

論文

[1072] 液化窒素を用いたプレクーリング工法による地下式貯槽マスコングリートの施工

正会員 ○近藤克巳 (清水建設土木本部)

峯岸孝二 (東京ガス生産技術部)

正会員 栗田守朗 (清水建設技術研究所)

平野 正 (東京冷熱産業営業技術部)

1. まえがき

コンクリート構造物の大型化および施工方法の進歩発展による大量急速施工の増加が進む一方、構造物の安全性、信頼性に対する要求が高まっている。こうした状況から、セメントの水和熱に起因するコンクリートの温度ひびわれの制御が重要な課題となっている。温度ひびわれの制御方法のひとつにコンクリート練上り温度を低減するプレクーリング工法がある。最近、このプレクーリング工法への液化窒素 (以下 LN_2 と略記) の利用が注目されており、そのひとつとして LN_2 により砂を冷却し、冷却コンクリートを製造する方法がある。本研究は冷却砂製造装置をパッチャプラント船 (以下 B/P船と略記) に積載し、製造した冷却コンクリートの製造・管理方法、冷却効率および地下式貯槽の底版コンクリートの施工結果について述べたものである。

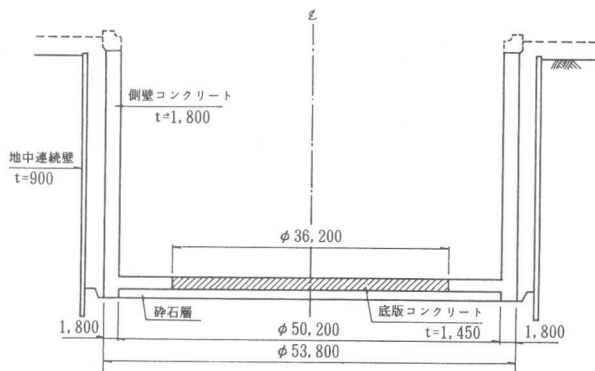


図-1 底版施工時地下式貯槽状況図

2. 工事概要

図-1に示すA-LPG地下式貯槽の底版に冷却コンクリートを打設した。コンクリート打設部位は図-1の斜線で示した貯槽中央部半径36.2m、厚さ1.45mの部分である。この貯槽では工程の理由から側壁および底版外周部を先に施工したため、後から打設する底版中央部のコンクリートは既設のコンクリートの拘束による温度ひびわれが発生する可能性が高いと判断された。そこで検討の結果、コンクリートの打込み温度を低く抑

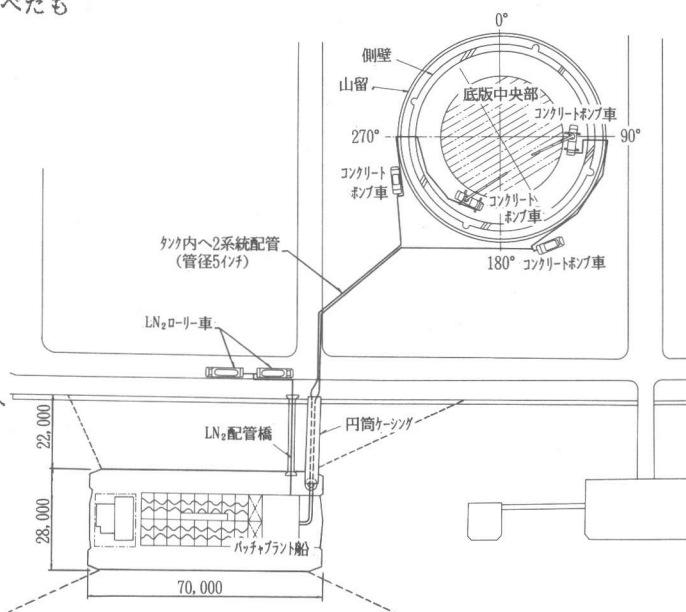


図-2 配管平面図

えることにより温度ひびわれの発生を制御するプレクーリング対策が選定され、なかでもプレクーリング能力の大きい冷却砂を用いる工法が採用された。プレクーリングの目標温度は、事前の温度ひびわれ解析結果に基づいて20℃に設定した¹⁾。なお、内部拘束による温度ひびわれを制御するために、コンクリート表面の保温養生をあわせて実施した。

冷却コンクリートに使用した材料を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。なお、冷却砂は常温砂に対して約1：2の割合で使用した。

