なき限り円周方向応力を意味するものとする。

2. 構造物概要

構造物は、沖縄県企業局、上水道用の円筒形シェル構造大型PCタンクで、表-1に構造物の概要、図-1に一般形状および図-2に側壁部の形状を示す。また、使用したコンクリートの配合を表-2に示す。

3. 側壁1段目の検討と施工

3.1 温度ひびわれ発生の検討

(1) 施工条件 側壁1段目の施工は10月初旬ということになった。この時期の那覇市の日平均気温の平年値は約26°Cであり、一般には夏期に相当する。現実に、現場においても直射日光のもとでは35°Cになる日もあり、こ

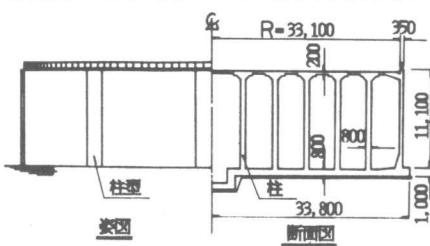


図-1 一般形状図

表-1 構造物概要

構造形式	円筒シェル形PCタンク
有効容量	$V_e = 33600 \text{ m}^3$
内 径	$D = 66.2 \text{ m}$
有効水深	$H_e = 10.0 \text{ m}$
底版部	R C スラブ 厚さ 80cm (端部 100cm) コンクリート体積 $V=3010\text{m}^3$
側壁部	PC壁 高さ $H=11.1 \text{ m}$ 厚さ 35cm (下端部65cm) コンクリート体積 $V=904\text{m}^3$
屋根部	R C フラットラーフ 厚さ20cm コンクリート体積 $V=901\text{m}^3$
柱 部	R C 柱 80x80cm(112本) コンクリート体積 $V=770\text{m}^3$
円周方向 PC鋼39錠	12T12.4(SWR7A) $N=25$ 段 $\Sigma I = 5537\text{mm}$
鉛直方向 PC鋼棒	$\phi 32$ B種 1号 $N=688$ 本 (SBPR95/110) $\Sigma I = 7905\text{mm}$

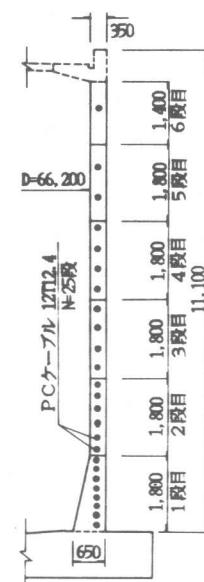


図-2 側壁形状図

表-2 使用コンクリートの配合 ($f_{ck}'=300 \text{ kgf/cm}^2$)

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラン プの範 囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材 率 S/A (%)	単位量 (kgf/m³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	6±1.5	4±1	45.0	47.7	163	362	855	964	0.905

水和熱抑制型膨張材 30 kgf/m³ (セメント置換), 流動化剤により スラブ 12±2.5 cm
混和剤: A-E 水系増塑延形

のような気象条件を前提に検討せざるを得なかった。

一般にマスコンクリートの施工にあたっては、低発熱性のセメントを用いることが多いが、沖縄では生コンプレント施設の関係で特別の場合を除いてこれを用いることができなかつた。

コンクリートの荷卸し時の温度は、骨材のプレクーリング、地下水・地下タンク（保冷目的）の使用等を徹底することによってようやく35°C以下になる状況であった。

以上のような条件から、コンクリートはベーススランプを 6cm とし（セメント量 25kg/m³ 減）、12cm に流動化し施工することとした。また、水和熱抑制型膨張材 (Calcium Sulfo Alminate系) を用いた。

(2) 温度解析 打設後のコンクリートの温度履歴を有限要素法（以下 FEM）を用いて解析・予測した。この際の解析条件を表-3 中に、要素分割を図-4 に示す。断熱温度上昇特性定数 K, α に関しては、最も近い時期に施工された柱において実測された温度履歴を、これに関する FEMによるシミュレーション結果が再現できる値を用いた。「示方書」等に示される値を用いて解析した場合と比較してこれを図-3 に示す。普通セメントを使用しているにもかかわらず、この場合、「示方書」の値（普通セメントに対する）を用いると約19°C、早強セメントに対する値を用いても約12°C 温度を低く予想してしまうことになる。解析の結果、コンクリートの最高温度は約79°Cになると予測された。（図-5）

