

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）

中 根 淳 一 瀬 賢 一
芳 賀 孝 成 十 河 茂 幸
新 開 千 弘

Study on Cooling of Concrete with Liquid Nitrogen (Part 1)

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

Abstract

This report summarizes the necessity for concrete cooling and conventional methods of cooling in placement of hot weather concrete and mass concrete. Next, the report takes up cooling of concrete with liquid nitrogen, and the related types and methods of cooling. Finally, the authors actually cool concrete with liquid nitrogen and study the cooling efficiency and the properties of fresh concrete. As a result, the following are disclosed: (1) Concrete in a truck mixer is cooled 10 degrees within 5 minutes. (2) Cooling efficiency is about 13.8 kg/m³·°C, and this value corresponds to about 41 percent of the quantity of total cooling heat. (3) Properties of fresh concrete are changed very little by cooling with liquid nitrogen.

概 要

この研究では、暑中コンクリートやマスコンクリートにおけるクーリングに注目し、まずその必要性および既往の対策を示した。次に、液体窒素によるコンクリートのクーリングを採りあげ、その種類および方法を述べた。最後に、実際にコンクリートを液体窒素で冷却し、その冷却効率およびまだ固まらないコンクリートの性質を調べた。実験の結果、次のことが分かった。(1) 生コン車1台分のコンクリートを5分以内で10°Cの冷却が可能である。(2) 液体窒素の冷却効率は、約13.8 kg/m³·°Cであり、これは、冷熱量の約41%に相当する。(3) まだ固まらないコンクリートの性質は、液体窒素による冷却で特に大きく変化しない。

1. はじめに

マスコンクリート構造物においては、長期の強度発現の保証および温度ひびわれを発生させないようにするため、コンクリート部材の温度上昇を低減する必要がある。このための主要な対策としてコンクリートのプレクーリングおよびポストクーリングが考えられる。しかし、ともにその効果は認められているものの、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あまり多くない。

諸外国におけるプレクーリングの方法として液体窒素を用いる事例が報告されている。この方法は、ニュージーランド、オーストラリア、アメリカなどですでに十数

例行なわれている。特にニュージーランドでは、この方法の適用事例が多い。また、ヨーロッパにおいても、1980年代に入って、実用の段階に入ったものと推察される。この液体窒素によるコンクリートのクーリング方法は、我が国においてまだ実施されていないが、その卓越した冷却能力、適用の容易性を利用すれば、コンクリートの品質向上に有効な方法と考えられる。

そこで本研究では、まずコンクリートのクーリングの必要性および既往の対策について述べ、次に液体窒素によるコンクリートのクーリングの種類および方法を述べる。さらに、実際に液体窒素によりコンクリートの冷却を行ない、その冷却効率および冷却されたコンクリートの基礎的性質について考察を加える。

2. マスコンクリートにおけるクリーングの必要性

寸法の大きいコンクリート部材では、コンクリート打込み後セメントの水和反応により水和熱が蓄積され、次のような問題点を有している。

2.1. 構造体コンクリートの長期の強度発現の不良

図-1は、夏期に打設した同一調合のコンクリート部材の強度発現を、練り上がり温度の違いとの関連で整理したものである。

図-2は、部材が履歴した最高温度と標準水中養生供試体に対する部材コンクリートの相対強度比の関係を示すものである。

これらの図より明らかのように、部材最高温度が高くなるほど長期強度および相対強度比が下る。マスコンクリートにおいて材令13週を強度管理材令とした場合、部材最高温度が60°C以上の高温を受けると、相対強度比は80~70%まで下る。これは、強度管理用の標準水中養

