

## 論文

## [1071] 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

正会員○加藤 和彦 (清水建設土木本部)

松森 秀美 (首都高速道路公団)

清水 徹 (川崎航路トンネルJ.V.)

松岡 彰 (多摩川トンネルJ.V.)

## 1. はじめに

近年、長大橋の下部工、沈埋トンネル、原子力発電所のベースマットなど、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よる温度ひびわれ制御が構造物の耐久性、機能性などの点から重要な検討課題になっている。温度ひびわれの制御方法には各種のものがあ、冷水や水によるプレクーリング工法は古くから実施されている方法である。現在建設中の高速湾岸線沈埋トンネル函体は水密性の高いコンクリートを要求されている<sup>1)</sup>。図-1に示すように側壁コンクリートは壁厚が1.25mであり、とくに夏期においては低発熱型セメントの使用等配合面からの対策に加えて、プレクーリングなど他の対策を講じる必要があった。そこで温度ひびわれ制御対策としてその効果が確実なプレクーリングを選定し、液化窒素 (LN<sub>2</sub>) で冷却した細骨材 (以下、冷却砂) を用いたプレクーリング工法を採用して約5000 m<sup>3</sup>の冷却コンクリートを打設した。本工事のような細骨材冷却によるプレクーリング工法の施工事例の報告は少ない<sup>2)</sup>。本報告は、

既設のバッチプラント

に冷却砂製造装置を組み

込んで実施した、沈埋ト

ンネル側壁用冷却コンク

リートの施工結果に基づ

いて、コンクリート温度

管理結果、冷却効率、ア

ジテータ車による運搬時

の温度上昇について検討したものである。

## 2. 冷却コンクリート製造および

## 温度測定システム

2.1 冷却コンクリート製造システム<sup>3)</sup>

冷却コンクリート製造システムの概要を図-2および写真-1に示す。図-2に示すように本システムは、既存のバッチプラントに冷却砂製造装置 (以下、サンドクーラ) を組込んだもので、サンドクーラ本体、プラント運転室に設置したサンドクーラおよびLN<sub>2</sub>の制御機器、LN<sub>2</sub>の供給設備、安全設備などから構成されており、一連の操作は自動化されている。写真-1に示すサンドクーラの容量は、1 m<sup>3</sup>であり、周囲を断熱材で

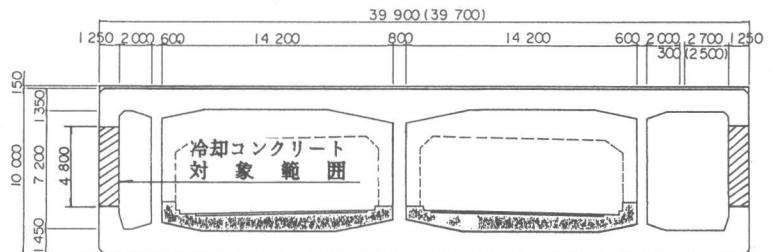


図-1 沈埋函断面図

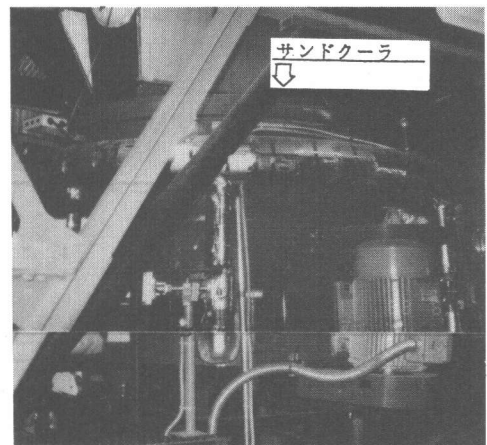


写真-1 冷却砂製造装置

被覆している。タンクローリーから供給されたLN<sub>2</sub>をサンドクーラに自動的に噴入し、冷却砂を製造する。LN<sub>2</sub>の噴入量の測定は差圧流量計により行った。さらに、この冷却砂と他の材料を可傾式ミキサ（容量3 m<sup>3</sup>、1バッチ2.75 m<sup>3</sup>練り）に投入して冷却コンクリートを60～80 m<sup>3</sup>/h製造した。

