

液体窒素により冷却した細骨材を用いた プレクーリングシステムの開発

DEVELOPMENT OF PRE-COOLING SYSTEM USING FROZEN SAND WITH LIQUID NITROGEN

木村克彦*・根上義昭**・後藤貞雄***・大下研一****

By Katsuhiko KIMURA, Yoshiaki NEGAMI, Sadao GOTO and Ken-ichi OSHITA

The outline of pre-cooling system using frozen sand with liquid nitrogen (LN_2) and the results of the tests adopted in the development of the system are described first in this paper. As a result of tests, the following items are confirmed; ① There were no changes in the physical properties of frozen sand. ② The properties of the pre-cooled concrete using frozen sand were rather improved. ③ Higher cooling efficiency was attained compared to other pre-cooling methods using LN_2 . And next the study on thermal crack control measures utilizing this system and the results obtained from the actual construction of the bottom slab of an LPG in-ground storage tank are mentioned. Consequently, thermal crack in the slab was well controlled and this system was confirmed to be practical.

Keywords: pre-cooling, liquid nitrogen, mass concrete, thermal crack

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性、機能性等に影響を及ぼす要因の1つとしてひびわれがあるが、マスコンクリートの設計・施工上の検討項目の中で温度ひびわれの制御あるいは防止は、特に重要な項目であると考えられる。

マスコンクリートの温度ひびわれ制御対策に関する研究は、大きく3つに分けられる。それらは、コンクリート温度の低減に関するもの、温度応力の低減に関するもの、コンクリート自体の引張応力に対する抵抗力の増加、ひびわれ幅の分散等に関するものである。これら各種対策の中で、特にコンクリート温度の低減に関しては、多くの研究がなされており、またその成果は温度ひびわれ対策の基本として多くの工事で実施されているのが現状である。たとえば、単位セメント量の低減、低発熱型セメントの使用等の対策がある。コンクリート温度の低減

対策の中で、プレクーリングおよびポストクーリング(バイクーリング)も古くから実施されている対策であり、その効果も多くの工事で確認されている。

プレクーリングは、アメリカの工兵隊を中心にして普及した対策であり、わが国では小河内ダム建設の際本格的に実施されている。このように、プレクーリングは古くから実施されている対策であるが、1970年代の後半までは冷水、氷および冷風を使用した方法に限定されていたために、コンクリート温度低減量が小さく、温度ひびわれ制御にも限界があった。しかし、1970年代にアメリカを中心にして始まった $-196^{\circ}C$ の液体窒素(以下、 LN_2)を使用したプレクーリングの実施により、工法の適用範囲が大幅に広がったと考えられる。このアメリカ、オーストラリア等における LN_2 によるプレクーリング工法の開発は、ガスメーカー主導で行われており、また、工法としてはミキサあるいはアジテータへ直接 LN_2 を噴入する方法が代表的なものである。

本報告は、 LN_2 を使用したプレクーリング工法の1つとして著者らが新しく開発した、 LN_2 により骨材を冷却する工法¹⁾の開発内容および開発した工法の施工事例をとりまとめたものである。

* 正会員 工修 清水建設(株)土木本部技術第一部
(〒108 港区三田3-13-16 三田43森ビル)

** 正会員 清水建設(株)土木本部技術第一部
(同上)

*** 正会員 東京ガス(株)生産技術部
(〒105 港区海岸1-5-20)

**** 正会員 東京冷熱産業(株)営業技術部
(〒107 港区赤坂8-11-37 漆間興和ビル)

2. 既往のプレクーリング工法および開発した工法の位置づけ

コンクリートのプレクーリング工法は、冷却対象、手段によって図-1のように分類できる。構成材料の冷却による従来のプレクーリングでは、氷置換を除いて材料温度を大きく低減できず、その結果コンクリート温度低減量も小さいのが現状である。また氷置換についても、配合、コンクリート製造能力の点から実用上、コンクリート温度低減量は10~15°Cが限度である。また、LN₂による従来のプレクーリング工法は図-2のとおりであり、ACI 207²⁾では、練りませ水をLN₂で冷却する方法が示されている。一方、国内においてLN₂により構成材料を冷却する方法はほとんど実績がなく、実績があるのは練りませ中および後のコンクリートを対象とした工法^{3),4)}のみで、コンクリート温度低減量の実績はそれぞれ3~5°Cおよび10~15°Cであり冷却効率は40~60%程度である。これに対して今回開発した細骨材の冷却はその単位量が大きく、表面水も同時に冷却できることから冷却能力が大きく、さらに砂の粒径は小さく表面積が大きいことから短時間で熱交換でき、その冷却効率もよいと考えられる。海外においても砂をLN₂によって直接冷却する方法は実施されていないようである。このようなことから、砂を極低温に冷却することにより、効率よく大幅なプレクーリングが可能になることに着目し、図-3のフローにより砂をLN₂により冷却し、コンクリートをプレクーリングする工法を開発した。

