

## 液体窒素によるコンクリートのクーリングに関する研究 (その2)

芳賀孝成 十河茂幸  
新開千弘 竹田宣典  
中根淳 一瀬賢一

### Study on Cooling of Concrete with Liquid Nitrogen (Part 2)

Takashige Haga Shigeyuki Sogo  
Chihiro Shinkai Nobufumi Takeda  
Sunao Nakane Ken-ichi Ichise

#### Abstract

The method of cooling concrete with liquid nitrogen has advantages such as the equipment required is comparatively simple and cooling temperature can be freely selected. In the previous paper, the authors showed the test results of the direct jetting of  $LN_2$  into a truck agitator, and in this paper the authors described other test results of pre-cooling with  $LN_2$  in an agitator and a mixing plant.

The following were obtained as results: (1) The changes in properties of fresh concrete after cooling are of low degree. (2) Compressive strength of concrete becomes a little higher with cooling. (3) The cooling efficiency of fresh concrete with an agitator is about 50 percent, being slightly greater than that in the previous results, and with a mixer 35 percent. It is considered from these results that both of these pre-cooling methods using  $LN_2$  appear to be practicable.

#### 概 要

コンクリートのプレクーリングに、液体窒素の冷熱を利用する工法は、比較的簡易な設備で、冷却温度を自由に選択できる利点がある。前報では、生コン車内に液体窒素を直接投入する方法を試みた結果を報告したが、この研究では、アジテータおよびバッチャプラントのミキサ内で、液体窒素によるコンクリートのプレクーリングを試みた。

この結果、以下の点が明らかとなった。(1) フレッシュコンクリートの性質は、冷却前後で若干変化するが、その程度は小さい。(2) 圧縮強度は冷却により若干増大する。(3) 冷却効率は、アジテータの場合、液体窒素の冷熱能力の50%程度で、前報より若干効率が良かった。なお、ミキサ使用の場合は35%程度と低かった。以上の結果、いずれの方法においても、液体窒素によるプレクーリングは、実用可能と考えられる。

#### 1. はじめに

マスコンクリート構造物において、コンクリートをプレクーリングすることが、温度ひびわれの制御や長期強度の発現に有効であることは、周知のとおりである。しかし、従来のプレクーリング工法は、大規模な設備と多額の費用を必要とするため、我が国における実施例は、大規模工事においてもそれほど多くない。一方、諸外国においては、比較的簡易な設備を用いて液体窒素によるプレクーリングが実施され、効果を得ている例もある。

この方法は、我が国においてはまだ実施されていないが、液体窒素の卓越した冷熱(沸点 $-196^{\circ}C$ )を利用した有効な方法と考えられる。

前報では、簡易な液体窒素の投入装置を用いて、生コン車内でプレクーリングする方法を試みた実験結果を報告した。この研究は、これに引き続き、バッチャプラントのミキサ内およびアジテータ内において、液体窒素を、設置された配管から投入し、プレクーリングを行なったものである。この報告では、冷却方法の違いによる冷却効率への影響、冷却されたコンクリートの温度分布

状態, フレッシュコンクリートの性質および硬化したコンクリートの性質について調べた結果について述べる。

## 2. 実験概要

### 2.1. 実験の組合せ

比較した実験要因は, コンクリートの配合, 冷却方法, 液体窒素の投入方法, 投入圧力, アジテータの断熱の有無, 冷却時の開放度および攪拌羽根の回転数である。実験要因とその組合せを表一1に示す。

### 2.2. 使用材料および配合

使用骨材の性質を表一2に示す。細骨材として城陽産山砂, 粗骨材として城陽産砕石, 川砂利を使用した。

セメントは普通ポルトランドセメント (比重3.16, 比表面積 3,170 cm<sup>2</sup>/gr) とし, 混和剤は AE 減水剤標準形 (ポゾリス No. 70) および空気調整剤 (No. 202A, ポゾリス物産) を使用した。

コンクリートの配合は, 表一3に示すとおりである。設計基準強度を 300 kg/cm<sup>2</sup> とし, 硬練り (スランプ12 cm) と軟練り (スランプ 18 cm) の2種類とした。