## 2.2 温度管理システム

材料温度およびコンクリート練上り温度管理のシステムフローは図-3に示すとおりである。各材料温度およびコンクリート練上り温度は、各貯槽びん、計量機およびコンクリートホッパー内に設置したT型熱電対で測定した。各温度の測定は、10秒間隔で行い、リアルタイムで材料、コンクリート温度の管理に用いるとともに、データ処理に使用した。コンクリート温度は、練上り時、現場着時および打設時に測定し、これらをプラントでのコンクリートの練上り温度の管理にフィードバックした。このように、コンクリート温度の測定値をリアルタイムにフィードバックすることにより、材料温度や運搬・圧送による温度上昇量の変化に対応した。なお、コンクリート温度の変更はLN<sub>2</sub>の噴入量を調節することで行った。

## 3. 使用材料および配合

配合および使用材料を表-1、表-2に示す。冷却コンクリート製造時の冷却砂の使用量は、1バッチ当たり1300 kgであり、常温砂と冷却砂は、約1:1の割合で用いた。

## 4. コンクリート練上り温度および

### 冷却効率の計算方法

### 4.1 計算に用いる定数

コンクリートの練上り温度の計算に用いる定数は、表-3に示すとおりである。

### 4.2 コンクリート練上り温度

常温および冷却コンクリートの練上り温度の計算値

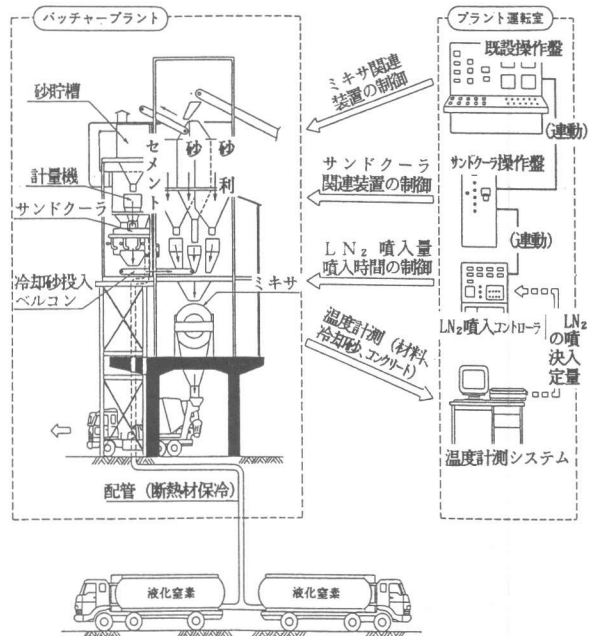


図-2 冷却コンクリート製造設備

| 測定項目 (T型熱電対)  |          |    | 切 換 器    | 計 測 器                | データ収録器        |
|---------------|----------|----|----------|----------------------|---------------|
| 設 置 位 置       | 計測対象     | 点数 |          |                      |               |
| 計 量 ビ ン       | 細骨材      | 4  | → スキャナ → | → データロガー (UCAMSBT) → | パソコン (PC9801) |
|               | 粗骨材      | 3  |          |                      |               |
|               | セメント     | 2  |          |                      |               |
| 計 量 機         | 細骨材 (常温) | 2  |          |                      |               |
|               | 細骨材 (冷却) | 1  |          |                      |               |
|               | 粗骨材      | 1  |          |                      |               |
|               | セメント     | 1  |          |                      |               |
|               | 水        | 1  |          |                      |               |
| 冷 却 砂 製 造 装 置 | —        | 19 |          |                      |               |
| コンクリートホッパー    | コンクリート   | 2  |          |                      |               |