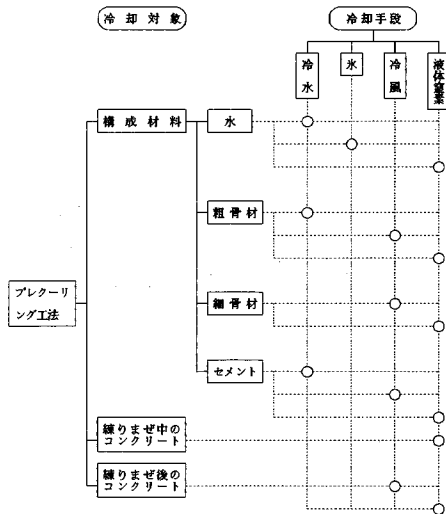


図-1 プレクーリング系統図

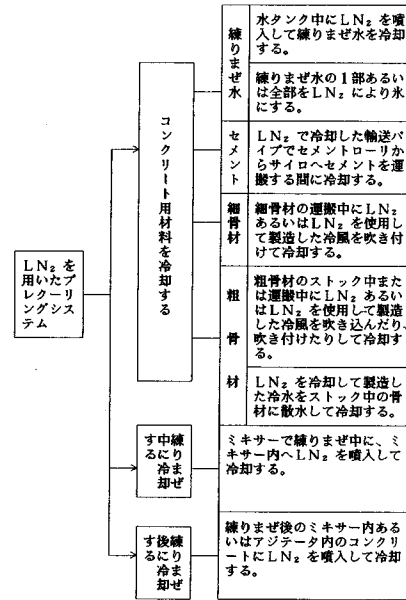


図-2 LN₂を用いた従来のプレクーリング工法

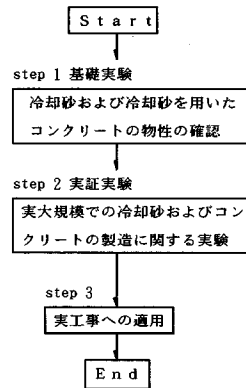


図-3 開発の流れ

3. 開発したプレクーリング工法の概要

(1) 基本原理

本工法の基本的な考え方は、図-4に示すとおりである。まず、コンクリートの主材料の一つである細骨材(または粗骨材)と-196°CのLN₂とを効率よく練りませることより細骨材粒子の表面に付着している水を凍らせ、かつ砂粒子の温度をマイナス数十度に冷却する。この細骨材を用いて従来と同様の方法でコンクリートを練りませることによりコンクリートの練り上げ温度を下げるものである。前述のように砂は表面積が大きいので砂とLN₂の熱交換が短時間で可能となるのでLN₂のもつ冷却をより効率的に砂と交換できる。

(2) 本工法で用いる装置の概要

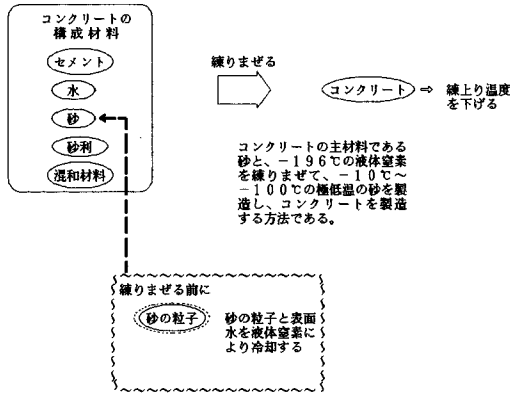


図-4 本工法の基本原理

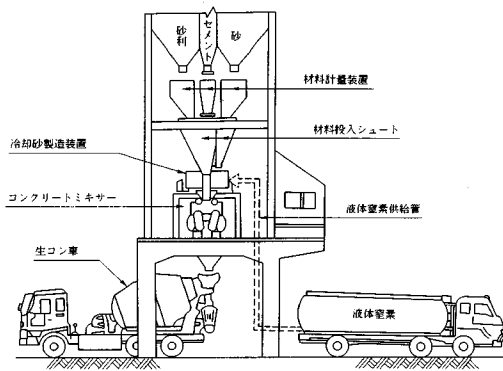


図-5 冷却砂製造装置を従来のバッチプラントに組み込んだ例

本工法を用いて冷却コンクリートを製造するための装置の概念の一例を図-5に示した。図示のように本工法を用いてプレクーリングを行うには、従来のバッチプラント設備に冷却砂製造装置を組み込むことが必要である。冷却コンクリートは、計量後の砂を同装置に投入・冷却して製造した冷却砂を他の材料とともにコンクリートミキサーに投入して製造する。冷却砂製造装置は周囲が断熱材で被覆されており、装置の容量は、対応するコンクリートミキサーの容量、コンクリート温度の低減量の最大値などから決定する。本装置へのLN₂の噴入制御は図-6に示す制御システムにより行う。冷却砂製造装置に取り付けられた数か所の噴出ノズルから所定の噴入速度（単位時間当たりの噴入量）で所定量のLN₂が噴入される。なお噴入速度の制御は圧力制御ではなく流量制御で行っている。LN₂の供給をタンクローリで行うか、タンクを設置して行うかは、1日当たりのLN₂使用量などから決定する。

(3) 実験概要および結果⁵⁾⁻⁷⁾

a) 実験概要

本開発は、図-3に示したように2つのstepに分け

表-1 使用材料

材料	種類	品質	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	比重 3.16	
骨材	細骨材(海砂)	比重 2.49、 FM 2.56-2.85	広島県瀬戸田町 高根島産
	粗骨材(砕石2010)	比重 2.72、FM 6.90	広島県府中市
	粗骨材(砕石1005)	比重 2.71、FM 6.73	荒谷町産
混和剤	AE剤	7-エチル系	

表-2 コンクリートの配合

粗骨材 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 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad.
20	8±2.5	4±1	58	47.3	198	340	770	934	0.02%

表-3 実験要因および水準

要因	水準数	水準
砂表面水率	1	自然状態での表面水率
砂温度 ¹⁾	4	常温、-10℃、-20℃、-50℃
配合	1	W/C=58%
材料投入順序	1	砂利、砂+セメント+水

¹⁾ 目標温度である

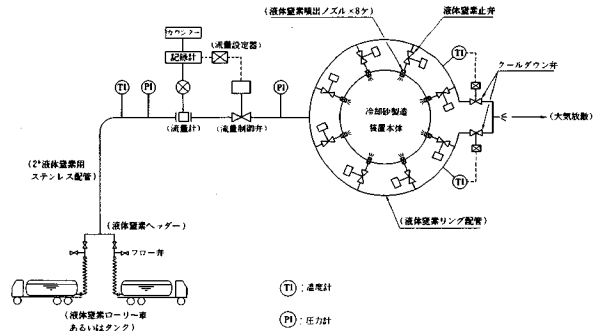


図-6 LN₂噴入制御システム

て実施した。step 1では、本工法の基礎的項目の調査・試験に主眼をおき、step 2では実機プラントでの実証を主たる目的とした。ここでは主にstep 2の実証実験結果について述べる。step 2では図-5に示すようにコンクリート製造プラントに冷却砂製造装置を組み込んで、冷却砂および冷却砂を用いた冷却コンクリートを製造し、これらの特性、冷却効率、実機運転上の事項などについて調べた。本実験に用いた材料およびコンクリートの配合は表-1および表-2に示すとおりである。空気量は、AE剤添加量を調整して冷却および常温コンクリートで同一となるようにした。試験測定項目は、砂については冷却前後における砂温度、表面水率、粒度、LN₂噴入量など、コンクリートについてはスランプ、空気量、単位容積重量、コンクリート温度、圧縮強度である。コンクリートに関する実験要因および水準は表-3に示すとおりである。コンクリートの冷却効率、表

