

## 9. 液体窒素を用いたコンクリート冷却

(株)間組：湊 隆太郎・麻生 公裕  
宮野 一也・\*越田 健

テイサン(株)：芳賀 朗

(株)渡商会：関 孝夫

### 1. まえがき

近年において、構造物の大型化、高品質化とともに急速施工への要求に対応するために、マスコンクリートの温度ひびわれ対策は、重要な問題となっている。温度ひびわれ対策の有効な方法として、コンクリートをプレクーリングする方法があり、練りませ水として冷水や氷を使用したり、散水等により骨材を冷却する方法が行われている。このような方法に対し、液体窒素（以下 $LN_2$ と略す）を使用するコンクリートのプレクーリング工法が、研究開発され、簡易な設備で急速な冷却が可能な点から、今後の施工需要に合致するものと期待されている。

今回、コンクリート構成材料のなかで最も比熱が大きいため熱の交換が速く行われる水に着眼し、水中に $LN_2$ を噴入して製造した氷と水の混合状態にしたものを、練りませ水として使用するプレクーリング工法を開発したので以下に報告する。

### 2. 基本原理

本工法の基本的な考え方は、 $-196^{\circ}C$ の冷熱を有する $LN_2$ を利用して水を冷却し、氷と水の混合状態（以後アイスシャーベットと呼ぶ）とすることにある。このアイスシャーベットを練りませ水としてコンクリートを練ることにより、コンクリートの練り上がり温度を下げるものである。本工法では、アイスシャーベットの製造における $LN_2$ と水の熱効率が86～98%と高く、アイスシャーベット状態であるために、他のコンクリート材料との練りませがスムーズに行われる点が特長である。

### 3. 本工法のシステム

#### (1) システム概要

本工法のシステムは、図-1のシステム構成図に示すようにアイスシャーベット製造部と計量部から構成されている。

#### <製造部>

製造部は水槽と貯留槽からなり、断熱材で覆われた水槽の底部には $LN_2$ を噴入するノズルを、上部には、 $LN_2$ が気化した $N_2$ ガスのための排気ダクトを取り付けてある。ノズルから噴入された $LN_2$ と水槽内部の水が熱交換することにより、水槽内に細かい氷が生成される。生成された氷は水よりも比重が小さいため水槽上部に集まる。上部に集まった氷は、水槽下部からの補給水圧と $N_2$ ガスのバブリング作用により、水槽上部からオーバーフローし、貯留槽に溜まる。氷の生成量は4. で述べるように $LN_2$ の噴入量で決まる。このため、ノズルに流

量計・電磁弁を取り付けて水槽内部とN<sub>2</sub>ガスの排気ダクトの温度差をもとに噴入量を調整できるようにしている。また、ノズルの回りには、凍結を防ぐようヒーターを取付け、噴入を中断した場合におこるノズルへの水の逆流を防ぐためにN<sub>2</sub>ガスが流れるようになっている。

<計量部>

計量部はチェーンコンベアと計量器からなる。チェーンコンベアのL型金網は貯留槽上部に溜まった氷をすくいとり水分を調整しながら計量器に運ぶ。貯留槽内に溜まっている水は水中ポンプにより水槽に戻される。計量器の入口にはカットゲートが付いており、ロードセルと連動して、JISに定められた誤差1%以内での計量ができる構造となっている。