冷却コンクリートはB/P 船で製造し、B/P 船のポンプで図-2に示す経路で貯槽周辺地上部の2台のポンプ車まで圧送した。さらに、この地上部のポンプ車から貯槽内のポンプ車へ圧送を行うことによって、冷却コンクリートを供給した。B/P 船から地上のポンプ車までの配管実長は、それぞれ約 110m, 150mであった。コンクリートの打込みは底版を半分分割し、さらにこれを短冊状に分割して、片押で打設した。なお、コンクリートの冷却はLN₂ だけではなく、練りませ水の一部を氷に置換える方法（以下氷と略記）、LN₂ と氷を併用する方法によっても行った。

3. 冷却コンクリート製造方法および製造設備

本工事で使用したプレクーリング工法による冷却コンクリートの製造方法は次のとおりである。まずコンクリートの主材料のひとつである細骨材を-196℃のLN₂ と練りませることによって、細骨材の表面水を凍らせ、かつ細骨材粒子そのものをマイナス数十℃に冷却する。この細骨材（以下冷

表-1 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 6.74	青森県八戸市産
	粗骨材(砂利)	比重 2.65、FM 6.74	静岡県小笠郡産
混和剤	AE減水剤	Lig. Ca系	

※ フライアッシュを20%内割混入

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.
25	12±2.5※	5±1	50	41.2	142	284	757	1108	0.71%

※ 冷却によるスランプ増加を2cmとし管理目標は14±2.5とした。

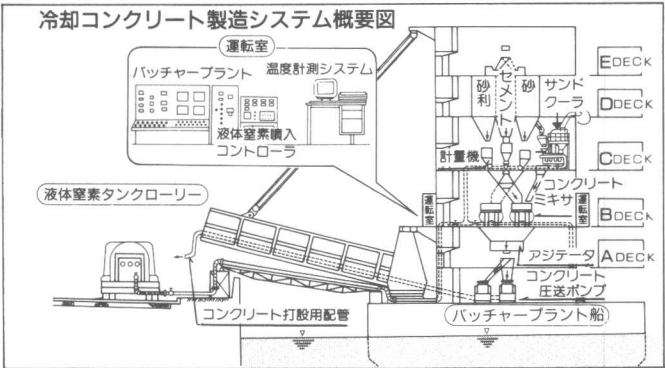


図-3 冷却コンクリート製造設備概要図

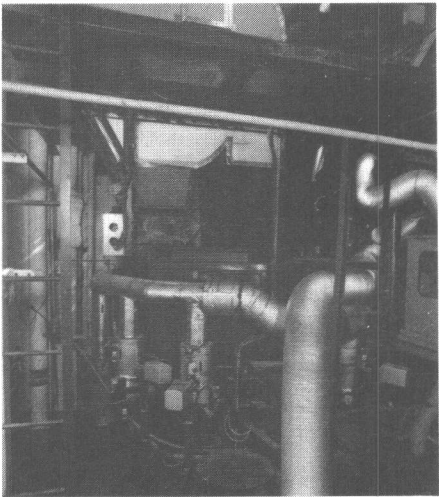


写真-1 冷却砂製造装置（サンドクーラ）

却砂と略記)を用いて、従来と同様の方法でコンクリートを製造することによって、コンクリートの練上り温度を低減する。細骨材は表面積が大きいため LN_2 との熱交換が効率よく行えること、また単位量が多いことから、従来のプレケーリング工法に比べて温度低減量、冷却効率など有利な面が多い。コンクリートの製造設備は図-3に示すとおりで、B/P 船に冷却砂を

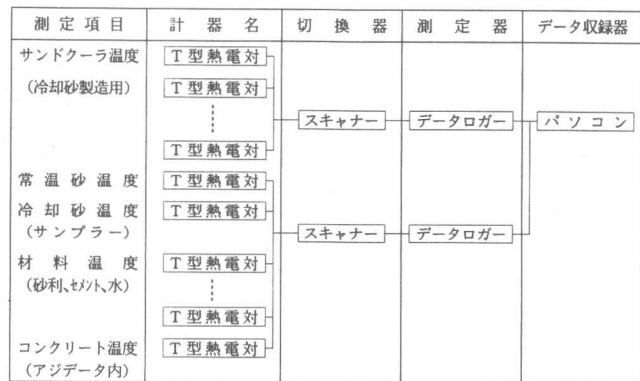


図-4 温度計測システムフロー

製造するサンドクーラ(写真-1)を組込んだものである。サンドクーラは砂と LN_2 を攪拌する装置および LN_2 を噴入し、ガス化した窒素を排気する装置から構成されており、全体を断熱材で覆い熱ロスを抑えている。 LN_2 はタンクローリから保冷された配管でサンドクーラに供給した。 LN_2 噴入量は差圧流量計により測定し、運転室に設置した LN_2 噴入コントローラで制御した。サンドクーラで製造した冷却砂は、冷却砂投入シュートを通じて直接コンクリートミキサに投入した。冷却砂投入シュートおよびコンクリートミキサにも保冷を行い熱ロスを少なくした。