—4に示す定数を用いて式(1)で算定した。

$$\eta_c = \frac{C_{CON} W_{CON} \Delta T}{q_{LN2} W_{LN2}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 η_c ：コンクリート冷却効率

q_{LN2} ：液体窒素 1 kg が -196°C から 10°C にガス化するときに発生する熱量

W_{LN2} ：液体窒素の噴入量 (kg/パッチ)

C_{CON} ：コンクリートの比熱

W_{CON} ：コンクリートの重量 (kg/パッチ)

ΔT ：温度低減量 ($^\circ\text{C}$)

b) 実験結果および考察

表—5に冷却砂の試験結果を示した。冷却砂の物理的性質は、step 1, step 2ともに冷却前後において変化していないことが認められる。スランプは、step 1では常温 ($T_p \approx 20^\circ\text{C}$) および冷却コンクリートともに差はなかった⁷⁾が、step 2では細骨材の全量を冷却した場合には表—6に示すように冷却に伴ってスランプが幾分増加した。空気量は、常温および冷却コンクリートでそれぞれ平均値が4.6% および4.8%と差はなかった。圧縮強度は、図—7に示すように冷却によって増加する傾向が認められた。図—8には実際の部材をモデル化した場合の温度履歴を受けたコンクリートの圧縮強度の経時変化を示した。材令初期では従来からいわれているように冷却コンクリートの方が圧縮強度は低いが、長期材令では高くなっていることがわかる。以上のように実大規模においても、本工法を用いることによってコンクリートの

表—4 計算に用いた定数

材料名	項目	単位	数値	備考
LN ₂	比熱	kcal/kg $^\circ\text{C}$	0.248	気体
	気化熱	kcal/kg	48.8	
	LN ₂ の持ついゝ熱量 q_{LN2}	kcal/kg	100 ※	($-196\sim 10^\circ\text{C}$)
水	比熱 C_w	kcal/kg $^\circ\text{C}$	1.0	水
	比熱 C_i	kcal/kg $^\circ\text{C}$	0.48	氷
	融解熱 q_i	kcal/kg	80	
セメント	比熱 C_c	kcal/kg $^\circ\text{C}$	0.2	
砂	比熱 C_s	kcal/kg $^\circ\text{C}$	0.2	表乾砂
	吸水率 γ_s	%	3.2	
砂利	比熱 C_g	kcal/kg $^\circ\text{C}$	0.2	
コンクリート	比熱 C_{con}	kcal/kg $^\circ\text{C}$	0.27	

※ $q_{LN2} = 0.248 \times (196 + 10) + 48.8 = 99.9 \text{ kcal/kg} \approx 100 \text{ kcal/kg}$

表—5 冷却砂の試験結果

項目	基礎実験			実証実験			
	n	\bar{x}	\sqrt{v}	n	\bar{x}	\sqrt{v}	
比重	冷却前	1	2.59	-	3	2.49	0.01
	冷却後	6	2.59	0.01	3	2.50	0.01
吸水率	冷却前	1	2.27	-	3	3.07	0.06
	冷却後	6	2.26	0.02	3	2.90	0.11
粗粒率	冷却前	1	2.90	-	6	2.69	0.10
	冷却後	6	2.90	0.05	6	2.77	0.09
$\Delta\gamma_m$	37	0.4	0.87	152	0.6	0.36	

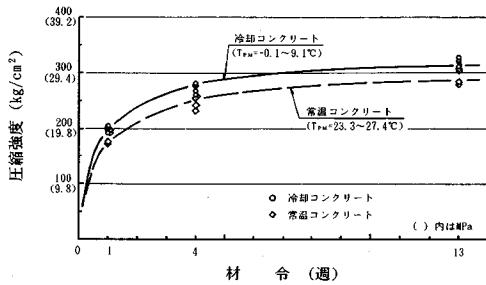
基礎実験：鬼怒川産川砂 実証実験：広島県瀬戸田町(海砂)
 $\Delta\gamma_m$ ：冷却前後の含水率の差 n：サンプル数
 \bar{x} ：平均値 \sqrt{v} ：標準偏差

表—6 スランプ測定結果

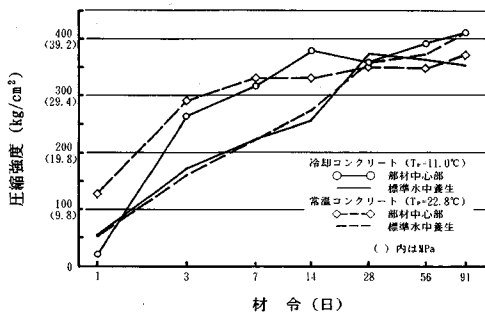
コンクリート種類	n	\bar{x} (cm)	\sqrt{v} (cm)	備考
常温コンクリート	6	8.2	2.5	
冷却コンクリート	22	13.2	1.9	冷却砂100%
	4	7.7	0.6	冷却砂50%

n：データ数 \bar{x} ：平均値 \sqrt{v} ：標準偏差

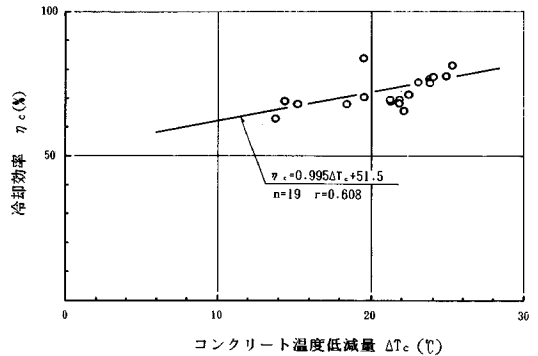
注) 冷却砂50%とは細骨材の50%を冷却したことを示す



図—7 圧縮強度の経時変化



図—8 プレクーリングが強度発現に及ぼす影響



図—9 コンクリート冷却効率と温度低減量との関係

品質を低下させることなく、コンクリートを大幅に冷却できることが実証された。

次に式(1)で求めたコンクリートの冷却効率を図9に示した。コンクリート冷却効率の平均値は約73%であり、これから1m³のコンクリートを1°C冷却するのに必要なLN₂量を求めると平均で8.4kg/m³°Cとなる。この結果は、従来のLN₂をコンクリート中に噴入する工法、たとえば文献8)のアジテータ車に噴入する工法の効率の約45%などに比べて高い冷却効率であると考えられる。