### 2.3. 冷却方法

#### 2.3.1. アジテータにおけるコンクリートの冷却

アジテータの形状および液体窒素の投入ノズルの状態を図一1に示す。アジテータは混合容量 2.5 m<sup>3</sup> で羽根回転数が9.2~36.8 rpm に可変できるものである。

液体窒素の投入は, 片側2箇所から行なった。ノズル内径は 25 mm とした。なお, 液体窒素の投入時間は, 60秒から160秒とした。

#### 2.3.2. ミキサにおけるコンクリートの冷却

ミキサ内部の形状を図一1に示す。このミキサは, 横二軸強制練りミキサで容量 2.0 m<sup>3</sup>, 回転数は 23.5 rpm である。液体窒素の投入は, 図一1に示すように, 両側面各2箇所から計4本のノズル (材質はテフロン) を用いて行なった。ノズル径は, 内径 18 mm とし, ノズルの断面積の合計はアジテータの冷却の場合と同一とした。

### 2.4. 測定項目および方法

2.4.1. 液体窒素使用量の測定 液体窒素の使用量は, タンクローリー車に付いている液面計と各実験の前後におけるタンクローリー車の重量差から求めた。

2.4.2. フレッシュコンクリートの試験 フレッシュコンクリートの品質の変化を調べるため, スランプ, 空気量, 単位容積重量, コンクリート温度, ブリージング量の測定およびコンクリートの凝結試験を行なった。各試験はそれぞれ以下の方法に準じて行なった。

スランプ試験: JIS A 1101

空気量試験: JIS A 1128

(空気室圧力法)

単位容積重量: 空気量測定器の容積と容器内のコンクリート重量から算出

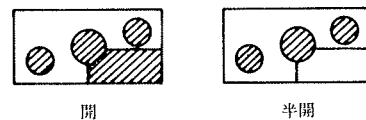
コンクリート温度: アルコール温度計

ブリージング試験: JIS A 1123

凝結試験: ASTM C 403

| 項目 No. | 冷却法   | 投入圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 投入時間 (秒) | 開放度 | 回転数 (r.p.m) | スランプ (cm) | 備考    |
|--------|-------|-----------------------------|----------|-----|-------------|-----------|-------|
| 1      | アジテータ | 3.0                         | 120      | 開   | 30          | 18        |       |
| 2      |       | 1.5                         | 150      | 半開  | 20          |           |       |
| 3      |       |                             | 160      |     | 30          |           |       |
| 4      |       | 3.0                         | 137      |     | 12          |           |       |
| 5      | ミキサ   | 3.0                         | 60       | —   | 23.5        | 18        | 混練後に却 |
| 6      |       | 2.0                         | 120      |     |             |           | 混練中に却 |
| 7      |       | 3.0                         | 60       |     |             |           |       |

開放度: 開…ふた面積の40%開放 半開…ふた面積の15%開放  
 \*1 断熱は, アジテータ本体および液体窒素投入配管について行なった。材料は, ウレタン, グラスウールを使用した。  
 \*2 開放度とは, アジテータにおけるふたの開閉状態を示しており, 下図で示すように開, 半開, を定めた。開放部を斜線で示す。



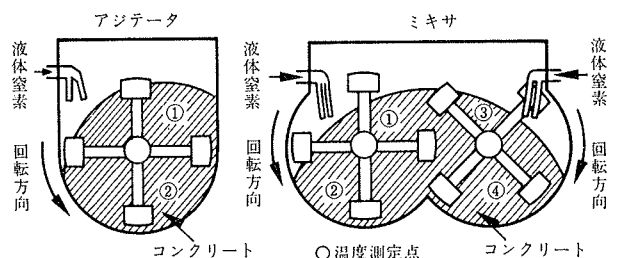
表一1 実験要因と組合せ

|     | 産地 | 種類  | 最大寸法 (mm) | 比重   | 吸水率 (%) | 粗粒率  |
|-----|----|-----|-----------|------|---------|------|
| 細骨材 | 城陽 | 山砂  | 5         | 2.58 | 1.70    | 2.79 |
| 粗骨材 | 城陽 | 砕石  | 25        | 2.58 | 0.66    | 7.25 |
|     | 城陽 | 川砂利 | 25        | 2.63 | 0.62    | 6.93 |

