

30. 液体窒素を用いたプレクーリング工法の開発

清水建設(株)：根上 義明・梶岡 保夫
 〃木村 克彦
 東京ガス(株)：峯岸 孝二
 東京冷産業(株)：平野 正

1. はじめに

近年、本四連絡橋などの長大橋下部工、LNG地下タンクなどの側壁、底版、原子力発電所のベースマットなどのようにコンクリート構造物の大型化に伴い、セメントの水和熱に起因する温度ひびわれ制御が構造物の耐久性、機能性の点から重要な検討課題であると考えられる。このようなマスコンクリートの温度ひびわれ制御方法としては、コンクリート温度上昇に関する対策が基本的な対策として多くの工事で実施されている。たとえば、温度上昇に関する対策には、低発熱型セメントの使用、練りませ水としての冷水の使用および氷の混入などのプレクーリング方法がある。このような対策の中でプレクーリングは効果的な対策のひとつであるが、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るために、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°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。

本報告は、プレクーリング方法の一つである LN_2 により冷却した細骨材を用いたプレクーリング工法について冷却砂製造設備、コンクリート温度管理方法、本工法で製造した冷却コンクリートの性質、コンクリートの冷却効率についてとりまとめたものである。

2. 基本原理

本工法の基本的な考え方は、図-1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 LN_2 とを効率よく練りませることにより砂粒子の温度をマイナス数十度に冷却し、かつ細骨材粒子の表面に付着している水を凍らせ、サラサラの超低温の細骨材（以下、冷却砂）を製造する。この細骨材を用いてコンクリートを練りませることにより冷却砂のもつ冷熱でコンクリートの練上り温度を下げるものである。冷却砂の製造において、細骨材は表面積が大きいため、また LN_2 との熱交換が短時間で可能となるので LN_2 のもつ冷熱をより効率的に砂と交換できる。

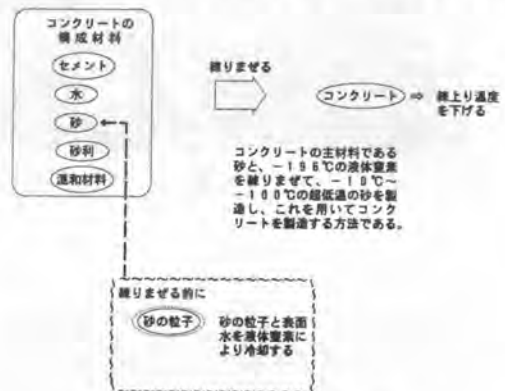


図-1 本工法の基本原理¹⁾

3. 冷却コンクリート製造システムおよび温度管理

(1) システムの概要

LN_2 によるプレクーリングシステムは、冷却砂

製造設備、 $L N_2$ 噴入コントロール設備、材料およびコンクリート温度管理システムからなる。これら設備の既設コンクリートプラント（以下、C/P）への組み込み例は図-2のとおりである。温度管理システムを除き既設のC/P操作盤と他のシステムは連動しており、冷却砂製造は自動化されている。以下に、それぞれの設備の概要および温度管理方法について述べる。

(2) 冷却砂製造設備

本設備の主な構成要素は、冷却砂製造装置（以下、サンドクーラ）本体、砂計量機、窒素ガス（ $G N_2$ ）排気ダクト、冷却砂排出シュートおよび操作盤である。なお、必要に応じて砂回収装置をサンドクーラと排気ダクトの間に設置する。サンドクーラは、外部からの熱の流入を防止するためにその周囲は硬質ウレタンで断熱されている。そのためサンドクーラ外表面は外気温にほぼ等しく、その内側の温度は図-3に示すように外気温に比べて約 $40^{\circ}C$ 低い $-10 \sim -20^{\circ}C$ で、断熱効果が十分であることが分かる。また、サンドクーラ内側温度は、冷却砂温度が $-50^{\circ}C$ 程度であれば約 $30 \sim 40^{\circ}C$ 高いようである。これは、サンドクーラ