4. 施工例

(1) 工事概要

図10に示したA-LPG地下タンクでは、側壁および底版外周部を工程の関係で先に施工したため、後打ちとなる底版中央部コンクリートは、先行打設されたコンクリートに拘束され温度ひびわれ発生の可能性が大きかった。本地下タンクの概要は図10に示すとおりで、冷却対象部位は図中に斜線で示したタンク底版の中央部で半径36.2m、厚さ1.45mである。またコンクリートの打込みは、底版を半分に分割し、さらにこれを面積がほぼ同じになるように短冊状に分割し、一方からの片押し打設により行った。冷却コンクリートは、パッチャプラント船(以下、B/P船、3m³練り水平2軸コンクリートミキサ使用)で製造し、図11に示す経路でB/P船に設置したポンプで圧送しタンク近傍の2台のポンプ車に供給した。さらに、これらのポンプ車からタンク内のポンプ車まで圧送し、打設した。B/P船から地上部のポンプ車までの配管実長はそれぞれ約110m、150mである。

(2) ひびわれ制御の考え方および対策

本工事では内部拘束および外部拘束による温度ひびわれの発生確率が10%以下になるようにひびわれ制御対策を検討した。検討手順は図12に示すとおりである。

a) 検討条件

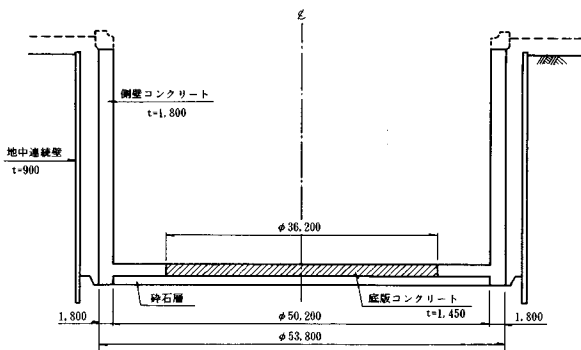


図10 底版施工時地下タンク状況図

温度解析および温度ひびわれ指数の算定に用いた定数を表7に示す。無対策時の底版部コンクリートの打込み温度 T_p は31°C、ブレーキング時は $T_p=20^\circ\text{C}$ および5°Cとした。コンクリート打込み後のコンクリート温度は図10に示す底版の一部を一次元でモデル化し、有限要素法により解析した。使用材料およびコンクリートの配合は表8および表9に示したとおりである。また、内部拘束による温度ひびわれは小野の提案する方法⁹⁾により、外部拘束による温度ひびわれは、木村・小野の提案する簡易増分法¹⁰⁾により検討した。外部拘束度 R は、式(2)で与えた¹¹⁾。

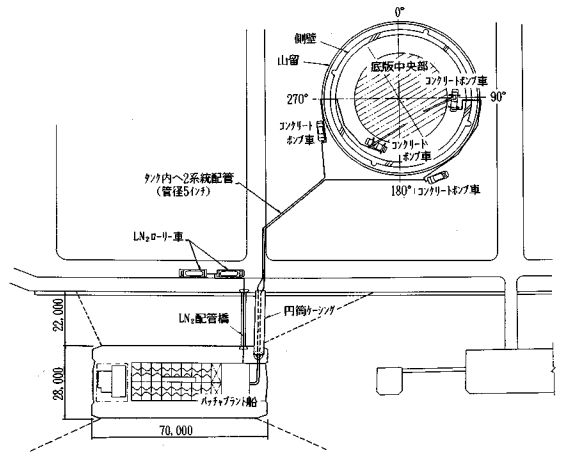


図11 配管平面図

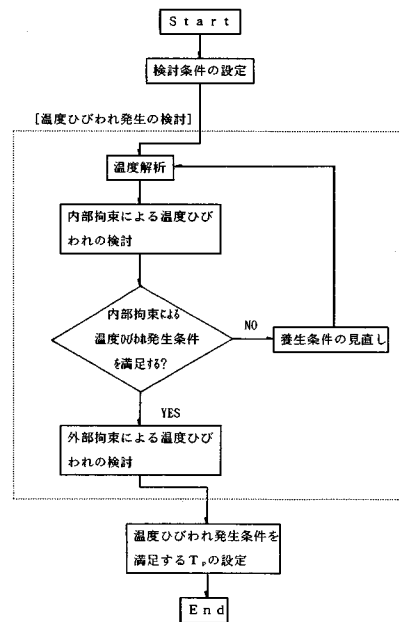


図12 温度ひびわれ制御対策検討フロー

$$R = \frac{18.1}{1.17 E_c \times 10^{-4} + 18.1} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 E_c ：底版中央部コンクリートの弾性係数 (kg/cm²)

表一七に解析に使用した条件を示す。

b) 温度ひびわれ制御対策の必要性

打込み温度 T_p を 31°C とし、表面を保温養生しない場合について温度ひびわれ発生確率を算定した結果、発生確率は内部拘束に対して 80% 以上、外部拘束に対して約 60% と予測され制御目標の 10% を大きく上回ったために何らかの対策を講じる必要性が認められた。

c) 温度ひびわれ制御対策の検討

① 内部拘束による温度ひびわれ対策の検討

打込み温度 (5°C, 20°C, 31°C) および養生方法 (熱伝達率 β を変化させる) の 2 つをパラメーターにして解析した結果、おのおのの T_p の条件下でひびわれ発生確率が 10% 以下になる β は、それぞれ 12, 5 および 3 kcal/m²h°C であった。この結果と後述する外部拘束による温度ひびわれ制御対策結果を合わせて検討した結果、 $\beta=5$ kcal/m²h°C に相当する保温養生を行うこととした。このような条件で施工した場合コンクリート温度の経時変化は図一13 に示すとおりである。