図-3 材料およびコンクリート温度管理用計測システムフロー

表-1 コンクリートの配合

| 最大寸法<br>(mm) | スランブ<br>(cm) | 空気量<br>(%) | 水セメント比<br>W/C<br>(%) | 細骨材率<br>S/a<br>(%) | 単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> ) |        |          |          |             |
|--------------|--------------|------------|----------------------|--------------------|----------------------------|--------|----------|----------|-------------|
|              |              |            |                      |                    | セメント<br>C                  | 水<br>W | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>S | AE減水剤<br>C× |
| 25           | 8±2.5        | 4±1        | 51.5                 | 45.3               | 301                        | 155    | 834      | 1034     | 0.20        |

$T_p$  は式(1)で与える。なお本工事では、冷却砂温度が0℃以下であるので、この場合の練上り温度の計算式のみを示した。

$$T_p = (Q_{mat} + H) / C_{CON} W_{CON} \quad \cdots \cdots (1)$$

$$Q_{mat} = C_g (W_{g1} T_{g1} + W_{g2} T_{g2}) + C_s (W_{s1} T_{s1} + W_{s2} T_{s2}) + C_c W_c T_c + C_w (W_w - S_{r1} W_{s1} - S_{r2} W_{s2}) T_w + C_w S_{r1} W_{s1} T_{s1} + C_i S_{r2} W_{s2} T_{s2} - q_i W_{s2} \{S_{r2} + \gamma_s / (1 + \gamma_s)\} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 $T_p$  : コンクリート練上り温度の計算値(℃)  $Q_{mat}$  : コンクリート1 $m^3$ 当りの材料が持っている熱量(kcal/ $m^3$ )  $H$  : コンクリート練りませ時のミキサ一摩擦熱など(=550kcal/ $m^3$ )  $C_{CON}$  : コンクリートの比熱(kcal/kg℃)  $W_{CON}$  : コンクリートの単位容積重量(kg/ $m^3$ )  $C_g$ ,  $C_s$ ,  $C_c$ ,  $C_w$ ,  $C_i$  : 粗骨材、細骨材(常温砂、冷却砂)、セメント、水および氷の比熱(kcal/kg℃)  $T_g$ ,  $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$ ,  $T_c$ ,  $T_w$  : 粗骨材、細骨材(常温砂、冷却砂)、セメントおよび水の温度(℃)  $W_g$ ,  $W_{s1}$ ,  $W_{s2}$ ,  $W_c$ ,  $W_w$  : 粗骨材、細骨材(常温砂、冷却砂)、セメントおよび水の単位重量(kg/ $m^3$ )  $\gamma_s$  : 細骨材の吸水率

式(1)、(2)による常温コンクリートの練上り温度の計算値と実測値の比較を図-4に示した。図示のように計算値と実測値との相関係数は0.95であり両者の相関は高い。このことから常温コンクリートの練上り温度の推定は、式(1)、(2)により行った。

#### 4.3 コンクリート1 $m^3$ を1℃冷却するのに必要な $LN_2$ 量

コンクリート1 $m^3$ を1℃冷却するのに必要な $LN_2$ 量は、式(3)により求めた。

$$W_{LN2}' = W_{LN2} / (T'_{pc} - T_{PM}) \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、 $W_{LN2}'$  : コンクリート1 $m^3$ を1℃冷却するのに必要な $LN_2$ 量(kg/ $m^3$ ℃)

$W_{LN2}$  : コンクリート1 $m^3$ 当りの砂冷却に用いた $LN_2$ 量(kg)  $T'_{pc}$  : 冷却コンクリートにおいて砂温度を冷却前の砂温度

表-2 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3.00        | 低発熱型       |
| 骨 材  | 細骨材      | 比重2.61 FM2.54 | 木更津産       |
|      | 粗骨材(碎石)  | 比重2.70 FM6.78 | 島形山産(2005) |
|      | 粗骨材(玉砕)  | 比重2.61 FM6.85 | 富士川産       |
| 混和剤  | AE減水剤遅延型 | オキシカルボン酸系     |            |