冷却コンクリートの温度管理に用いた温度計測システムのフローを図-4に示す。なお、冷却砂の温度はサンドクーラ排出口に設置した自動試料採取装置(サンプラー)で、コンクリート温度はアジテータ内に設置したT型熱電対で測定した。冷却砂、コンクリート等の温度を自動計測し、運転室に設置したCRTに表示した。このシステムによってリアルタイムに各材料およびコンクリート温度が確認でき、次バッチからの LN_2 噴入量を LN_2 噴入コントローラで調節することにより、常に規定の温度が得られるように管理した。また測定した温度データは磁気ディスクに記録し、温度低減量、冷却効率等の算出に用いた。

コンクリートの品質管理は通常のプラントと同様に行った。なお、 LN_2 使用時には常時換気をするとともに、酸素濃度の確認を行い、またサンドクーラを設置したデッキを立入り禁止にして酸欠事故を防止した。

4. コンクリートの冷却効率計算方法

LN_2 によるコンクリート冷却効率は、コンクリートが LN_2 から受取った熱量と LN_2 自体が持っている熱量の比として表し、次式で算定した。

$$\eta_c = \frac{C_{\text{con}} W_{\text{con}} \Delta T}{q_{\text{LN}_2} W_{\text{LN}_2}} \quad (1)$$

ここに、

- η_c : コンクリート冷却効率
- q_{LN_2} : 液化窒素 1 kg が -196°C から 10°C にガス化する時に発生する熱量
($\approx 100 \text{ kcal/kg}$)
- W_{LN_2} : 液化窒素の噴入量 (kg/バッチ)
- C_{con} : コンクリートの比熱 ($= 0.25 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$)
- W_{con} : コンクリート重量 (kg/バッチ)
- ΔT : コンクリート温度の低減量 ($^\circ\text{C}$)

5. 施工結果および考察

5.1 コンクリート打設状況

コンクリートは昭和63年8月9日 13:00から10日 12:00にかけて打設した。総打設量は約1,500 m³であった。打設状況を写真-2に示す。

5.2 コンクリートの品質管理結果

(1) フレッシュコンクリートの品質管理結果

冷却コンクリートのスランプ、空気量、温度について、練上り時(B/P 船内)および打設現場(地上部ポンプ車筒先)における試験結果を表-3にまとめて示す。ポンプ圧送により、スランプは平均2.1 cm、空気量は平均0.4%減少している。この結果は通常のコンクリートのポンプ圧送による品質変化と同程度のものであり、プレクーリングによる影響はないと考えられる。またコンクリート温度はポンプ圧送により平均で約2.1℃上昇している。コンクリート温度の管理結果を図-5に示す。練上り温度の管理によって、打設現場での管理目標温度20℃は常に満足されている。なお、コンクリート打設中の外気温はB/P 船内で27~30℃、打設現場で25~33℃であった。

(2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験の結果を表-4に示す。圧縮強度は呼び強度270kgf/cm²を上回っており、十分に規格を満足していた。

5.3 LN₂ によるコンクリート冷却効率

本工事で得られたLN₂ によるコンクリートの冷却効率を表-5および図-6に示した。冷却効率はおおむね次の3つのグループに分けて考えることができる。

- ① LN₂ のみで冷却した場合
- ② 練りませ水の10%を氷に置換えて、LN₂ と併用し

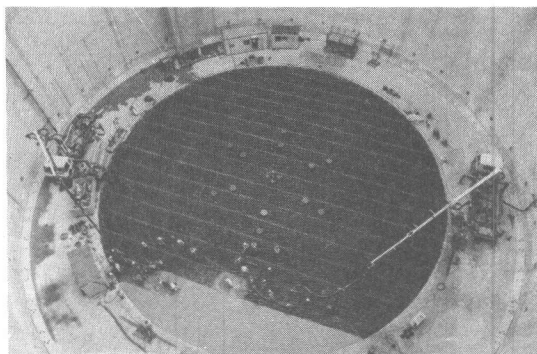


写真-2 コンクリート打設状況

表-3 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
	Tc(℃)	13	14.0	1.8
現着	スランプ(cm)	16	14.9	1.8
	空気量(%)	13	5.0	0.5
	Tc(℃)	16	16.1	1.7