② 外部拘束による温度ひびわれ対策の検討

上記の 3 ケースについて温度ひびわれ指数を式 (3) で算定し、各ケースの温度ひびわれ指数の最小値と打込み温度との関係を図一14 に示した。

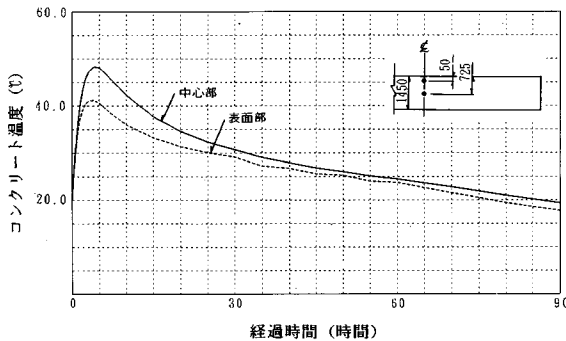
$$ET_s = \frac{f_{ct}(t)}{\sigma_c(t)} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ET_s ：外部拘束による温度ひびわれ指数

$f_{ct}(t)$ ：材令 (t) における引張強度

$\sigma_c(t)$ ：材令 (t) における最高温度以降の発生引張応力¹⁰⁾

温度ひびわれ発生確率が 10% 以下となる温度ひびわれ指数は $ET_s \geq 1.5^{10)}$ であるから、これに対応する底版中央部コンクリートの打込み温度は図一14 から 20°C 以



図一13 コンクリート温度経時変化 (打込み温度 20°C)

表一七 温度および応力解析条件

項目	数値	備考		
温度解析	熱伝達率 λ_c	2.42 kcal/mh°C		
	熱容量 ρ_c	725 kcal/m ³ °C		
	終局断熱温度上昇	5°C: 41.6 °C 20°C: 36.1 °C 31°C: 34.6 °C	冷却しない場合の打込み温度は外気温+5°C(31°C)とする。	
	温度上昇速度に関する定数	5°C: 0.235 20°C: 0.533 31°C: 1.066		
	熱伝達率 β	5°C: 12 kcal/m ² h°C 20°C: 5 kcal/m ² h°C 31°C: 3 kcal/m ² h°C		
	外気温 T_a	東京地方旬別平均気温		
	砕石	熱伝達率 λ_c	1.0 kcal/mh°C	
		熱容量 ρ_c	320 kcal/m ³ °C	
		熱伝達率 λ_c	1.52 kcal/mh°C	
	地盤	熱容量 ρ_c	780 kcal/m ³ °C	
応力解析	圧縮強度 f'_c	事前: $\frac{t}{0.0355+0.002t}$ (kg/cm ²) 事後: $\frac{t}{0.0277+0.003t}$ (kg/cm ²)	試験値による 施工実績による	
	引張強度 f_{ct}	$0.5f'_c$	(kg/cm ²)	
	弾性係数 E_c	$33000f'_c$	(kg/cm ²)	
	熱膨張率 α_c	1.0×10^{-5} /°C		
	クリープ係数 ϕ_c	コ示設計編 3.2.9 による		
			*印は打込み温度を示す	

表一八 使用材料

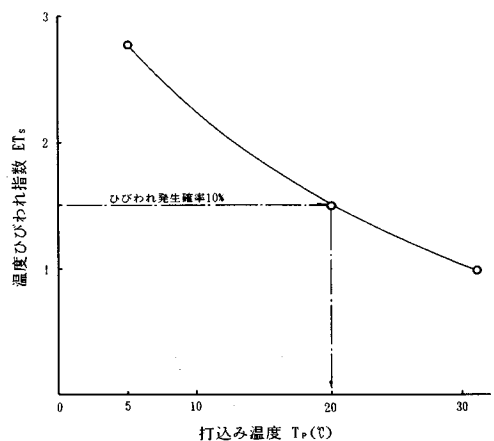
材料	種類	品質	備考
セメント	高炉セメントB種	比重 2.78	
骨材	細骨材(山砂)	比重 2.61 FM 2.69	千葉県市原産
	粗骨材(砕石2005)	比重 2.69, FM 6.60	青森県八戸市産
	粗骨材(砂利)	比重 2.65, FM 6.80	静岡県小笠原産
混和剤	AE減水剤	Lig. Ca系	

* 低発熱型、フライアッシュを20%内割混入

表一九 コンクリートの配合

粗骨材最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad.
25	12±2.5*	5±1	50	41.2	142	284	757	1108	0.71%

* 冷却によるスランブ増加を2cmとし管理目標は14±2.5とした。



図一14 打込み温度と温度ひびわれ指数との関係

下となる。

以上のことから、本工事では温度ひびわれ対策として、内部拘束によるひびわれに対しては底板表面の熱伝達率 $5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ に相当する保温材で養生し、また外部拘束によるひびわれに対してはブレーキングにより打込み温度を 20°C 以下とすることとした。なお LN_2 で冷却した冷却砂によるブレーキング方法のバックアップとして冷水および氷を使用したブレーキング方法を準備し、一部併用した。

(3) 冷却コンクリートの温度管理方法

冷却コンクリートの温度管理は、以下に示す方法により行った。まず各材料温度およびコンクリート練上り温度を T 型熱電対でリアルタイムに測定して、これにより、各材料温度とコンクリート温度の変化が管理目標値以内であることをチェックする。コンクリート温度が管理目標値を外れそうな場合には、次バッチ以降 LN_2 の噴入量を変えてコンクリート温度を管理目標値以内に制御する方法である。