表一2 細・粗骨材の性質

|   | 目標スランプ (cm) | 目標空気量 (%) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |     |     |                          |
|---|-------------|-----------|------------|----------|--------------------------|------|-----|-----|-----|--------------------------|
|   |             |           |            |          | 水                        | セメント | 細骨材 | 粗骨材 |     | 混和剤 (cc/m <sup>3</sup> ) |
|   |             |           |            |          |                          |      |     | 砕石  | 川砂利 |                          |
| A | 12          | 4±1       | 50         | 40       | 169                      | 338  | 706 | 438 | 658 | 905                      |
| B | 18          | 4±1       | 50         | 40       | 186                      | 372  | 677 | 420 | 626 | 1013                     |

表一3 コンクリートの配合



図一1 アジテータおよびミキサ

2.4.3. 硬化したコンクリートの試験 硬化したコンクリートの品質として、標準養生供試体による圧縮強度試験（材令7日、28日）を行なった。供試体は、φ100×200 mmの大きさとし、冷却前・後で比較した。

2.4.4. 温度分布測定 温度分布の測定は、C-C型熱電対を長さ1.5 mの塩ビパイプに先端および先端から50 cmの位置に取り付けたものを3本用いて行なった。測定は冷却前後とし、ミキサ、またはアジテータ内のコンクリートに挿入行なった。測定は、自動デジタルひずみ測定器 TDS-301, ASW-50AT（東京測器）により自動計測した。

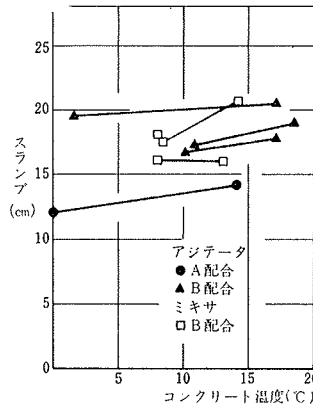


図-2 スランプとコンクリート温度との関係

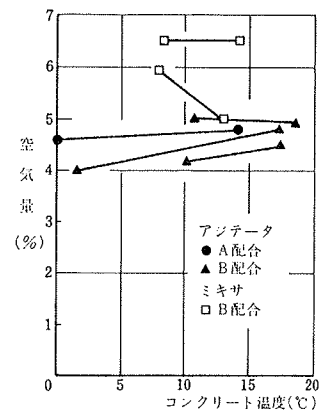


図-3 空気量とコンクリート温度との関係

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. フレッシュコンクリートの性質

各冷却方法とそれに伴うフレッシュコンクリートの性質（スランプ、空気量、温度）を表-4に示す。コンクリートの温度とスランプ、空気量の関係を図-2~3に、冷却前後におけるスランプ、空気量の比較を図-4~5に示す。

冷却前後におけるスランプの低下量は、0~3.0 cmであった。空気量は、-0.8~+0.9%変化した。ミキサ内の冷却では（その1）報告で示した生コン車の結果同様、空気量が1%弱増えた。しかし、アジテータ内の冷却では、スランプ、空気量の変化はミキサで冷却した場合に比べ、小さかった。これは、生コン車やミキサのように練り混ぜ性能が高くないため、空気の巻き込みがほとんど生じなかったためと考えられる。