表-3 計算に用いる定数

| 材料名    | 項 目            | 単 位      | 定数    | 備 考        |
|--------|----------------|----------|-------|------------|
| $LN_2$ | 比熱             | kcal/kg℃ | 0.248 | 気体         |
|        | 気化熱            | kcal/kg  | 48.8  |            |
|        | $LN_2$ の持っている  | kcal/kg  | 100   | (-196~10℃) |
|        | 熱量 $q_{LN2}$   |          |       |            |
| 水      | 比熱 $C_w$       | kcal/kg℃ | 1.0   | 水          |
|        | 比熱 $C_i$       | kcal/kg℃ | 0.48  | 氷          |
|        | 融解熱 $q_i$      | kcal/kg  | 80    |            |
| セメント   | 比熱 $C_c$       | kcal/kg℃ | 0.2   |            |
| 砂      | 比熱 $C_s$       | kcal/kg℃ | 0.2   | 表乾砂        |
|        | 吸水率 $\gamma_s$ | %        | 1.8   |            |
| 砂利     | 比熱 $C_g$       | kcal/kg℃ | 0.2   |            |
| コンクリート | 比熱 $C_{con}$   | kcal/kg℃ | 0.25  |            |

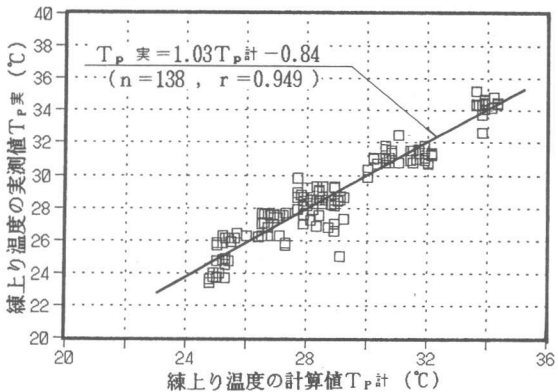


図-4 常温コンクリートの計算値と実測の比較

に置き換えた場合の常温コンクリートの練上り温度の推定値（℃）（式(1)で計算） $T_{PM}$ ：冷却砂を用いたコンクリートの練上り温度の実測値（℃）

## 5. 施工結果および考察

### 5.1 コンクリート温度

表-4に冷却コンクリートの練上り温度、現場着および筒先温度の測定結果を示した。コンクリート温度の規格値は筒先で $21^{\circ}\text{C}$ 以下（7月、8月）および $18^{\circ}\text{C}$ 以下（9月）で、管理目標値は $20^{\circ}\text{C}$ （7月、8月）および $17^{\circ}\text{C}$ （9月）である。なお、コンクリート温度の測定は全バッチ、全車について行った。コンクリートの練上り温度 $T_{pb}$ の平均値は、7月、8月、9月でそれぞれ $15.6^{\circ}\text{C}$ 、 $16.8^{\circ}\text{C}$ 、 $13.9^{\circ}\text{C}$ である。また、各月の $T_{pb}$ の標準偏差は $0.8\sim 1.1^{\circ}\text{C}$ と変動が小さく、運搬・圧送時の温度上昇などのデータの蓄積に伴って、標準偏差は小さくなる傾向が認められる。さらに、運搬・圧送時における温度上昇量および、筒先の管理目標温度から、練上り温度目標値を、7月、8月は約 $16^{\circ}\text{C}$ 、9月は約 $13^{\circ}\text{C}$ と設定して管理した結果、測定値はこれをほぼ満足している。

筒先でのコンクリート温度 $T_{pp}$ の平均値は、各月でそれぞれ $18.4^{\circ}\text{C}$ 、 $19.2^{\circ}\text{C}$ 、 $16.6^{\circ}\text{C}$ 、標準偏差は $1.0^{\circ}\text{C}$ 、 $0.7^{\circ}\text{C}$ 、 $0.6^{\circ}\text{C}$ である。また、実測結果で、規格値を超えたものはなかった。図-5に示すように3台目以降ではコンクリートの練上り温度、現場着温度および筒先温度は安定している。これに対して2台目まではコンクリート練上り温度は目標値に対して低く、だんだん目標値に収束する傾向にある。この理由は冷却効率が安定するまでの数バッチでは、 $\text{LN}_2$ を多目に噴入していることによる。