(4) 冷却コンクリートの施工結果および考察

a) フレッシュコンクリート

冷却コンクリートのスランプ、空気量、コンクリート温度の圧送前後の試験結果を表—10、図—15 から図—17 に示した。コンクリートの打設は、昭和 63 年 8 月 9 日 13:00 から 8 月 10 日 12:00 にかけて行った。試験頻度は 150 m^3 に 1 回であった。B/P 船中また地上部筒先における外気温は、B/P 船中では $27\sim 30^\circ\text{C}$ 、現場では $25\sim 33^\circ\text{C}$ であった。表—10 に示すように $110\sim 150 \text{ m}$ の圧送によりスランプは平均で 2.1 cm 低下し、空気量は平均で 0.4% 減少している。この結果は通常のポンプ圧送の場合とほぼ同様である。また圧送時におけるコンクリート温度は平均で 2.1°C 程度上昇することが認められた。

b) 打込み温度

図—18 に B/P 船からの圧送直前および地上部筒先で測定した打込み温度の経時変化および外気温を示した。図示のように打込み温度は、管理目標値 (20°C) を満足している。

表—10 フレッシュコンクリートの試験結果

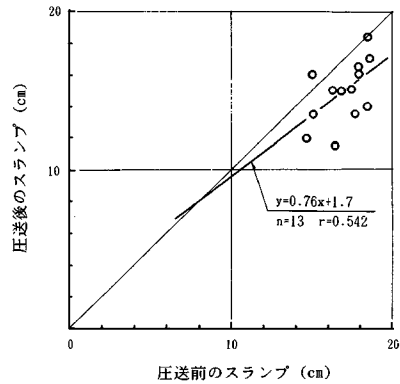
項目	n	\bar{x}	\sqrt{v}	備考	
B/P 船内	スランプ (cm)	13	17.0	1.4	
	空気量 (%)	13	5.4	0.6	
	T_c ($^\circ\text{C}$)	13	14.0	1.8	11~17
現着	スランプ (cm)	16	14.9	1.8	
	空気量 (%)	13	5.0	0.5	
	T_c ($^\circ\text{C}$)	16	16.1	1.7	14~19

T_c : コンクリート温度 備考欄はコンクリート温度の範囲である
n: データ数 \bar{x} : 平均値 \sqrt{v} : 標準偏差

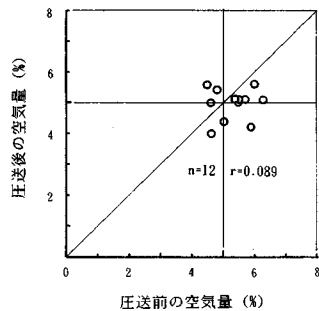
c) 冷却効率

LN_2 によるコンクリートの冷却効率 η_c と LN_2 のみによるコンクリート温度の低減量 ΔT_c との関係は、図—19 に示すとおりである。本工事におけるコンクリートの冷却効率は、約 85% であり実験結果に比べて約 10% 冷却効率が高くなった。このように、本工事の η_c が高くなった主な理由としては、本施工ではコンクリートを連続的に製造したことが考えられる。

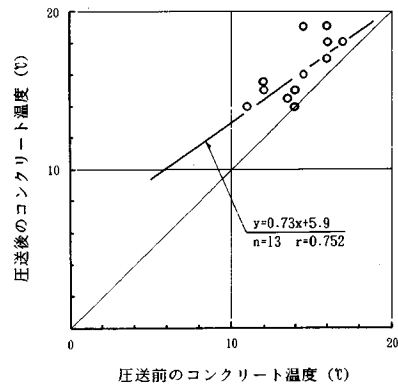
同図で、 η_c と ΔT_c との関係は、 LN_2 の噴入量により 3 つに分けられる。つまり、噴入量が $160\sim 200$ 、 $220\sim$



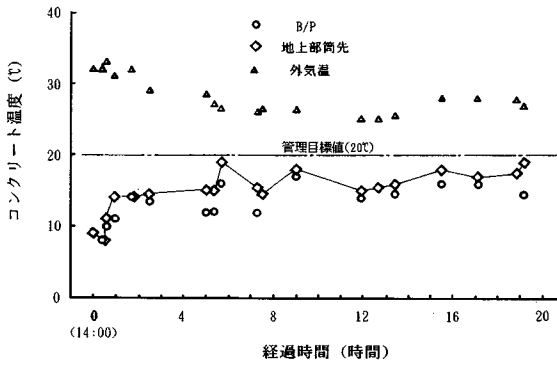
図—15 圧送前後におけるスランプの変化



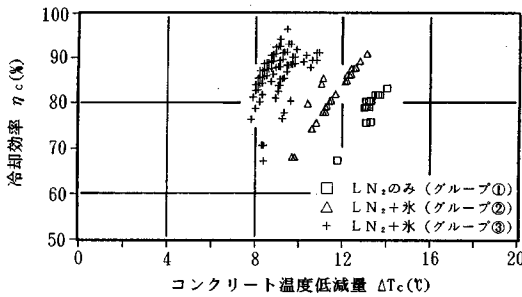
図—16 圧送前後における空気量の変化



図—17 圧送前後におけるコンクリート温度の変化



図—18 打込み温度の経時変化



図—19 冷却効率とLN₂による温度低減量との関係

250 および 280～290 kg/バッチの 3 グループである。この中で、160～200 kg/バッチおよび 220～250 kg/バッチのグループ③および②は、冷却コンクリートの製造に氷（練りませ水の 10% を水と置換した）を併用したものである。このことから、図—19 に示したデータは、氷併用の影響を補正したものになっている。補正は、 ΔT_c から氷による冷却量を差し引くことにより行っているが、この際、冷却量を重ね合わせることができかどうかを検討した。表—12 は、氷のみでプレクーリングを行ったときのコンクリート練り温度の実測値と計算値とを比較したものである。この結果から、コンクリートの練り温度が比較的良好な精度で推定できることがわかる。このようなことから、前述のように氷による冷却量と LN₂ による冷却量は重ね合わせることができると仮定した。

各グループで η_c と ΔT_c との関係を考察すると、図—9 に示した実験結果と同様に、 ΔT_c が大きくなるに従って η_c が大きくなる傾向がみられる。しかし、各グループの平均値でみると、その傾向が逆になっている。このように、同グループ内では実験結果と同様の傾向を示し、全体では逆の傾向を示した理由としては次のようなことが考えられる。実験と本工事との間で異なる主な条件としては、コンクリートのプレクーリングに実験では各バッチの細骨材の全量に冷却砂を使用しているのに