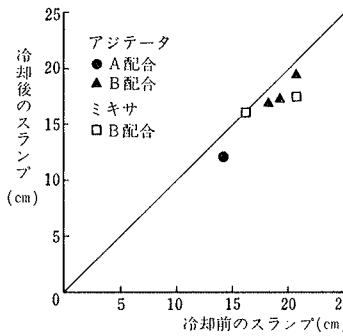


図-4 冷却前後のスランプの比較

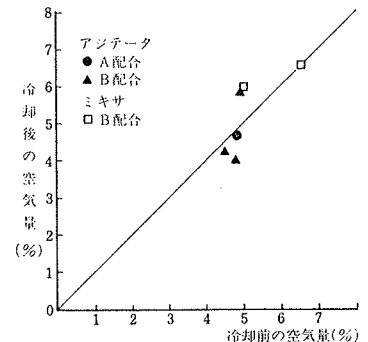


図-5 冷却前後の空気量の比較

最終ブリージング率とコンクリート温度の関係を図-6に示す。これによると液体窒素により冷却されたコンクリートの最終ブリージング率は1.3~2.6%小さくなった。

プロクター貫入抵抗試験結果の一例を図-7~8に示

| No. | 配合 <sup>1)</sup> | 冷却方法                        |   |          | 開放度 | 攪拌羽根の回転数 (r.p.m) | スランプ (cm) 前/後 | 空気量 (%) 前/後 | コンクリート温度 (°C) 前/後 | アジテータ内温度 (°C) (平均) | 冷却必要量 | 冷却効率 (%) |
|-----|------------------|-----------------------------|---|----------|-----|------------------|---------------|-------------|-------------------|--------------------|-------|----------|
|     |                  | LN <sub>2</sub> 2) 使用量 (kg) | 投入圧力 <sup>3)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 冷却時間 (秒) |     |                  |               |             |                   |                    |       |          |
| 1   | B                | 300                         | 3.2                                       | 120      | 開   | 30               | 20.5          | 4.8         | 17.0              | 1.2~4.8            | 10.75 | 52.1     |
|     |                  | 330                         | 2.9                                       |          |     |                  | 19.5          | 4.0         | 1.5               | (2.8)              |       |          |
| 2   | B                | 230                         | 1.6                                       | 150      | 半開  | 20               | 18.0          | 4.5         | 17.1              | 4.7~15.5           | 15.26 | 36.7     |
|     |                  | 208                         | 1.5                                       |          |     |                  | 17.0          | 4.2         | 10.0              | (10.5)             |       |          |
| 3   | B                | 260                         | 1.6                                       | 160      | 半開  | 30               | 19.0          | 4.9         | 18.3              | 5.8~12.8           | 14.95 | 37.5     |
|     |                  | 222                         | 1.6                                       |          |     |                  | 17.5          | 5.0         | 10.8              | (9.7)              |       |          |
| 4   | A                | 280                         | 3.0                                       | 137      | 半開  | 30               | 14.0          | 4.8         | 14.0              | 0.7~3.0            | 11.08 | 50.5     |
|     |                  | 300                         | 2.9                                       |          |     |                  | 12.0          | 4.6         | -0.1              | (1.5)              |       |          |
| 5   | B                | 120                         | 3.0                                       | 60       | —   | 24               | 16.0          | 5.0         | 12.8              | 5.8~8.4            | 15.25 | 36.7     |
|     |                  | 145                         | 3.0                                       |          |     |                  | 16.0          | 5.9         | 7.9               | (7.2)              |       |          |
| 6   | B                | 170                         | 2.0                                       | 120      | —   | 24               | 20.5          | 6.5         | 14.1              | 6.5~8.9            | 17.42 | 32.2     |
|     |                  | 200                         | 1.9                                       |          |     |                  | 17.5          | 6.5         | 8.3               | (8.0)              |       |          |
| 7   | B                | 150                         | 3.0                                       | 60       | —   | 24               | —             | —           | (12.8)            | 4.1~6.0            | 15.57 | 36.0     |
|     |                  | 145                         | 3.0                                       |          |     |                  | 18.0          | 6.0         | 8.0               | (4.9)              |       |          |

1)A: スランプ18cm, B: スランプ12cm, 2)上段: 液面計, 下段: ローリー計量 3)上段: 冷却前, 下段: 冷却後

表-4 フレッシュコンクリートの性質

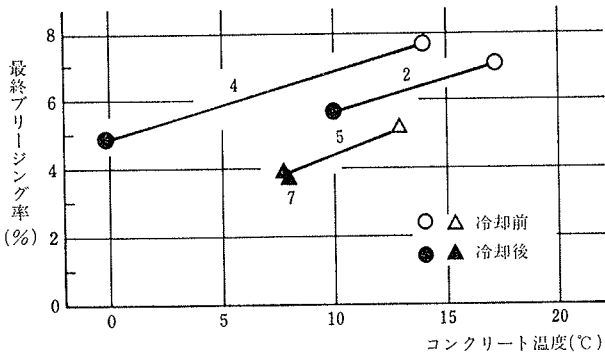


図-6 プリージング試験結果

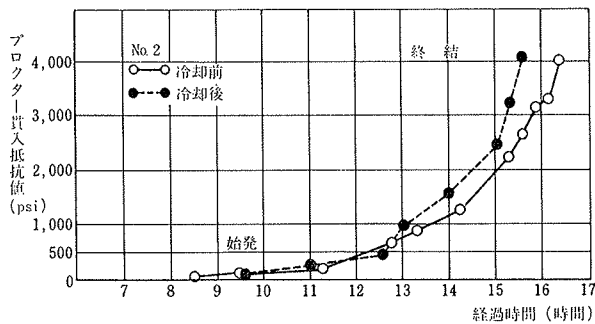


図-7 凝結試験結果 (No. 2)