(2) アイスシャーベットの一連の流れ

アイスシャーベットの一連の流れは次のようになる。

水槽⇒貯留槽⇒チェーンコンベアのL型金網⇒計量器⇒ミキサー

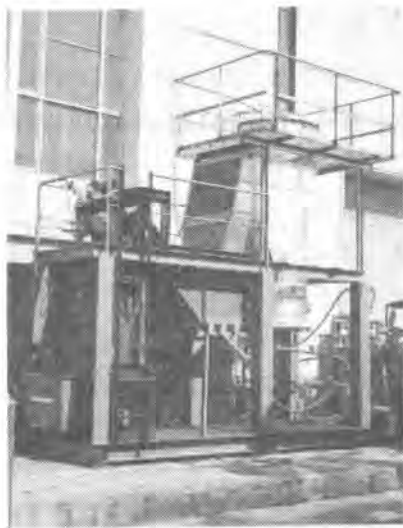


写真-1 システム全景

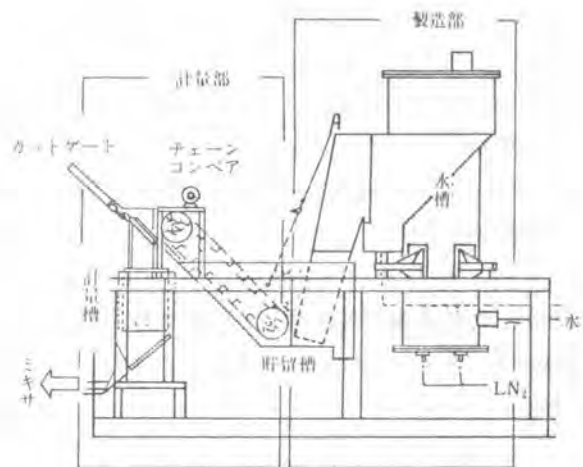


図-1 システム構成図

4. アイスシャーベットの氷生成率

アイスシャーベットの氷生成率とはアイスシャーベット中の氷の割合である。測定方法は、断熱容器に湯(又は水)に所定の量のシャーベットを投入し、完全に溶けた時の温度変化により算出する。氷の融解熱は80kcal/kgであるのでA℃、Ckgの湯を用いて、0℃、D(氷Ekg水Fkg)kgのシャーベットを解かしB℃になったとすると氷生成率E/D(%)は以下のようになる。

$$A \times C \times 1 - 80 \times E = B \times (C + D) \times 1$$

$$\text{したがって } E/D = \{ (A - B) \times C / (80 \times D) - B / 80 \} \times 100$$

コンクリートの冷却温度は、アイスシャーベットの量が同じであれば、0℃の水と氷の割合、

すなわち氷生成率により決定される。

ここで、コンクリート1 m<sup>3</sup>当り必要な練りませ水量を150 kgとすると、水温20℃の水を0℃氷生成率45%のアイスシャーベットを作るときに必要なとなるLN<sub>2</sub>使用量は、次の計算式により求めることができる。

①補給水を0℃まで冷却するのに要するLN<sub>2</sub>消費量

$$W_1 = W_{ice} \times (T_w - 0) \times C_w / Q_{LN2} \dots \dots \textcircled{1}$$

②0℃の水を一部氷にするためのLN<sub>2</sub>消費量

$$W_2 = W_{ice} \times I_{ratio} \times Q_{ice} / Q_{LN2} \dots \dots \textcircled{2}$$

W<sub>ice</sub> : アイスシャーベット製造量

I<sub>ratio</sub> : アイスシャーベット氷生成率 (%)

Q<sub>ice</sub> : 水の融解熱 (80Kcal/kg)

Q<sub>LN2</sub> : LN<sub>2</sub>の持っている熱量 (kcal/kg)

(比熱: 0.248kcal/kg・℃、気化熱: 48kcal/kg)

T<sub>w</sub> : 補給水の温度 (℃)

C<sub>w</sub> : 水の比熱 (1kcal/kg)

$$W_1 = 150 \times (20 - 0) \times 1 / [ 48 + \{ 196 + (1 + 2 + 3 + \dots + 19 + 20) / 20 \} \times 0.248 ] \\ = 30(\text{kg})$$

$$W_2 = 150 \times 0.45 \times 80 / \{ 48 + (196 + 0) \times 0.248 \} \\ = 56(\text{kg})$$

$$W_1 + W_2 = 86(\text{kg})$$

したがって、水温20℃の水で0℃氷生成率45%のアイスシャーベットを作るときは、LN<sub>2</sub> 86 kgが必要である。ただし、実際には効率により変化する。本システムでは、熱効率は86~98%である。