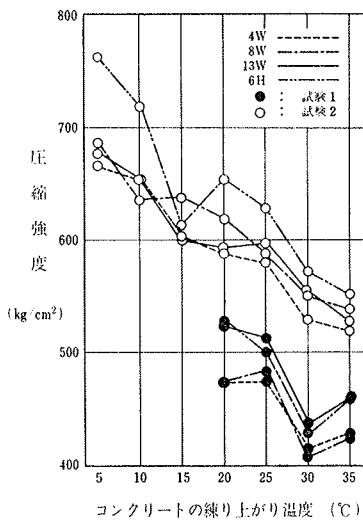


図-1 圧縮強度と練り上がり温度の関係(夏期)²⁾

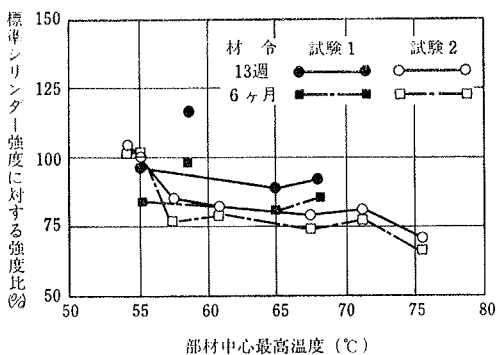


図-2 部材コンクリート相対強度比と部材中心最高温度の関係²⁾

生シリンダーで設計基準強度を満足しても、部材コンクリート強度が、必ずしも設計基準強度を満たしているとは言えないことを示す。

2.2. 温度ひびわれ発生の危険性の増大

マスコンクリートにおいて、初期水和熱発生後の温度降下による変形が、周囲構造物などにより拘束されると、部材コンクリートに引張応力が生じる。それがコンクリートの引張強度を超えた時、ひびわれを発生させることになる。図-3は、打込み温度を5~35°Cまで5°Cピッチで変えた時の部材コンクリート温度履歴の計測結果を示す。図-4は、図中に示すモデルを用い、図-3の結果を基に各部材に生じる応力をコンクリート引張強度の発現と比較したものである。

これによると、打込み温度が高いほど、部材コンクリート最高温度が高くなり、部材に生ずる応力も大きくなる。このことから、温度ひびわれ発生の危険性を低減するには、できるだけ打込み時のコンクリート温度を低くすると非常に効果があることが分かる。

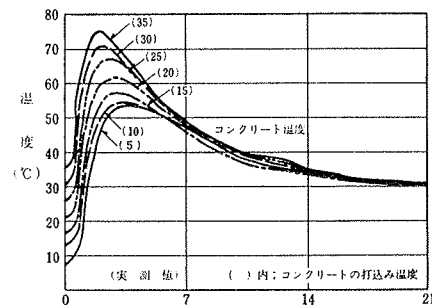


図-3 各練り上がり温度における打設後の温度履歴

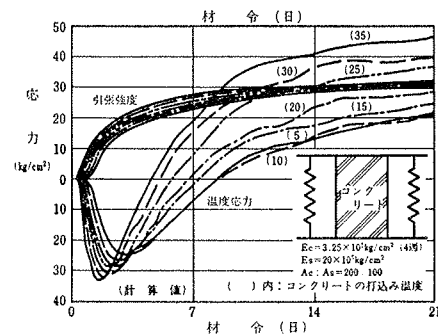


図-4 各練り上がり温度における引張強度と温度応力の関係

3. コンクリートのクーリング方法

3.1. 既往の対策

マスコンクリートの水和熱による温度上昇を低減させる既往の方法として次に示すような対策がある。

(1) 使用材料の選定

フライアッシュセメントや中庸熱セメントなど低発熱型セメントの使用, 低スランプ, 流動化剤の使用による単位セメント量の低減などが考えられるが, 低減幅に限界がある。

(2) 施工上の対策

打込み区画を小割りにすることや打込み時間を早朝, 深夜にすることなどが考えられるが, 工期および工費への影響が大きい。

(3) プレクーリング

練り混ぜ水として冷水や氷が使用されるが, 設備投資に膨大な費用がかかるため, 大規模コンクリート工事の場合でなければコンクリートの単価が高くなる。また, 冷却温度を調節することが難しいのみならず, 約 15°C が冷却幅の限度である。

(4) ポストクーリング

ポストクーリングの方法としてパイプクーリングが一般的であるが, ①鉄筋や配管などが複雑な構造物には, 適用しにくいこと。②配管に対する後処理が必要なこと, などにより適用上の制約が大きい。

3.2. 液体窒素によるプレクーリングの方法

諸外国では, 液体窒素によるプレクーリングの方法として以下の方法が実施または考案されている。

(1) 液体窒素により冷水およびシャーベット状に練り混ぜ水を製造する方法

この方法は, 水の冷却熱源として電気を使うか, 液体窒素を使うかの違いだけであり, 機械設備投資額は, かなり高くなる。

(2) 骨材を冷却する方法

1972年オーストラリアで実施された例がある。しかし, ①冷却効果が小さいこと。②骨材が凍結すると管理に難点があること。③混練りまでに元の温度に戻る可能性があること, などのためあまり普及していない。

(3) 生コンクリートの直接冷却方法

一般に上記(1), (2)に示すような大規模な固定式の設備投資は不要であり, 液体窒素投入装置があれば, 生コンプラント, 現場どちらでも冷却が可能となる。また, 冷却温度の限界がなく, 液体窒素の投入量を管理することにより所定の温度に冷却できる。