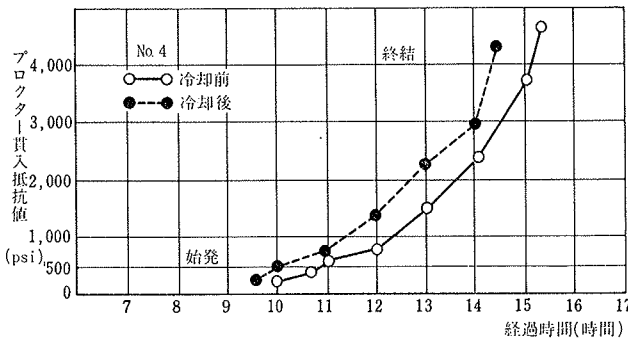


図-8 凝結試験結果 (No. 4)

す。凝結開始および凝結終了時ともに冷却した場合の方が約30分程早くなった。

### 3.2. 硬化コンクリートの性質

冷却前後のコンクリートの標準養生供試体における圧縮強度試験結果を表-5に示す。これによると液体窒素により冷却したコンクリートの強度は、冷却しないものに比べて材令1週、4週ともに、若干高くなる傾向が認められた。

### 3.3. コンクリート温度の均一性

冷却後におけるアジテータ内、ミキサ内の温度状態を表-6に示す。コンクリート内部の温度差は、アジテータの場合、2.3~10.8°C、ミキサの場合、1.9~2.5°Cとなった。ミキサに比べ、アジテータの温度分布に幅があるのは、練り混ぜ性能の差によるものと考えられる。

| No. |     | 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |     | 単位容積重量 (t/m <sup>3</sup> ) |      |
|-----|-----|-----------------------------|-----|----------------------------|------|
|     |     | 1 W                         | 4 W | 1 W                        | 4 W  |
| 2   | 冷却前 | 218                         | 376 | 2.32                       | 2.32 |
|     | 冷却後 | 246                         | 397 | 2.32                       | 2.32 |
| 4   | 冷却前 | 211                         | 382 | 2.32                       | 2.33 |
|     | 冷却後 | 237                         | 382 | 2.32                       | 2.33 |
| 5   | 冷却前 | 263                         | 395 | 2.28                       | 2.31 |
|     | 冷却後 | 274                         | 397 | 2.28                       | 2.30 |

表-5 圧縮強度および単位容積重量

| No. | 温度分布 (°C) |      |     |     | 平均温度 (°C) | 最大温度差 (°C) |
|-----|-----------|------|-----|-----|-----------|------------|
|     | 1         | 2    | 3   | 4   |           |            |
| 1   | 3.7       | 2.6  | —   | —   | 2.8       | 3.7        |
|     | 1.2       | 1.6  | —   | —   |           |            |
|     | 2.6       | 4.9  | —   | —   |           |            |
| 2   | 19.6      | 15.5 | —   | —   | 10.5      | 10.8       |
|     | 7.1       | 4.7  | —   | —   |           |            |
|     | 12.1      | 14.1 | —   | —   |           |            |
| 3   | 9.3       | 11.9 | —   | —   | 9.7       | 7.0        |
|     | 6.3       | 5.8  | —   | —   |           |            |
|     | 12.3      | 12.8 | —   | —   |           |            |
| 4   | 0.7       | —    | —   | —   | 1.5       | 2.3        |
|     | 3.0       | 1.5  | —   | —   |           |            |
|     | 0.7       | 1.6  | —   | —   |           |            |
| 5   | 6.8       | 7.6  | 7.6 | 5.9 | 7.2       | 2.5        |
|     | 7.5       | 6.8  | 8.4 | 7.1 |           |            |
| 6   | 7.4       | 7.8  | 8.6 | 8.3 | 8.0       | 2.4        |
|     | 6.5       | 8.3  | 8.3 | 8.9 |           |            |
| 7   | 4.1       | 4.7  | 4.8 | 5.0 | 4.9       | 1.9        |
|     | 5.6       | 6.0  | 4.4 | 4.6 |           |            |