柱コンクリートには膨張材は含まれないが、このうち1本に使用した膨張材を含むコンクリートを打設し、温度履歴の比較をおこなった。この結果、最高温度発生時間はわずかに遅れるものの、最高温度値および温度降下傾向にははつきりとした差が生じなかつた。同様の結果の報告⁵⁾もあり

表-3 解析条件

コンクリート	打設直後温度 (°C)	37.0
	断熱温度上昇特性定数 K (°C)	60.0
岩盤	昇特性定数 α	3.0
	単位体積重量 (kgf/m³)	2320
盤	比熱 (kcal/kg°C)	0.31
	熱伝導率 (kcal/mh°C)	2.50
盤	ポアソン比	0.187
	線膨張係数 ($10^{-5}/°C$)	1.0
盤	初期温度 地表 (°C)	35.0
	地下5m (°C)	15.0
盤	単位体積重量 (kgf/m³)	2600
	比熱 (kcal/kg°C)	0.25
盤	熱伝導率 (kcal/mh°C)	1.94
	弹性係数 (10^4 kgf/cm^2)	1.0
盤	ポアソン比	0.2
	線膨張係数 ($10^{-5}/°C$)	1.0
盤	型枠熱伝達率 (kcal/mh°C)	7.0
	外気温 最高 (°C)	35.0
盤	外気温 最低 (°C)	27.0

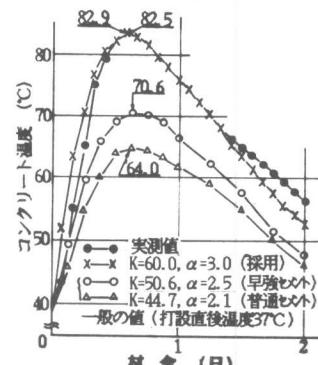


図-3 断熱温度上昇特性定数の決定

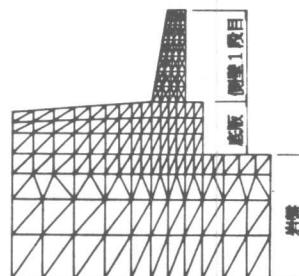


図-4 要素分割図

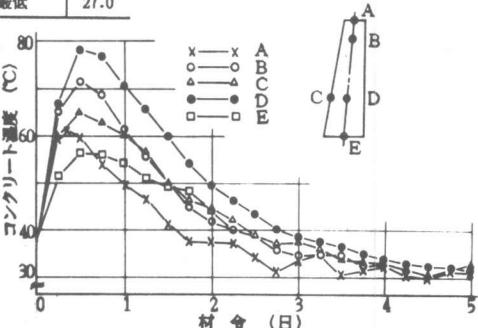


図-5 側壁1段目 予測温度履歴 (クリングなし)

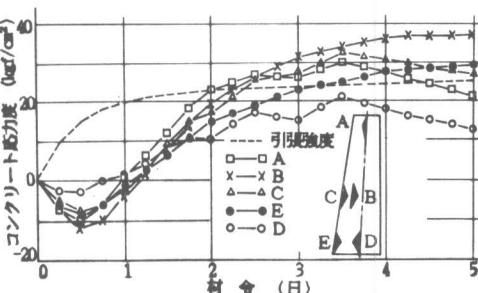


図-6 側壁1段目 予測応力度履歴 (クリングなし)

ここでは、断熱温度上昇特性に対する水和熱抑制型膨脹材の影響は無視して考えた。

(3) 温度応力解析 コンクリートが上記の温度履歴をとった場合発生する応力度を軸対称体要素を用いたFEMにより解析・予測した。(図-4, 表-3) 膨脹材の影響に関しては、これを解析で評価する方法も報告されている⁶⁾が、現場で手軽に定量的に評価できる一般的な方法はまだ確立されていないようである。

ここでは、膨脹材の影響を考慮せず温度応力解析をおこない、報告されている結果⁵⁾等を参考に解析された最大引張応力度に対して 5kgf/cm^2 の圧縮応力度を考えた。コンクリートの有効弹性係数、引張強度は有効材令を用いた「示方書」²⁾の式によった。解析・予測結果を図-6に示す。解析引張応力度の最大値は約 39 kgf/cm^2 となった。