(4) 間接冷却方法

クローズドシステムにより, 冷熱をコンクリートと間接的に熱交換をさせることによって高い熱効率を得ることができる。しかし, 実用に際しては大規模な設備を必要とする。この方法については, 現在のところまだ実施されていない。

4. 実験概要

4.1. 目的

コンクリートの冷却方法として, 現在のところ直接冷却法が最も簡便かつ実用的であることが分かった。しかし, その冷却効率, 冷却されたコンクリートの基礎的性質について述べた文献は少なく, その実態は正確につかまれていない。そこでこの報告では, これらの点を明らかにすべく, 以下の実験を計画した。

4.2. 実験条件

実験条件の組合わせを表-1に示す。この実験における主な要因は, 液体窒素の投入圧力, 冷却時間, 流動化剤添加の有無である。実験は, 5 m³ 積載の生コン車 5 台を用意した。

| 項目 No | 液体窒素 の投入 | 投入 圧力 (kg/cm ²) | 投入 時間 (分) | 冷却コン クリート 量 (m ³) | 測定時間 |
|----------|-------------|-----------------------------------|-----------------|--|---|
| 1 | 有 | 5.0 | 5.0 | 5 | ①生コン車到着時 ②液体窒素投入後 |
| 2 | 有 | 8.0 | 2.5 | 5 | ①生コン車到着時 ②液体窒素投入後 |
| 3 | 無 | — | (5.0) | (5) | ①生コン車到着時 ②2.5分高速回転後 ③5.0分高速回転後 |
| 4 | 有 | 5.0 | 3.0 | 4 | ①生コン車到着時 ②流動化後 ③液体窒素 3.0分投入後 ④液体窒素 4.5分投入後 |
| | | | 4.5 | 3 | |
| 5 | 有 | 5.0 | 3.0 | 4 | ①生コン車到着時 ②液体窒素 3.0分投入後 ③液体窒素 4.5分投入後 |
| | | | 4.5 | 3 | |

表-1 実験条件の組合わせ

4.3. 使用材料および調査

実験に使用した骨材の種類と性質を表-2に示す。セメントは, 普通ポルトランドセメントを使用し, 混和剤は, AE 減水剤, 流動化剤を用いた。コンクリートの割合を表-3に示す。

| 項目 | 産地 | 種類 | 混合比 (%) | 最大寸法 (mm) | 比重 | 吸水率 (%) | 実積率 (%) | 洗い試験 (%) |
|-----|-------|-----|------------|--------------|------|------------|------------|-------------|
| | | | | | | | | |
| 細骨材 | 熊谷・荒川 | 川砂 | 75 | 5 | 2.61 | 1.78 | 64.2 | 1.6 |
| | | | 25 | 5 | | | | |
| 粗骨材 | 熊谷・荒川 | 川砂利 | 50 | 25 | 2.67 | 0.96 | 62.2 | 0.6 |
| | | | 名栗 | 百炭石・砂石 | | | | |

表-2 細・粗骨材の種類と性質

| 骨材の 最大寸法 (mm) | 目 スランプ (cm) | 目 空気量 (%) | 水セ メント 比 (%) | 骨 材 率 (%) | 単位体積重量 (kg/m ³) | | | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|------|-----|-------|-------------------|
| | | | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | |
| 25 | 8 *(8→18) | 4 | 50.5 | 43.3 | 160 | 317 | 791 | 1,060 | 0.739 **(2.37) |

* 流動化コンクリートの場合 ** 流動化剤の添加量

表-3 コンクリートの割合

4.4. 冷却方法

液体窒素によるコンクリートの冷却方法は, 液体窒素を, タンクローリー車のタンクからフレキシブルホースを通じ投入ノズル (径 28 mm, 長さ 2.0 m の鋼管) により生コン車のホッパーから投入した (写真-1)。投入

ノズルの先端からコンクリートまでの距離は、約 50 cm 程度とした。液体窒素の投入圧力は、タンクローリー車の制御装置で調節した。生コン車のドラムは、液体窒素投入の間、高速回転させた。