表—11 水冷却時のコンクリート温度の計算値と実測値との差

水置換率	n	\bar{x}	\sqrt{v}
35 %	15	0.2	0.4
50 %	26	0.0	0.3

n : データ数 \sqrt{v} : 標準偏差(℃)

\bar{x} : コンクリート温度の計算値と実測値との差の平均値(℃)

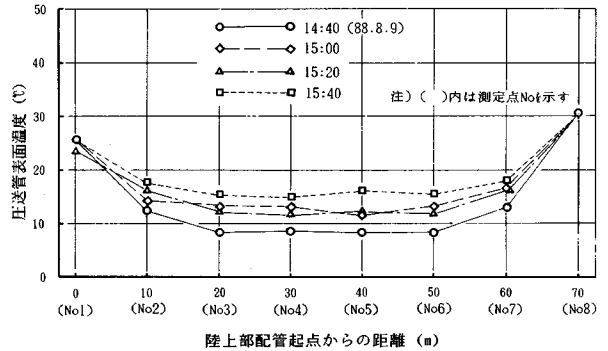
表—12 打設後コンクリート温度の実測値と解析値との比較

項目	実測値	解析値	
		事前解析	事後解析
T ₀	平均20℃	20℃	20℃
T _{max}	26.4℃	28.6℃	26.9℃
T _{max}	16.5℃	21.4℃	17.3℃
DAY _{max}	3日	4日	3日

T₀ : 打込み温度 T_{max} : 内部温度上昇量の最大値

T_{max} : 表面温度上昇量の最大値

DAY_{max} : T_{max} を示した日



図—20 陸上部配管温度の経時変化

対して、本工事では冷却砂を約 1/3 使用していることが挙げられる。さらに、コンクリートの製造を、実験では 1 m³ ミキサで断続的に行っているが、本工事では 3 m³ ミキサで連続的に行っている。このような条件の違いのために、冷却砂を部分的に使用した場合には、 ΔT_c を大きくすると冷却効率が低下することが推察される。このために、コンクリート温度の低減量が大きくなるに従ってこの傾向が出たのではないかと考えられる。しかし、このことについては、本工事の ΔT_c の範囲が小さいため、今回の工事のデータの範囲では結論を出すまでには至らなかった。

d) 冷却コンクリートの製造能力

コンクリートの製造能力は冷却砂製造時間が大きく影響する。冷却砂製造時間は、砂の投入・排出時間が一定であることから、LN₂ 噴入時間により決まる。本工事において LN₂ 噴入速度を 280～300 kg/min、LN₂ 噴入量を 160～290 kg/バッチとした場合、LN₂ 噴入時間は、40～70 秒であった。これらの結果からコンクリート製

造能力を算定すると最大 135 m³/h 程度となり、常温コンクリートの製造能力約 150 m³/h と比較して幾分製造能力が低下している。本工事における冷却コンクリート製造の実績は、最大で約 100 m³/h であった。

e) 圧送時の温度上昇

圧送管は、圧送時の外部からの入熱による温度上昇を低減するために陸上部のみグラスウールで保冷した。保冷効果を確認するためにコンクリート圧送管に沿って設置した光ファイバ分布温度計測システムを用いて圧送時の温度上昇量を測定した。管表面温度の測定結果は図-20 に示すとおりである。なお、測定点は 10 m ピッチ、測定時間間隔は 20 秒/回、図中の温度は 20 分間の平均温度である。同図から、端部は外気温の影響を受けていると考えられるので、測定点 3~6 の測定結果から温度上昇量を推定した。測定点 3~6 間の距離が約 30 m であるのでこの間の温度上昇（データ数 63 個の平均値は 0.3°C）が距離に比例するとして保冷区間（約 70 m）の温度上昇量を推定すると 0.7°C となる。品質管理試験における温度上昇量は表-10 に示したように平均で 2.1°C であるので、保冷を行っていない区間の温度上昇量は 1.4°C と推定される。これらの結果から、保冷の有、無の区間それぞれの管長 1 m 当たりの温度上昇量を求めると 0.01°C、0.02°C となり、保冷により温度上昇は約 1°C/100 m 低減できると考えられる。

f) 圧縮強度

製造した冷却コンクリートの圧縮強度試験結果は図-21 に示すとおりである。圧縮強度は呼び強度を十分クリアしているとともに、試験練り時の強度試験結果（ $f_c = 339 \text{ kg/cm}^2$ (33.3 MPa)、材令 91 日）と比較してもほとんど差がなかった。

(5) コンクリート温度および温度ひびわれ指数の経時変化

図-22 および表-13 に打設後のコンクリート温度の測定結果を示す。これらの図および表には、事前解析および事後に行った解析結果（以下、事後解析）を併記した。なお、事後解析では外気温および打込み温度に実測

値を用い、さらにコンクリートの断熱温度上昇特性を補正した。事後解析における終局断熱温度上昇量および温度上昇速度に関する定数は、それぞれ 33.7°C、0.80 とした。これらの結果から、事前に行った計算値の最高温度は、実測値と比較して約 2°C、表面温度は約 5°C 高いが、比較的良好に一致していることがわかる。表面温度の計算値と実測値の差は、解析に用いた外気温と実測値の差に起因していると考えられ、予測の難しいところでもある。

実測のコンクリート温度から求めた外部拘束による温度ひびわれ指数の実測値は図-23 に示すとおりであり、管理目標値 1.5 を十分クリアしている。温度ひびわれ指数の事前および事後解析値を比較すれば材令 10 日くらいまではその傾向は異なるが、その後はほぼ同じ傾向で推移している。しかし、実測値と事後解析値は温度の経時変化はほぼ同じであるにもかかわらず材令 15 日以降で温度ひびわれ指数が約 0.5 実測値の方が大きくなっている。これは、材令 10~15 日間でのコンクリート温度降下を実測では約 0.5°C であるのに対して事後解析では約 2°C であり、簡易増分解を用いて算定した発生応力増分がそれぞれ約 0.5 kg/cm² (0.05 MPa)、2 kg/cm² (0.20 MPa) であったことに起因していると考え