Tc: 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

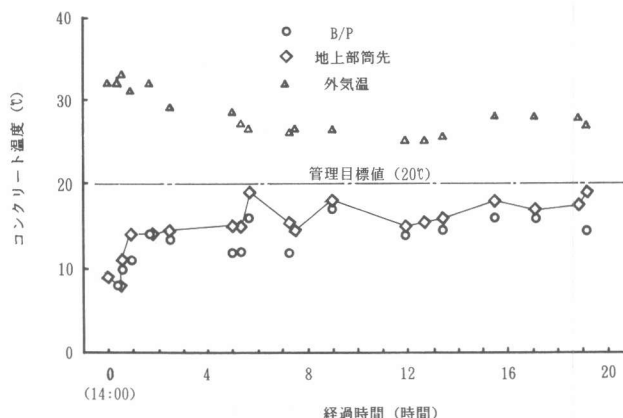


図-5 コンクリート温度の管理状況

表-4 コンクリートの圧縮強度試験結果

材令	7日	28日	91日
n	10	10	10
x	172	254	316
$\sqrt{v}$	19.4	20.2	21.1

n: データ数 x: 平均値(kg/cm²)

$\sqrt{v}$: 標準偏差(kg/cm²)

た場合（以下 LN_2 + 氷10%と略記）でコンクリート温度の低減量が約 10°C 以上の場合

③ ②と同じ冷却方法で温度低減量が約 10°C 未満の場合

各グループ内では LN_2 噴入量はほぼ同じであった。この場合、式(1)から冷却効率は温度低減量に正比例し、各グループ内ではその傾向が認められる。また冷却効率は表-5に示したように、標準偏差は0.05程度であった。

各グループ内の平均値を比較すると温度低減量の増加に対し、冷却効率が低くなる傾向が認められる。この一因には、コンクリート温度の低減量が考えられる。すなわち、コンクリート温度の低減量 η_c を大きくするためには冷却砂の温度をさらに下げることが必要となる。しかし、冷却砂の温度が下がると、砂と熱交換して排気する窒素ガス温度も低くなるため、利用

せずに捨てられる冷熱量が大きいことが、冷却効率が低下する理由のひとつであると考えられる。

なお、氷による温度低減量を小さく推定することにより、見掛け上 LN_2 の冷却効率が高くなることが考えられるが、氷による温度低減量は比較的精度良く推定できており¹⁾、この影響は小さいと判断される。

本工法の基礎実験および実証実験で得られた効率^{2), 3)} に比べ、本工事で得られた効率は高いものとなっている。この主な理由として、以下の3つが考えられる。①長時間の連続運転を行ったためサンドクーラおよびコンクリートミキサの温度が安定状態になっており熱ロスが少なくなっていた。②氷との併用等により LN_2 によるコンクリートの温度低減量が比較的小さかった。③1バッチ当たりのコンクリート練りまぜ量が 3 m^3 と多く、コンクリート単位容積に対して熱ロスの原因となる設備の表面積が小さかった。

また、サンドクーラの容量に対して冷却砂が多いほど、砂と LN_2 の接触面積が大きくなり、熱交換が効果的に行われると考えられることから、冷却砂自体の製造効率も高かったと思われる。

5.4 冷却コンクリートの製造サイクルタイム

LN_2 噴入速度 $280 \sim 300\text{kg/min}$ 、 LN_2 噴入時間 $40 \sim 70\text{sec}$ の場合、冷却コンクリートの製造サイクルタイムは $80 \sim 110\text{sec}$ であった。また LN_2 と氷を併用した場合は氷を完全に解かす必要があったため、サイクルタイムは $100 \sim 110\text{sec}$ であった。

5.5 打設終了後のコンクリートの状況

打設後のコンクリート温度の経時変化を図-7に示す。図中には、プレクーリングを行わなか

表-5 LN_2 によるコンクリート冷却効率

冷却手段	n	ΔT_c	W_{LN_2}		η_c	
			X	$\sqrt{V}$	X	$\sqrt{V}$
液化窒素	19	13.3	7.2	0.3	0.79	0.03
液化窒素 と氷	1※	47	11.9	6.9	0.5	0.84
	2※	141	8.9	6.4	0.4	0.87
	平均	188	9.7	6.6	0.4	0.86

n : データ数 x : 平均値 $\sqrt{V}$: 標準偏差 ΔT_c : コンクリート温度低減量の平均値($^\circ\text{C}$) W_{LN_2} : コンクリート 1 m^3 を 1°C 冷却するのに必要な液化窒素量(Kg/m^3) η_c : コンクリートの冷却効率
※ 温度低減量約 10°C 以上のもの * 温度低減量約 10°C 未満のもの