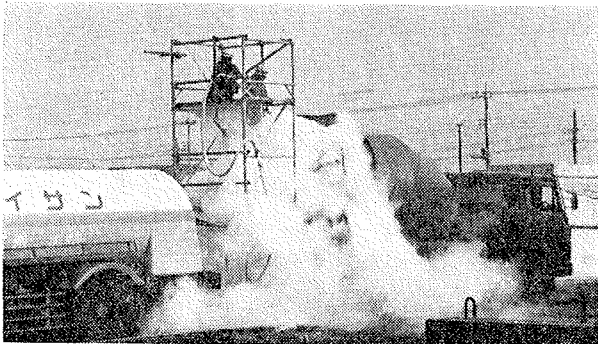


写真-1 コンクリートへの液体窒素直接投入状態

4.5. 測定項目およびその方法

(1) 冷却効果の測定

各生コン車に使用した液体窒素の投入量は、タンクローリー車に付いている液面計とタンクローリー車の実験前・後の重量差から計算により求める。液体窒素による冷却効果は、コンクリートを 1°C 下げるのに必要とする液体窒素の量で比較する。

(2) まだ固まらないコンクリートの性質

スランプ、空気量、単位容積重量、コンクリート温度およびブリージング量を JIS に基づいて測定した。

5. 実験結果および考察

5.1. 冷却効率

液体窒素の使用量とコンクリート温度の低下量との関係を図-5 に示す。また、各生コン車における冷却効率を表-4 に示す。これによるとコンクリート温度の低下量と液体窒素の使用量はほぼ比例しており、5 m³ のコンクリートを投入圧力 5 kg/cm² で 5 分以内に 10°C 下げることができた。冷却効率は、コンクリート 1 m³、1°C の冷却に対し、液体窒素を 10.8~17.5 kg (平均で 13.8 kg) 必要とした。これは、液体窒素の有する冷熱量の 32~52% (平均で 41%) にあたる。また冷却効率は、コンクリート量の多少に影響されない。投入圧力と投入時間の関係は、反比例しており、投入圧力が高ければ短い投入時間で冷却できた。しかし、投入圧力を高めた場合、コンクリートの飛散が激しくなり、冷却効率には大きな影響を与えなかったもののコンクリートが分離しないように注意しなければならない。

5.2. コンクリートの性質

冷却に伴うスランプと温度、空気量と温度の関係をそれぞれ図-6、7 に示す。これによると、普通コンクリートを液体窒素で冷却した場合、スランプが約 1.5 cm、

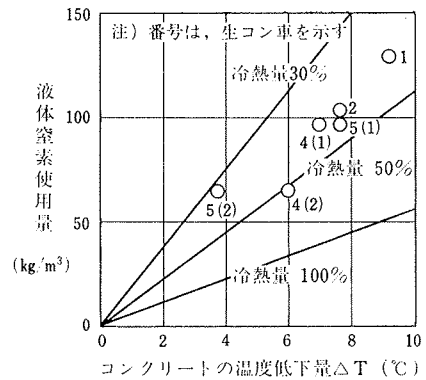


図-5 液体窒素使用量とコンクリート温度低下量の関係

| 生コン車 No | コンクリート量 Vc (m ³) | 液体窒素投入圧 P (kg/cm ²) | 投入時間 t (分) | コンクリート温度低下量 ΔT (°C) | 液体窒素使用量 L (kg) | 冷却効率 E (kg/m ³ °C) | 使用した冷熱量 (%) |
|---------|------------------------------|---------------------------------|------------|---------------------|----------------|-------------------------------|-------------|
| 1 | 5 | 5.0 | 5 | 9.3 (14.3→5.0) | 647 | 13.9 | 40.3 |
| 2 | 5 | 8.0 | 2.5 | 7.3 (13.5→6.2) | 518 | 14.2 | 39.4 |
| 4 | 4 | 5.0 | 3 | 7.0 (14.5→7.5) | 388 | 13.9 | 40.3 |
| | 3 | 5.0 | +1.5 | 6.0 (7.5→1.5) | 194 | 10.8 | 51.9 |
| 5 | 4 | 5.0 | 3 | 7.6 (15.1→7.5) | 388 | 12.8 | 43.8 |
| | 3 | 5.0 | +1.5 | 3.7 (7.5→3.8) | 194 | 17.5 | 32.0 |

表-4 液体窒素によるコンクリートの冷却効果

空気量が 0.5~1.8% 増加した。

この現象は、液体窒素による冷却のために生じるのではなく、図-6、7 に示す No. 3 の結果からも明らかのように、生コン車の高速回転の影響、低い温度に対するコンクリートの軟化の影響によるものと考えられる。しかし、流動化コンクリートにおいては、逆にスランプ、空気量ともに低下した。これは、冷却により流動化剤の界面活性作用が低下したため、その冷却された温度に対応する流動化剤の必要量を確保できなかったことによると思われる。