(4) 判断 以上の結果、膨脹材の効果を考慮してもひびわれ発生の可能性が高く、対策が必要となった。

3.2 温度ひびわれ制御方法

(1) 水平方向PC鋼材用シース(Φ70mm)を利用してパイプクーリングをした場合 PCタンク側壁には図-7a)に示す位置に上記シースが配置されている。

これを用いてパイプクーリングをおこなった場合の予測温度・応力度を図-8に示す。解析においてクーリング効果はパイプ表面を定温度境界とし、予備測定で得られたクーリング水温の履歴(最高55°C, 図-8参照)を境界条件として与えることにより近似した。パイプ位置が断面の外側にかなり寄っているため壁内面とパイプとの間に高温部が残り十分な効果が得られず(解析引張応力度最大値 35kgf/cm^2)、ひびわれ発生の可能性が高いことがわかった。

(2) 採用したひびわれ制御方法 図-7b)に示すように、断面内側に3本のクーリング専用パイプを配置し、クーリングパイプの1系統が長すぎて効果が落ちることを防ぐため既存シース下6段だけクーリングする場合を検討した。クーリングをしない場合温度が最も高くなった断面中央部(約79°C)では約65°Cにまで温度を下げることができ、断面上部でもほぼ同程度の最高温度となることが予測された。発生応力度は断面の一部(上部中央)で、材令2~4日にコンクリートの引張強度をわずかに越えるものの、その他の部分はほ

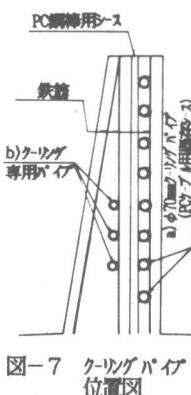


図-7 クーリングパイプ位置図

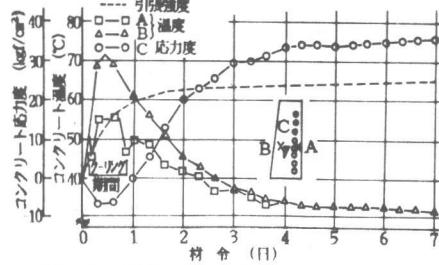


図-8 側壁1段目 予測温度・応力度履歴
(既存シースのみをクーリング)

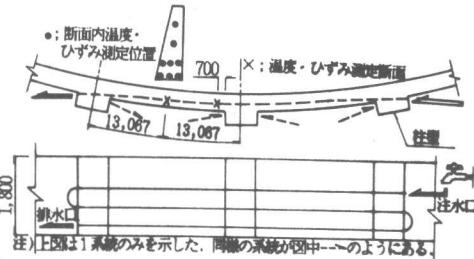


図-9 パイプクーリング系統図

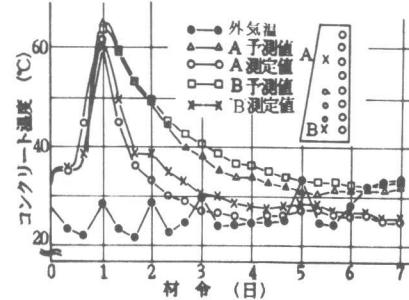


図-10 側壁1段目 予測および測定温度履歴の比較

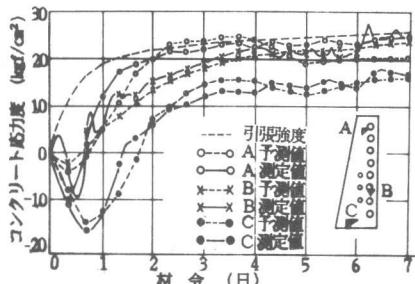


図-11 側壁1段目 予測および測定「応力度」の比較

ば引張強度以下に抑えられると予測され、膨張材による効果を考慮してこの方法を用いて施工することに決定した。具体的なクーリングの方法としては、①仮設水道蛇口をタンク周りに7ヶ所設ける、②そのうち4ヶ所からそれぞれ2分岐して8ヶ所の既存シース入り口につなぎ、それぞれの系統ごとに図-9に示すように柱型2箇区間を水平に、続いて下段に連結することにより上から下へと送水する、③残りの3ヶ所からそれぞれクーリング専用パイプに直接つなぎ送水する、という方法をとった。

3.3 施工および温度・「応力度」測定結果

前記の方法により施工した結果、温度ひびわれを発生させずに施工することができた。この際、2ヶ所の断面内にそれぞれ8ヶ所、熱電対および埋め込み型ひずみ計を埋設し温度およびひずみを測定した。(図-9参照) 図-10中に測定温度を、図-11中に測定ひずみから得られた応力度を示す。測定ひずみに対しては、埋設した無応力計および別途におこなった自由変形できる供試体による試験から得た、ひずみ計特有の零点移動量を温度補正した。コンクリートの弾性係数および引張強度は、後述する材料試験の結果より有効材令を考慮して定めている。弾性係数のクリープによる低減率は0.5としている。予測温度・応力度と測定温度・「応力度」とは比較的よく一致していたことがわかった。実際の温度下降が比較的急なのは水道水による養生等のためと思われる。