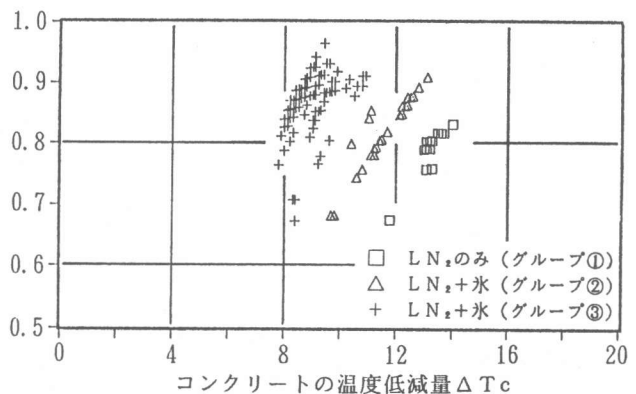


図-6 LN_2 による温度低減量と効率の関係

った場合を想定した打込み温度31℃の解析結果もあわせて示した⁴⁾。なお、解析では表面の保温養生を考慮していない。コンクリート温度の最大値は、プレクーリングにより55.5℃から46.5℃と9℃低減された。これはプレクーリング量11℃と近い値である。表面の保温養生により、表面温度の上昇量は実測値のほうが2倍近く大きくなっている。これによって部材内部と表面部の温度差が小さくなり、内部拘

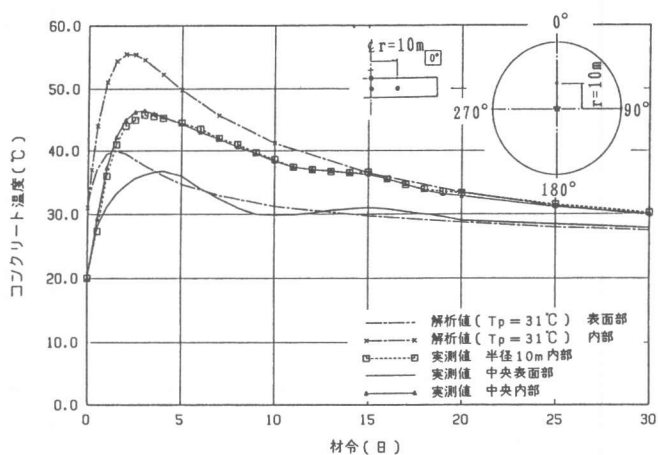


図-7 打設後のコンクリート温度の経時変化

束によるひびわれが制御できたと考えられる。また温度の降下も緩やかになっており、部材内に発生する応力は小さくなっていると推測される。材令30日および60日におけるひびわれ調査では、ひびわれの発生は認められなかった。

以上のことから、本工事でプレクーリングによりコンクリートの打込み温度を20℃以下として施工したことは、温度ひびわれ制御に十分効果があったと判断される。

6. まとめ

本研究では、コンクリートの温度ひびわれ制御対策のひとつとして、 LN_2 により冷却した砂を用いるプレクーリング工法を採用し、B/P 船の設備により地下式貯槽底版を施工した結果について述べた。本研究で得られた主な成果を列挙すれば次のとおりである。

- (1) LN_2 によるコンクリートの冷却効率は、コンクリート温度の低減量によって異なるが、低減量が12～13℃の場合は約80%の効率であり、またコンクリート1 m³を1℃低減するのに必要な LN_2 量は7.2 kg程度である。
- (2) プレクーリングによるコンクリートの物性の変化は小さく、通常の管理で所定の品質を確保できた。
- (3) LN_2 の噴入量制御により、コンクリートの打込み温度は全て20℃以下に管理できた。
- (4) LN_2 により冷却した砂を用いるプレクーリング工法は、マスコンクリートの温度ひびわれ制御に有効である。

最後に、本工事に御協力いただいた㈱吉田組吉田和正氏をはじめ関係者各位に謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 木村克彦・小野 定・後藤貞雄・大下研一：液化窒素を用いたプレクーリングシステムの開発、土木学会論文集投稿中
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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