表-6 コンクリート温度の分布

### 3.4. 冷却効率

液体窒素の使用量は、タンクローリー車に付いている液面計と冷却前後におけるタンクローリー車の重量差の2方法で求めたが、ここでは、後者の測定値を用いた。

表-7は、液体窒素の使用量を直接求めたものと全使用量を液体窒素の投入時間とローリー車の投入圧力の積の比で分配して求めた値(換算値)を示す。図-9は、この両者を比較したものである。換算値は、ローリーの計測値の98~120%の範囲に分散した。

図-10~11は、投入圧力と1m<sup>3</sup>のコンクリートを1°C冷却するのに必要とする液体窒素の使用量、冷却効率との関係を示す。ここで、冷却効率<sup>(注1)</sup>とは、コンクリートの冷却のために使用した冷熱量の液体窒素の有する全冷熱量(潜熱および顕熱)に対する割合とした。

図-12は、今までに行なった液体窒素によるコンクリートクーリングの実験結果(生コン車による冷却)と今回のアジテータ、ミキサの結果を合わせて示した。

これらの結果、投入圧力が高いほど冷却効率は高くなり、圧力1.0 kg/cm<sup>2</sup>上昇させると5~10%程度効率は上昇する。冷却効率は圧力3 kg/cm<sup>2</sup>の場合においてアジテータで約50%、ミキサで約35%であった。しかし、ミキサの場合、効率は高くなかったけれども冷却したコンクリートの温度分布はほぼ一様となった。

投入圧力3.0 kg/cm<sup>2</sup>の場合で開放度を比較したNo. 1, No. 4の冷却効率は大きく、この実験結果においては、開放度の影響はほとんど認められなかった。