最終ブリージング率とコンクリートの冷却温度の関係を図-8 に示す。これによると、流動化コンクリートの場合、流動化直後の試料による最終ブリージングが 2.90% に対し、液体窒素による冷却後 1.92%、1.53%、と 1~1.4% の減少を示したが、流動化前の試料と比べると大きな差はなかった。普通コンクリートの場合、冷却前後において、大きな差はなかった。

この結果から、液体窒素の冷却によるブリージングの変化は、ほとんどないと考えられる。

今回の実験では、コンクリートの冷却前後の性状把握に重点をおいた。コンクリートの強度については、マスコンクリート状態のデータが十分でなかったため、ここでの考察を割愛した。

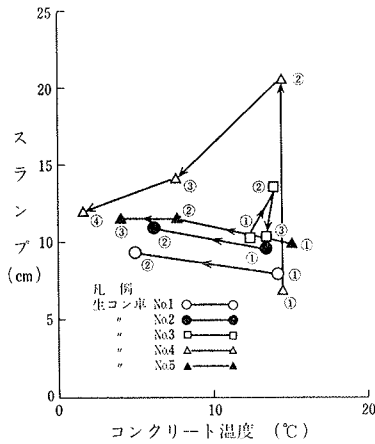


図-6 スランプとコンクリート温度の関係

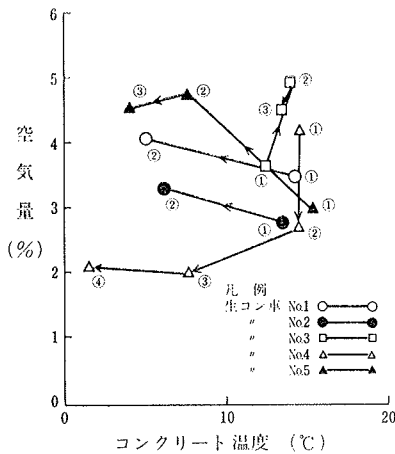


図-7 空気量とコンクリート温度の関係

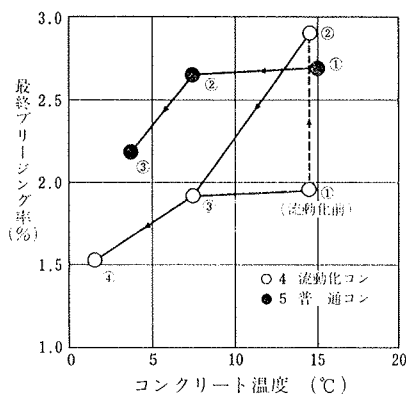


図-8 最終ブリージング率とコンクリート温度の関係

6. まとめ

この報告は、液体窒素によるコンクリートのプレクーリングの実用に先がけ、その必要性および実際に冷却実験を行ないその冷却効率、まだ固まらないコンクリートの性質を調べた。得られた結論を以下に示す。

(1) 5 m³ のコンクリートを5分以内で約 10°C 冷却可能である。

(2) 現在のところ直接冷却法による冷却効率は、約 13.8 kg/m³°C であり、これは、液体窒素の冷熱量の約 41% に相当する。

(3) まだ固まらないコンクリートの性質は、普通コンクリートの場合、液体窒素による冷却によって、スランプ、空気量、ブリージング量などに特に大きな影響を及ぼさない。

今後の研究としては、夏期に打設されたコンクリートを液体窒素により冷却し、その強度発現、温度ひびわれの状態についての検討を行なう。また、冷却効率向上の開発についても行なう予定である。

付 記

この研究は、大阪ガス株式会社と当社の共同研究の成果をまとめたものであることを付記します。また、この研究は、社内第一専門委員会「液体窒素によるコンクリートクーリング小委員会」の各委員（中川武志チーフ、三浦昭爾委員、上野孝之委員、田中保雄委員、佐藤哲司幹事）および遠藤正人職員（横浜支店土木部）の協力により実施することができました。関係各位の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) K. R. Henrikser: Avoidance of cracking at construction joints between solid concrete sections. Cooling of fresh concrete with liquid nitrogen, Nordisk Betong, No. 1, (1983), pp. 17~21, pp. 24~27
- 2) 井上勝弘, 他: PCCV 用高強度マスコンクリートの品質管理に関する実験的研究(その1)~(その7), 日本建築学会大会論文学術講演梗概集 A, (昭和60.10), pp. 313~326