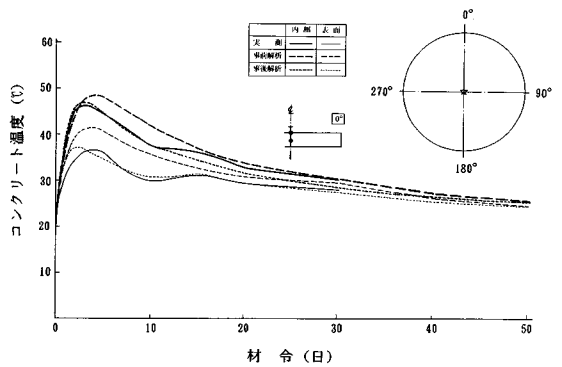


図-22 打設後のコンクリート温度の経時変化

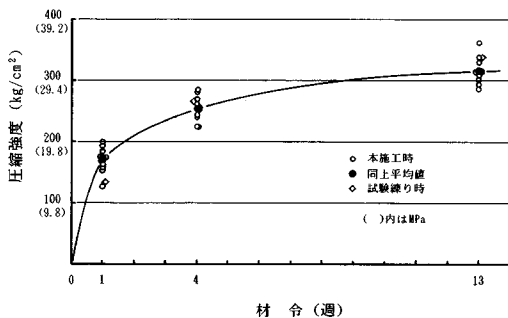


図-21 圧縮強度の経時変化

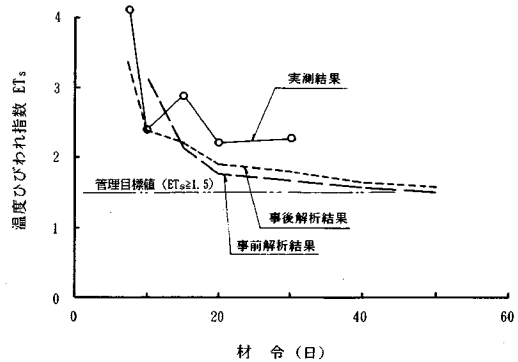


図-23 温度ひびわれ指数の経時変化

えられる。

(6) ひびわれ発生状況

材令 30 日および 60 日でのひびわれ調査結果では、ひびわれの発生は認められなかった。このことから、温度ひびわれ制御対策にプレクーリング工法を採用し、コンクリート打込み温度を 20°C 以下としたことはひびわれ制御に有効であったと考えられる。

5. ま と め

本研究は、プレクーリング工法の 1 つである細骨材を液体窒素で冷却、製造する方法を開発し、この冷却した細骨材（冷却砂）を用いてコンクリートを冷却する方法を提案したものである。さらに冷却砂および冷却砂を用いたコンクリートの諸性質および温度ひびわれ制御対策として本工法を用いた施工例について検討したものである。本研究の結果、得られた主な成果を列挙すれば次のとおりである。

(1) 細骨材の物理的性質は液体窒素で冷却しても冷却前後において差がなく、また冷却砂を用いて製造した冷却コンクリートの諸性質は冷却しないコンクリートと差がない、もしくは向上する傾向が認められた。

(2) 本工法によるコンクリートの冷却効率は、既往の液体窒素を用いた工法と比較して高く、また実用の範囲でコンクリート温度の低減能力が大きいことが認められた。

(3) A-LPG 地下タンク底版コンクリートに本工法を用いて施工した結果、温度ひびわれの発生はみられず、LN₂ により冷却した細骨材を用いたプレクーリング工法が温度ひびわれ制御対策の 1 つとして効果的であることが認められた。また本工法は、冷却コンクリートの製造・管理および施工性の面でも実用的であることが認められた。

液体窒素により冷却した細骨材を用いてコンクリートを冷却する方法を提案したが、液体窒素によるプレクーリング工法は国内ではまだ十分に普及しているとはいえない。また温度ひびわれ制御対策では、それぞれの工法

の特長を生かした組合せを検討することが必要で、この場合本工法など液体窒素によるプレクーリング工法は冷却対象コンクリート量、温度低減量などの面で検討の自由度を広げるものと考えられる。

最後に、本研究の実施にあたって東京工業大学 長瀧重義教授のご指導を頂いたことを記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小野 定・木村克彦・後藤貞雄・峯岸孝二：液体窒素で冷却した骨材を用いたプレクーリング工法の開発，セメント技術年報 42，昭和 63 年。
- 2) ACI Manual of Concrete Practice Part 1, ACI 207. 4R-80
- 3) 大澤賢修・福田信幸・森 敏昭・小野 定・江渡正満：液体窒素を用いたダムコンクリートのプレクーリング施工，コンクリート工学，Vol. 26, No. 5, May 1988.
- 4) 浅井邦茂・直井彰秀・中根 淳・芳賀孝成・佐藤哲司：液体窒素によるプレクーリング工法を用いた PC 防液堤の施工，コンクリート工学，Vol. 26, No. 5, May 1988.
- 5) 木村克彦・江渡正満・峯岸孝二：液体窒素を用いて製造した冷却砂の性質に関する研究，土木学会第 43 回年次学術講演会概要集 V，昭和 63 年 10 月。
- 6) 木村克彦・小野 定・後藤貞雄・峯岸孝二：液体窒素で冷却した砂を用いたコンクリートの製造に関する研究，第 10 回コンクリート工学年次論文報告集，1988.
- 7) 栗田守朗・桑原隆司・後藤貞雄・峯岸孝二：液体窒素で冷却した砂を用いたコンクリートの性質に関する研究，第 10 回コンクリート工学年次論文報告集，1988.
- 8) 十河茂幸・中根 淳・浅井邦茂・直井彰秀：液体窒素により冷却されたコンクリートの基礎的性質，第 8 回コンクリート工学年次論文報告集，1986.
- 9) 小野 定：マスコンクリートの温度ひびわれ制御に関する研究，北学位論文，昭和 59 年 9 月。
- 10) 木村克彦・小野 定：マスコンクリート構造物の温度ひびわれ発生の評価方法に関する研究，土木学会論文集，第 378 号/V-6，1987 年 2 月。
- 11) 木村克彦・小野 定・後藤貞雄・江渡正満：プレクーリングによるマスコンクリート温度ひびわれ制御効果の解析，土木学会構造工学論文集，Vol. 35A，1989 年 3 月。
(1988. 11. 18・受付)