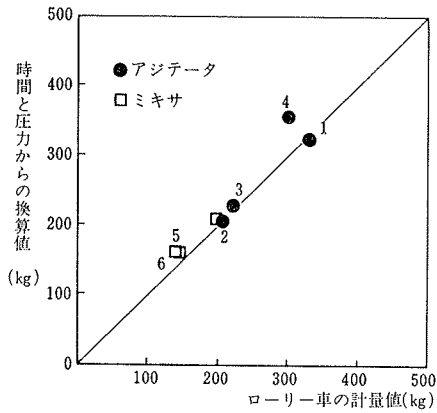


図-9 計量値および換算値

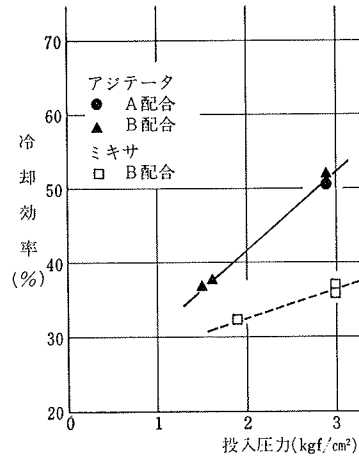


図-10 冷却効率

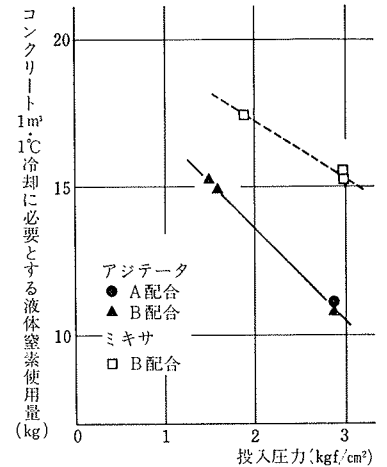


図-11 液体窒素の使用量

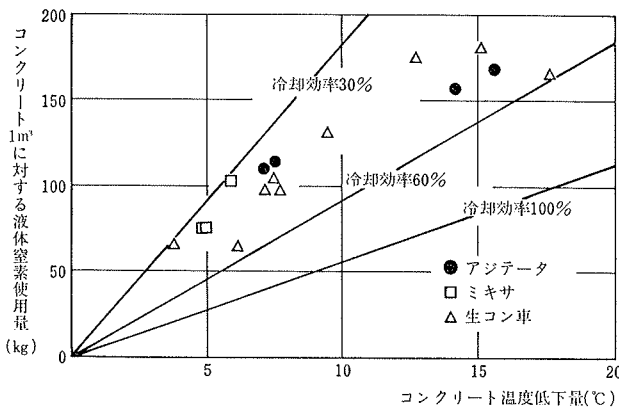


図-12 既往の液体窒素による冷却実験との比較

#### 4. まとめ

バッチャープラントのミキサ内およびアジテータ内に液体窒素を投入し、コンクリートを冷却する方法を試みた。この結果、以下のことが明らかとなった。

(1) フレッシュコンクリートの性質として、スランプは、冷却により若干低下するが大きな変化ではない。空気量は、アジテータの場合、ほとんど変化しなかった。

ミキサの場合は、生コンの場合同様、攪拌の影響により空気量が増加した。

(2) 材令1週、4週における標準養生供試体の圧縮強度は、冷却前の供試体と比較して、若干高くなった。

(3) 冷却効率は、液体窒素の投入圧力 3 kg/cm<sup>2</sup> の場合で、アジテータで約50%、ミキサでは約35%であった。

(4) 開放度の影響はあまり顕著ではなかった。

#### 付 記

この研究は、大阪ガス(株)と当社の共同研究の成果を

注1) 1 m<sup>3</sup> のコンクリートを1°C 冷却するために、5.6 kg の液体窒素を必要とする場合を冷却効率100とした。これは、コンクリートの比熱を 0.24 kcal/kg・°C 単位容積重量を 2,350 kg/m<sup>3</sup> として計算して求めた値である。

|   | コンクリートの冷却温度(°C) | 重量測定による算定               |                              |         | 時間と圧力からの算定              |                              |         |
|---|-----------------|-------------------------|------------------------------|---------|-------------------------|------------------------------|---------|
|   |                 | LN <sub>2</sub> 使用量(kg) | 冷却必要量(kg/m <sup>3</sup> ・°C) | 冷却効率(%) | LN <sub>2</sub> 使用量(kg) | 冷却必要量(kg/m <sup>3</sup> ・°C) | 冷却効率(%) |
| 1 | 15.5            | 330                     | 10.75                        | 52.1    | 325                     | 10.59                        | 52.9    |
| 2 | 7.1             | 208                     | 15.26                        | 36.7    | 207                     | 15.18                        | 36.9    |
| 3 | 7.5             | 222                     | 14.95                        | 37.5    | 228                     | 15.35                        | 36.5    |
| 4 | 14.1            | 300                     | 11.08                        | 50.5    | 359                     | 13.26                        | 42.2    |
| 5 | 4.9             | 145                     | 15.25                        | 36.7    | 160                     | 16.83                        | 33.3    |
| 6 | 5.8             | 200                     | 17.42                        | 32.2    | 208                     | 18.11                        | 30.9    |
| 7 | 4.8             | 145                     | 15.57                        | 36.0    | 160                     | 17.18                        | 32.6    |

冷却効率は、冷却必要量 5.6kg/m<sup>3</sup>・°C を効率100%とした。

表-7 液体窒素使用量と冷却効率

まとめたものであることを付記します。また、この研究は、社内研究開発グループ「液体窒素によるコンクリートクーリング」(扇 啓祐リーダー)、中川武志(本社 技術開発本部土木技術第一部課長)、三浦昭爾(本店 土木部設計課長)、佐藤哲司(本社 技術開発本部土木技術第一部)他の皆様の御協力により実施することができました。厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 中根, 一瀬: 液体窒素によるコンクリートのクーリングに関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 33, (1986), pp. 37~41
- 2) 直井, 浅井, 他: 液体窒素によるコンクリートのプレクーリング, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和61. 8), pp. 295~296
- 3) 直井, 浅井, 他: 液体窒素によるコンクリートのプレクーリングに関する研究(その3), 土木学会第41回年次学術講演概要集, (昭和61. 11), pp. 423~424
- 4) 十河, 中根, 他: 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講演会論文集, (1986), pp. 329~332