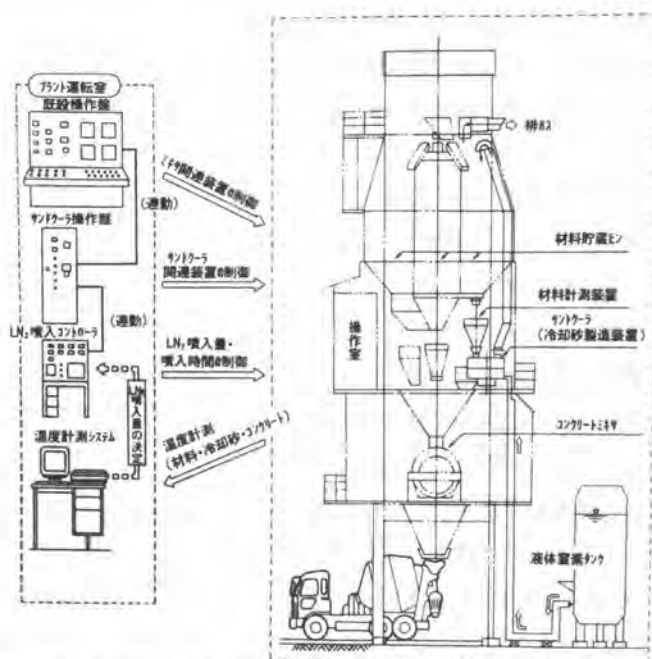


図-2 冷却砂製造システムを既設のコンクリートプラントに組み込んだ例²⁾

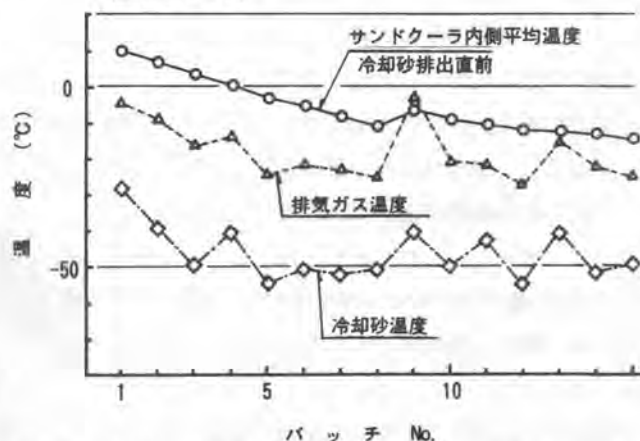


図-3 冷却砂、排気ガスおよびサンドクーラ温度の経時変化

ラ内側に砂があるため、 $L N_2$ が直接接しないためであると考えられる。サンドクーラからの $G N_2$ 排気口位置で測定した $L N_2$ 噴入中の $G N_2$ 温度の平均値は、冷却砂温度より約 $30^{\circ}C$ 高い値を示している。なお $G N_2$ 温度は、噴入開始時には常温砂の温度に、終了時には冷却砂温度にほぼ等しい。

(3) $L N_2$ 噴入コントロール設備

$L N_2$ 噴入コントロールシステムは、図-4に示すとおりであり、主な構成要素は、 $L N_2$ 噴入コントローラ、流量制御用バルブ、噴入ノズル、圧力、温度、流量などの計測機器、 $L N_2$ 供給配管である。 $L N_2$ は、サンドクーラ側部に取り付けられたノズルから $L N_2$ 噴入コントローラにセットされた所定の噴入速度（単位時間当たりの噴入量）で所定量を噴入する。 $L N_2$ の噴入は流量制御バルブの開度で調

整しており、噴入速度の制御は、圧力制御でなく、流量制御により行っている。これを圧力制御した場合には、配管のクールダウン状況などにより同一の噴入圧力でも噴入流量は、大きく変動するために、短時間で多量の LN_2 を滑らかに噴入することは難しい。そこで、バルブの開度調整を流量計の流量により行う流量制御によって行うことによって滑らかな噴入が可能となった。 LN_2 の噴入は、サンドクーラに砂を投入し、投入口位置に設置したスライドゲートが締まってから数秒後に開始し、周辺に GN_2 がもれるのを防いでいる。

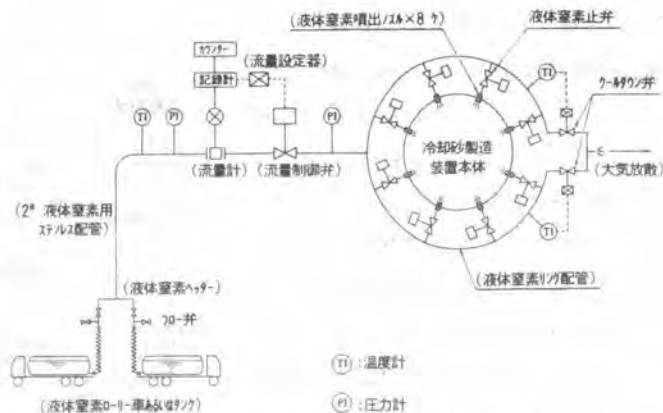


図-4 液体窒素噴入制御システム¹⁾

（４）コンクリート練上り温度管理システム

（４）コンクリート練上り温度管理システム

コンクリート練上り温度管理に用いた計測システムのフローは図-5に示すとおりである。各材料およびコンクリート温度は、T型熱電対で自動測定し、それぞれの温度は運転室に設置したCRTに表示し、これらをもとに次のバッチからの LN_2 噴入量をコントロールすることによってコンクリート温度を管理するシステムである。測定状況を写真-1に示した。本システムを用いて冷却コンクリートの温度管理を行った場合の練上り温度のバラツキの一例は、約 $1^{\circ}C$ であった。⁴⁾