4. 側壁2~6段目の検討と施工

側壁2段目以上についても1段目とほぼ同様の検討をおこない、温度ひびわれを発生させずに施工できた。これらの結果を表-4に示す。

2段目については、6段の既存シースのみを用いてパイプクーリングをおこなった。

3段目以上は、気象条件、底版の拘束の影響等からひびわれに対して比較的有利であると思われた。しかし、コンクリートの断熱温度上昇特性や気象条件に、最も近い時期の柱施工時に得られた測定値を反映させ解析した結果、クーリングせず、膨張材、流動化剤も用いないと、ここでもひびわれ発生の可能性が高いことがわかった。(図-12) これに関連して、形状の異なる下端固定円筒形シェルに関して、壁全体を単位温度変化させたときの円周方向断面力を図-13に示す。円筒の半径と高さの比が大きくなると、

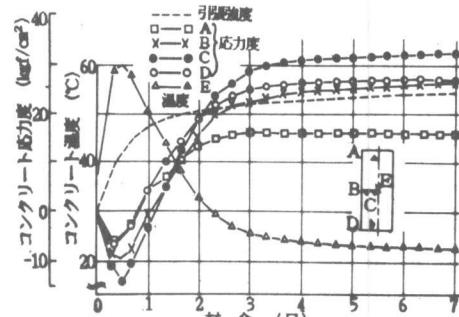


図-12 側壁3段目 予測温度・応力度履歴

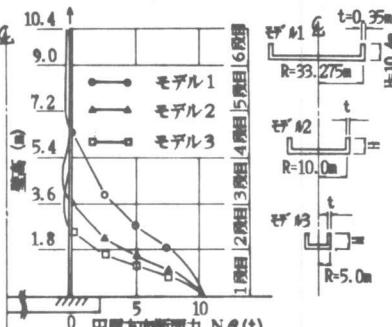


図-13 タンク形状と底版による拘束の影響範囲との関係

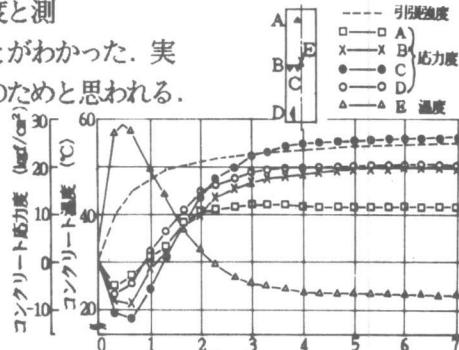


図-14 側壁4段目 予測温度・応力度履歴

表-4 側壁コンクリート施工結果まとめ

側壁段数	コンクリート打設日	生コン荷御時最高温度(℃)	打設日～1週間		コンクリート最高温度(℃)	ひびわれ制御対策		
			日平均気温	最高気温		クーリング	膨張材	流動化
1	10/05	33.0	25.4	33.7	60.3 ¹ 62.2 ²	○	○	○
2	10/19	29.0	22.4	32.0	47.8	○	○	○
3	10/31	34.0	23.1	33.0	55.2		○	○
4	11/13	28.0	21.3	24.0	47.8			○
5	11/21	28.5	22.0	29.0	45.8			○
6	12/02	21.0	18.6	21.0	32.0			○

注) ¹: 断面中央部, ²: 断面上部

下端拘束の影響がシェルの比較的高い部分にま

で及んでいる。同図中のモデル1が本構造物に相当するが、底版拘束の影響が側壁3段目まで無視できないことがわかる。以上より、3段目についても、膨張材、流動化剤を用いることにした。4段目にいたって発生応力度がようやく小さくなるが、断面中央付近では引張強度の予測値をわずかに越えている。(図-14)従って流動化剤を用いることにした。