## 5. コンクリート特性

実証実験におけるコンクリート試験結果を表-1に示す。アイスシャーベット用いたコンクリートは練り上がり温度は9.5℃低減し、スランプは若干増加した。

表-1 実証実験におけるコンクリート試験結果

| TEST No | 試験条件        |                        |                | 配合                     |                  |                  | フレッシュコンクリート            |                 |                |                |                    | 硬化コンクリート   |            |                                    |                            |     |     |     |
|---------|-------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------|------------------|------------------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------|------------|------------|------------------------------------|----------------------------|-----|-----|-----|
|         | 水<br>温<br>℃ | シャ<br>ー<br>ベ<br>ッ<br>ト | G<br>max<br>mm | W<br>kg/m <sup>3</sup> | W<br>/<br>C<br>% | s<br>/<br>a<br>% | C<br>kg/m <sup>3</sup> | 経時変化 0分-30分-60分 |                |                | 空<br>気<br>量<br>(%) | 凝結         |            | 簡易断熱<br>上昇温度                       | 圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> ) |     |     |     |
|         |             |                        |                |                        |                  |                  |                        | 上段:エグレット温度(℃)   | 下段:スランプ(cm)    | 空気量            |                    | 始発<br>hr-m | 終結<br>hr-m |                                    | σ3                         | σ7  | σ28 | σ91 |
| 1       | 30          | ×                      | 20             | 165                    | 50               | 42               | 330                    | 17.0<br>11.4    | -17.5<br>-7.6  | -17.5<br>-7.6  | 2.7                | 5-25       | 7-15       | T <sub>max</sub> :56.9℃<br>(44hr後) | 274                        | 403 | 491 |     |
| 2       | 0           | ○                      | 20             | 165                    | 50               | 42               | 330                    | 7.5<br>17.5     | -10.0<br>-10.4 | -11.5<br>-10.1 | 1.8                | 8-25       | 7-55       | T <sub>max</sub> :48.8℃<br>(64hr後) | 260                        | 418 | 515 |     |

簡易断熱温度上昇試験装置及びその試験結果を図-2・図-3に示す。アイスシャーベットの使用により、打ち込み温度は9.7℃低減し、最大上昇温度は上昇温度は8.1℃低減した。

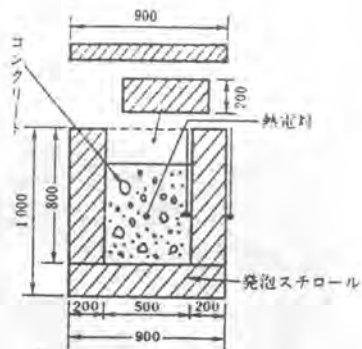


図-2 簡易断熱温度上昇試験装置

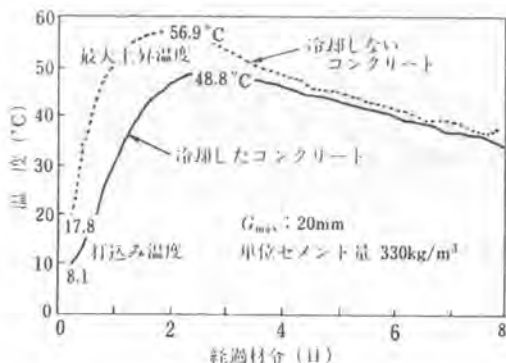


図-3 簡易断熱温度上昇試験結果

LN<sub>2</sub>により製造されたアイスシャーベットを練りませ水として用いたコンクリートの特性を検証した結果、以下のことが明らかになった。

- ①アイスシャーベットを練りませ水に使用した場合、練上り温度は約10℃低減できる。
- ②アイスシャーベットにより冷却したコンクリートはスランプが若干増加する。
- ③アイスシャーベット使用により、凝結開始時間が1時間程度遅れることがあるが、材令7日ではほぼ同等の圧縮強度となる。
- ④アイスシャーベット用いることによる凍結融解抵抗性、中性化に及ぼす影響は認められない。

## 6. あとがき

現在、下水処理場にて実証実験を行っているが、ひびわれは全く認められず、良好な冷却効果が得られている。アイスシャーベットによるコンクリート冷却は、

- ①ダム、橋梁基礎、原子力発電所、地下・地上タンク、沈埋トンネル、地下連続壁等のマスコンクリート構造物
- ②維持補修の面で水密性、耐久性が要求される構造物
- ③単位セメント量が多く、長期強度も要求される超高層ビル等の建築構造物などの用途が考えられる。

冷却が必要なコンクリートは、夏期に需要が集中することと、短期間及び限定場所に使用される場合が多い。ただし、従来のアイスプラントでは、製氷・貯氷設備が必要となり、ダム、発電所などの大規模な現場しか対応できず、市中の生コンプラントからの冷却コンクリートの納入は不可能であった。しかし、今回のプラントは簡易な設備でアイスシャーベットが製造できるため、市中の生コンプラントにも柔軟に適應できる冷却システムが可能である。今後、トラック搭載型も含め更に効率的な冷却システムを目指して検討を重ねていく予定である。