4. 冷却コンクリートの性質

4. 冷却コンクリートの性質

（１）フレッシュコンクリート^{1) 5)}

フレッシュコンクリートの試験結果は次のとおりである。冷却砂を用いて練りませたコンクリート（

以下、冷却コンクリート）における、実機規模の実験では冷却によりスランプは増大する傾向が認められた。空気量は、いずれの場合にも常温および冷却コンクリートとも同一となるように混和剤を添加したために差はなかった。また、常温および冷却コンクリートの凝結速度に差はないが、ブリージングは冷却コンクリートの方が少なくなる傾向を示した。

測定項目	計器名	切換器	測定器	データ収録器
サンドクーラ温度 (冷却砂製造用)	T型熱電対	スキャナー	データロガー	パソコン
	T型熱電対			
	T型熱電対			
常温砂温度	T型熱電対	スキャナー	データロガー	パソコン
冷却砂温度 (サンプラー)	T型熱電対			
材料温度 (砂利、セメント、水)	T型熱電対			
コンクリート温度 (アジテータ内)	T型熱電対			

図-5 温度計測システムフロー³⁾



写真-1 温度計測状況

(2) 硬化コンクリート⁶⁾

圧縮強度と練上り温度との関係では、練上り温度を10℃低減すれば、圧縮強度は約10 kgf/cm²増加する傾向が認められた。また、引張強度および弾性係数は、圧縮強度が同一であれば冷却による影響はないようである。

(3) コンクリート温度低減量⁷⁾

本工法により23～28℃の常温コンクリートを0℃まで冷却しており、その低減量は約25℃である。従来のプレクーリング方法の温度低減量の限度が実用的には15℃程度であるのに比べて、本工法は大幅なプレクーリングが可能であることがわかる。

(4) 冷却効率

本工法によるコンクリートの冷却効率を既往の文献から算定した他のLN₂によるプレクーリング工法の冷却効率とともに図-6に示した。本工法の冷却効率の平均は約70～85%であり、他の工法では約40～55%である。コンクリート温度低減量、配合などが異なるので同一レベルでの比較はできないが本工法は、他の工法に比べて約20～40%高い冷却効率を示している。

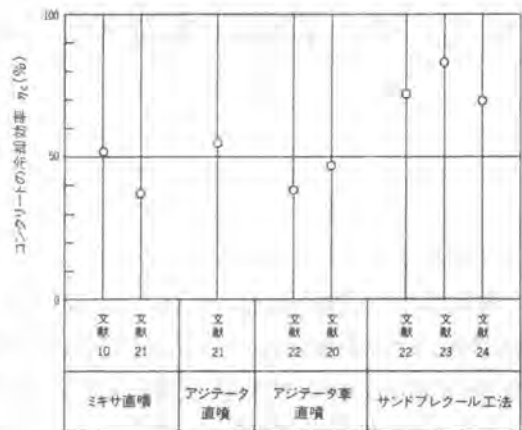


図-6 LN₂を用いたプレクーリング工法の冷却効率の比較⁸⁾

5. まとめ

本研究は、液体窒素で冷却した細骨材を用いたコンクリートのプレクーリング工法において、冷却砂製造設備、コンクリート温度管理方法、冷却コンクリートの性質および冷却効率について検討したものである。本研究の結果、得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) 冷却砂温度が-50℃程度であれば、冷却砂製造装置の内側の温度は、冷却砂温度より30～40℃高く、排気ガス温度は約30℃高い。
- (2) 液体窒素は、LN₂噴入コントローラを用いて圧力制御より流量制御の方が滑らかに噴入できる。
- (3) コンクリート練上り温度は、リアルタイムで得られた測定結果を用いて液体窒素の噴入量をコントロールすることで十分に管理できる。
- (4) 本工法による冷却効率は、既往の液体窒素による工法に比べて高く、大幅な冷却が可能である。

参考文献

- 1) 木村克彦他：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、土木学会論文集No. 409/VI-11 1989. 9
- 2) 後藤貞雄：サンドプレクール工法の開発、土木学会論文集No. 409/VI-11 1989. 9
- 3) 近藤克巳他：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クリートの施工、コンクリート工学年次論文報告集 11-1、1989
- 4) 加藤和彦他：液化窒素を用いた沈埋函体側壁コンクリートプレクーリングの施工、コンクリート工学年次論文報告集 11-1、1989
- 5) 栗田守朗他：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、コンクリート工学年次論文報告集 10-2、1988
- 6) 根上義昭他：液体窒素で冷却した砂を用いて製造したコンクリートの諸性質に関する研究、土木学会論文集V投稿中
- 7) 木村克彦他：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、コンクリート工学年次論文報告集 10-2、1988
- 8) 小野定他：液体窒素で冷却した骨材でコンクリートをプレクーリング、セメント・コンクリート No. 509, 1989. 7