5段目以上についても、4段目と同様の施工方法をとった。

5. 考 察

以上述べた検討および施工を通じて気づいた点、問題になった点についてまとめ、考察する。

(1) 酷暑条件下のコンクリートの強度・変形特性の特徴 沖縄産の普通セメントと「内地」産の普通セメントの両者を夏期に使用する機会を得た。これらから採取し標準養生した供試体に対し、材令1~91日に材料試験をおこなったのでその特徴を述べる。図-15に圧縮強度発現の状況を示したが、材令91日における圧縮強度を基準とした場合、一般の場合と比較して、材令5日以前は早強セメントの場合より強度発現が早く、材令14日を越えてほぼ普通セメントの場合並になっていることがわかる。材令7日における引張強度 f_t は「示方書」等においては圧縮強度 f'_c の平方根に比例するとして、 $f_t(t) = c\sqrt{f'_c(t)}$ で表されている。「示方書」等では $c=1.4$ とされているが、測定値はこれより小さく $c=1.2\sim1.3$ 程度であった。「示方書」等に従って圧縮強度から引張強度を推定する場合には注意が必要と思われる。弾性係数 E_c については「指針」等に示される $E_c(t) = 1.53 \times 10^4 \times \sqrt{f'_c(t)}$ とよく一致した。なお、ポアソン比も測定したが材令に特に関係なく、平均0.21であった。これらの特徴は、沖縄産、「内地」産どちらのセメントを使用したコンクリートにも共通だったので、これらの特徴の原因が使用セメントの違いによるものとは考えにくい。

(2) コンクリートの断熱温度上昇特性 K, α 使用 コンクリートに関して直接断熱温度上昇試験をおこなってはいないが、最暑期から最寒期までの間に同一断面をもつ柱を同一配合のコンクリート(膨張材は使用していない)で施工し温度測定をおこなったので、これをFEMによるシミュレーション結果が再現できる定数として K, α を求めた。(図-3参考)これらの結果を表-5に示す。得られた K, α を既往のデータを示すグラフ上に示したのが図-18および19である。普通セメントを用いたコンクリートであるにもかかわらず、冬期において早強セメントに対する値とほぼ同等、夏期についてはこれよりさらに大きな値を示していることがわかる。一般に使用されている K, α の値を用い、型枠熱伝達率 η を変化させて実測温度を再現することも試みたが、 $\eta=2\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 以下にしなければ最高温度を再現できず(B-1, A-1の場合)、またそうすると温度下降が実際よりずっと緩やかになった。従って、

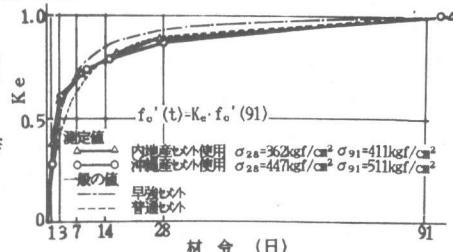


図-15 コンクリートの圧縮強度と材令との関係

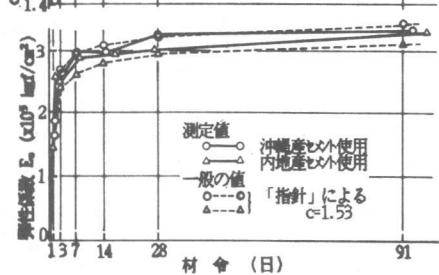
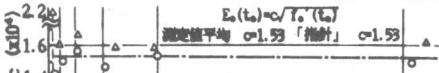


図-16 コンクリートの弾性係数と材令との関係

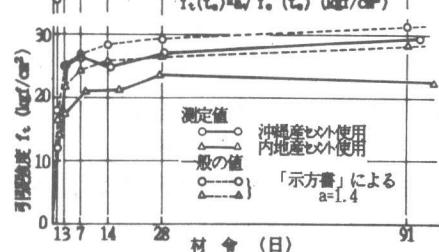
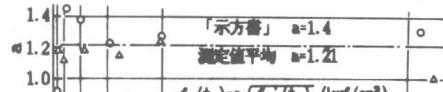


図-17 コンクリートの引張強度と材令との関係

図-3に示されるような一般のK, α を用いて解析した温度と、実測温度との違いは、型枠の放熱条件だけによるものとは考えにくい。コンクリートの断熱温度上昇に影響を与える要因にはいろいろ考えられるが、酷暑条件下では、「示方書」等の“めやす”では十分にこれを表し得ない場合もあり、注意が必要であると思われる。

(3) 温度応力解析に用いるコンクリートの有効弹性係数 E_{ce}

予測解析で得られた応力度($E_{ce}=1.5\sqrt{f_c}$ を使用)と、測定ひずみから得られた応力度(材料試験から得た $E_c=1.5\sqrt{f_c}$ にクリープによる低減を考慮: $E_{ce}=0.5E_c$)とは比較的よく一致した。従って、予測解析の際、材料試験で得られた E_c にクリープによる低減を考慮すると過少な評価をしてしまう危険があることになり、注意が必要だと思われる。