### 5.2 冷却コンクリートの温度上昇量

表-5に冷却コンクリートの温度上昇量測定結果を示す。コンクリート練上りから筒先までの温度上昇量は平均で $2.7^{\circ}\text{C}$ で

表-4 コンクリート温度測定結果一覧表

|                  |         | n    | $\bar{X}$ | $\sqrt{V}$ |
|------------------|---------|------|-----------|------------|
| ブ<br>ラ<br>ン<br>ク | 7月      | 701  | 15.6      | 1.1        |
|                  | 8月      | 420  | 16.8      | 0.9        |
|                  | 9月      | 630  | 13.9      | 0.8        |
|                  | 7.8月の平均 | 1121 | 16.0      | 1.0        |
| 現<br>場<br>着      | 7月      | 346  | 17.0      | 1.1        |
|                  | 8月      | 234  | 17.5      | 0.9        |
|                  | 9月      | 315  | 15.6      | 0.7        |
|                  | 7.8月の平均 | 580  | 17.2      | 1.0        |
| 筒<br>先           | 7月      | 346  | 18.4      | 1.0        |
|                  | 8月      | 234  | 19.2      | 0.7        |
|                  | 9月      | 315  | 16.6      | 0.6        |
|                  | 7.8月の平均 | 580  | 18.7      | 1.0        |

注) 7～8月の打設目標温度は $20^{\circ}\text{C}$

9月の打設目標温度は $18^{\circ}\text{C}$

n: 標本数,  $\bar{X}$ : 平均値,  $\sqrt{V}$ : 標準偏差

表-5 運搬および圧送による温度上昇

|             | n   | $\bar{X}$ | $\sqrt{V}$ |
|-------------|-----|-----------|------------|
| 運搬時         | 865 | 1.4       | 0.6        |
| 圧送時         | 865 | 1.3       | 0.6        |
| 運搬時～<br>圧送時 | 865 | 2.7       | 0.7        |

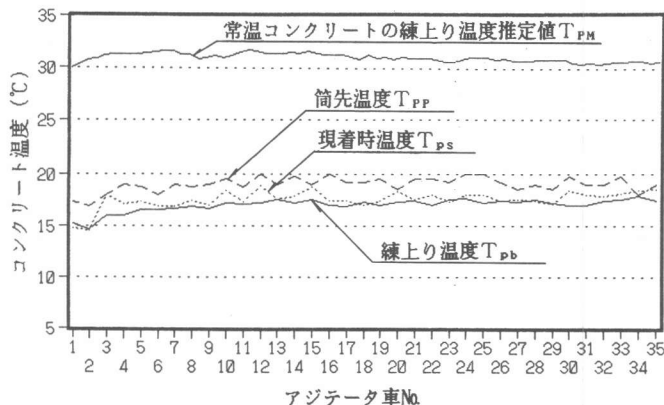


図-5 コンクリート温度の日変化

あり、その内訳は運搬時1.4℃、圧送時1.3℃となる。また、そのそれぞれのばらつきは0.6と小さい。気象条件が大きく変化したにもかかわらず、運搬時の温度上昇量のばらつきが小さかった理由の一つとして晴天日あるいは外気温が高い日には、アジテータ車のドラム表面に付着した水滴が蒸発し、気化熱が奪われたことが考えられる。

### 5.3 コンクリートの冷却効率

コンクリート1m<sup>3</sup>を1℃冷却するのに必要なLN<sub>2</sub>量 $W_{LN2}$ の実績を表-6、表-7、図-6および図-7に示す。なお、表-6に各月のコンクリート温度の冷却幅を併記した。冷却幅に10℃程度の幅があるのは、外気温の変動などに伴う材料温度の変化により、冷却しない場合のコンクリート温度が日内および日間で変化したことなどによると考えられる。表-6に示したLN<sub>2</sub>量は、表-7の $W_{LN2}'$ と同じである。表-6から、コンクリートの冷却に対するLN<sub>2</sub>量 $W_{LN2}'$ は $T_{pb}$ 、外気温などによらずほぼ8.4kg/m<sup>3</sup>℃と一定である。そのバラツキは、0.5～0.8kg/m<sup>3</sup>℃であり、7月に比べて8月、9月がやや小さい値となっている。