(4) 生コンプレントにおけるセメント温度 生産直後の高温のセメントが使用される可能性があり注意が必要である。図-20にプラントで測定したセメント温度履歴の例を示す。

6. まとめ

日本において最も暑い条件下で、有数の大型PCタンク側壁を、合理的な対策をとり施工した結果、温度ひびわれを制御できた。温度、応力度の予測値と「測定値」とは比較的よく一致し、条件を正しく評価すれば、ある程度の精度で予測が可能であることがわかった。「示方書」等に示される解析の際の“めやす”に関しては、過去にも指摘がある⁷⁾が、酷暑条件下においてコンクリートの特性を十分に表せない場合もあるなど、いくつかの問題点が指摘された。今後は、PCタンクに関してデータを蓄積し、気象、構造、形状および材料等の条件が定まれば、温度ひびわれ指数を簡便に、ある程度の精度で予測できるようなアプローチをおこなっていきたい。

【謝辞】 本検討・施工に関連し、貴重な御助言、御指導を賜りました東北学院大学 後藤幸正教授に心から感謝の意を表します。また、御協力を賜りました沖縄県企業局をはじめ関係各位に謝意を表します。

【参考文献】 1) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひびわれ制御指針, 1986.3 2) 土木学会: コンクリート標準示方書, 1986.10 3) 塚山隆一: マスコンクリート工事とひびわれ、コンクリートジャーナル, Vol. 11, No. 9, Sept. 1973, pp. 26-30 4) 日本コンクリート工学協会マスコンクリートの温度応力研究小委員会: マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究とその総括(その1), コンクリート工学, Vol. 21, No. 8, Aug. 1983, pp. 4-17 5) 新闇千弘, 芳賀孝成, 十河茂幸: RC壁状構造物の温度ひびわれ制御対策とその効果、コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, 1987, pp. 37-42 6) 前川宏一, 鈴木康範, 原田修輔, 辻幸和: 勵張コンクリートを用いたマスコンクリートの温度応力解析、第2回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, 1984.3, pp. 87-94 7) 佐藤利幸, 鈴木康範, 原田修輔, 横田紀男: 新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量、前掲 5), pp. 1-6

表-5 断熱温度上昇特性定数K, α の比較

柱グループ記号	コンクリート打設月日	コンクリート温度(℃)		実測値を再現できる値		一般に使用されている値			
		打設直後	最高温度	K	α	普通セメント ¹⁾		早強セメント ²⁾	
						K	α	K	α
B-1	9/02	37	82.9	60.0	3.0	44.7	2.1	50.6	2.5
A-1	9/19	34	75.0	58.0	2.8	45.3	1.9	51.1	2.3
A-2	10/16	33	66.3	51.1	2.2	45.5	1.8	51.1	2.2
C-2	2/15	22	49.2	52.2	1.5	47.7	1.2	52.2	1.5

注) ¹⁾; 「指針」¹⁾による。

²⁾; 文献³⁾による。

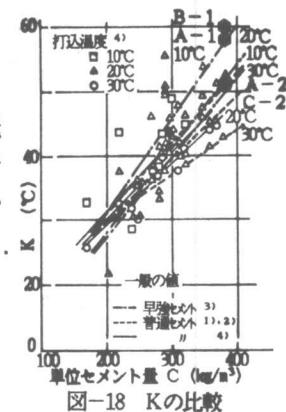


図-18 Kの比較

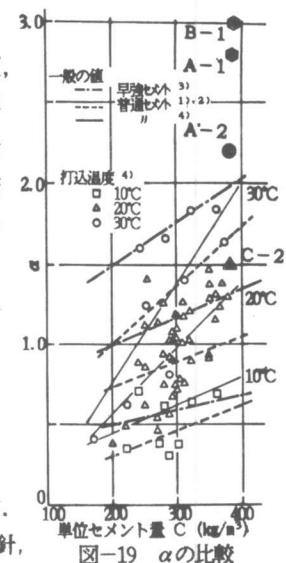


図-19 α の比較

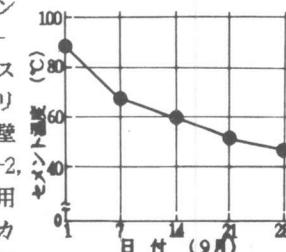


図-20 生コンプレントサイドにおけるセメントの温度