表-6 コンクリート1m<sup>3</sup>を1℃冷却するのに必要なLN<sub>2</sub>量

|     | n    | $\bar{X}$ | $\sqrt{V}$ | 備 考          |
|-----|------|-----------|------------|--------------|
| 7 月 | 701  | 8.3       | 0.8        | 冷却幅<br>7～18℃ |
| 8 月 | 420  | 8.3       | 0.5        | 冷却幅<br>7～17℃ |
| 9 月 | 630  | 8.5       | 0.6        | 冷却幅<br>8～18℃ |
| 全 体 | 1751 | 8.4       | 0.6        |              |

表-7 コンクリート1m<sup>3</sup>を1℃冷却するのに必要なLN<sub>2</sub>量の比較

|            | $W_{LN2}$ | $W_{LN2}'$ | $W_{LN2}''$ | $W_{LN2}^{(1,2,3)}$ |
|------------|-----------|------------|-------------|---------------------|
| n          | —         | 1751       | 1528        | 75                  |
| $\bar{X}$  | 9.5       | 8.4        | 8.2         | 9.3                 |
| $\sqrt{V}$ | —         | 0.6        | 0.5         | 0.7                 |

$W_{LN2}$  : LN<sub>2</sub>の全使用量をコンクリートの全冷却幅で除した値

$W_{LN2}'$  : 各バッチのLN<sub>2</sub>使用量を各バッチのコンクリート冷却幅で除した値

$W_{LN2}''$  :  $W_{LN2}'$ から最初の3バッチのデータを除いた値

$W_{LN2}^{(1,2,3)}$  : 最初の3バッチの値

$W_{LN2}'$ とコンクリート温度の低減幅 $\Delta T_p$ との間には比較的強い相関があるとの報告もあるが、本工事においては、7月、8月および9月の $W_{LN2}'$ と $\Delta T_p$ との間の相関係数は0.43、0.49および0.19と低い。その一例を、図-6に示す。この理由の一つにはサンドクレーから排出した冷却砂をベルトコンベヤーを用いてコンクリートミキサに投入することによる熱ロスの影響が考えられる。以上のことから本冷却コンクリート製造システムでは、 $\Delta T_p$ が $W_{LN2}'$ に及ぼす影響は小さいと考えられる。

表-7の $W_{LN2}$ は、LN<sub>2</sub>の全使用量から求めたLN<sub>2</sub>量で、配管（長さ約60m）のクールダウンなどに使用したLN<sub>2</sub>量を含み、その平均値は9.5kg/m<sup>3</sup>℃である。コンクリートの冷

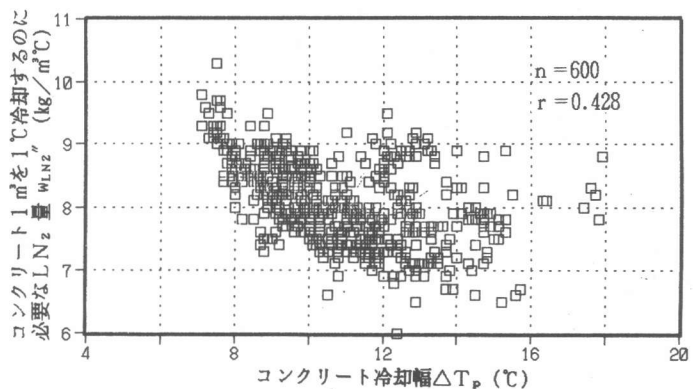


図-6 冷却幅とコンクリート1m<sup>3</sup>を1℃冷却するのに必要なLN<sub>2</sub>量との関係

却に直接関与しないクールダウンなどに用いた $LN_2$ 量は表-7に示した $W_{LN2}$ と $W_{LN2}'$ の差で、1回当りの冷却コンクリート製造量が約200 $m^3$ 、コンクリート温度低減幅が8~16 $^{\circ}C$ の場合には約1.1 $kg/m^3$ である。

後述のように冷却開始から数バッチにおける $W_{LN2}'$ は、9~11 $kg/m^3$ であり安定状態の値に比べて大きい。そこで、これらを別々に算定し

て表-7に示した。1バッチから3バッチまでの平均値 $^{(1,2,3)}W_{LN2}$ は9.3 $kg/m^3$ で、 $W_{LN2}'$ から各打設日の1~3バッチのデータを除いた $W_{LN2}''$ は、8.2 $kg/m^3$ である。最初の3バッチ分のデータを除くことにより、 $W_{LN2}''$ は、 $W_{LN2}'$ に比べて0.2 $kg/m^3$ 小さくなっており、 $^{(1,2,3)}W_{LN2}$ と比較して1.1 $kg/m^3$ 小さい。

図-7に $W_{LN2}'$ の経時変化の1例を示す。最初の数バッチの $W_{LN2}'$ が大きいのは、サンドクレーンやコンクリートミキサなどの設備の温度が高く、これら設備の冷却に $LN_2$ の冷熱が使われたためである。また36バッチ目で $W_{LN2}'$ がやや大きくなっているのは、タンクローリー入替の待ち時間(約20分)中にコンクリートミキサなどの温度が幾分上昇したためと考えられる。この傾向は他の理由で待ち時間が発生した場合にも認められた。

## 6. まとめ

本研究は、沈埋涵体側壁コンクリートの温度ひびわれ制御対策の一つとして実施した、液化窒素を用いたプレクーリング結果に基づいて、コンクリート温度、冷却効率等について検討したものである。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) コンクリート1 $m^3$ を1 $^{\circ}C$ 冷却するのに必要な $LN_2$ 量は、8.4 $kg/m^3$ 程度であり、クールダウンなどを含めた場合が9.5 $kg/m^3$ 程度であった。(2) 冷却コンクリートの運搬および、圧送時の温度上昇量は、気象条件の変化の影響をあまりうけず、それぞれの平均は1.4 $^{\circ}C$ 、1.3 $^{\circ}C$ 程度であった。(3) プラントでの冷却コンクリートの練上り温度、現場着、および筒先でのコンクリート温度を練上り温度にフィードバックして温度管理を行った結果、筒先温度はすべて目標とした打込み温度(20 $^{\circ}C$ 以下)を満足することができた。

本工事の施工に当って東京生コン協組の方々に協力頂いたことを記し謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 神戸昭男、手塚茂樹、松森秀美：高速湾岸線の沈埋涵製作工事施工概要、建設の機械化、1988. 11
- 2) 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、コンクリート工学第10回年次講演会論文報告集、10-2 1988
- 3) 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63

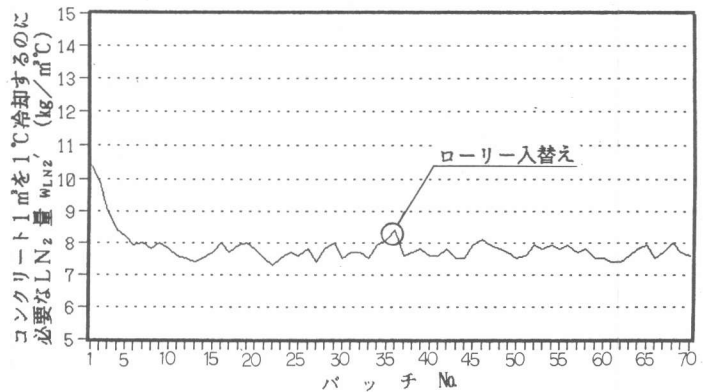


図-7 コンクリート1 $m^3$ を1 $^{\circ}C$ 冷却するのに必要な $LN_2$ 量の日変化