

液体窒素クーリングにおける白煙発生メカニズムと対策

飛鳥建設(株) 正会員 ○榎島 修
飛鳥建設(株) 正会員 小林 剛
飛鳥建設(株) 正会員 川里麻莉子

1. はじめに

液体窒素クーリング工法は、 -196°C の液体窒素を生コン車に投入してコンクリートを冷却させる工法であり、マスコンクリートの温度ひび割れ対策としての有効性が確認されている¹⁾。液体窒素クーリングでは、コンクリート温度を 1°C 低下させるために必要な液体窒素の投入量は、 1m^3 当たり 12kg との報告²⁾があり、生コン車1台 4.5m^3 のコンクリートを 5°C 低下させるためには 270kg 必要となる。大量の液体窒素を投入するため、クーリングの実施にあたっては、投入の際に白煙の発生が確認されており、作業性や安全性に影響を与える可能性がある。写真-1にクーリング実施時の白煙発生状況を示す。

本検討では、発生する白煙を回収し、作業に支障が生じない位置に搬送する装置を考案した。また、搬送時の温度計測を行うことで、白煙発生のメカニズムと白煙を消失させるための対策について考察した。

2. 実施概要

2-1 検討対象コンクリート

検討の対象としたコンクリートは、普通セメントを用いた呼び強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ 、目標スランプ 12cm の一般的な配合とした。これに、液体窒素クーリングを適用し、コンクリート温度を 5°C 降下させた。クーリング前後のフレッシュ試験結果を表-1に示す。

2-2 白煙回収および搬送装置概要

白煙の回収は、スチールフレームと透明ビニールシートで構成した $1.8 \times 1.8 \times 0.6\text{m}$ の箱型の回収装置を、液体窒素を投入する生コン車の投入口に設置する方法とした。白煙の搬送は、送風機に直径 500mm の風管 35m を組み合わせた搬送装置を回収装置に取り付け、生コン車から十分に離れた位置に白煙を排出する方法とした。搬送装置は、搬送能力を高めるため、能力の異なる送風機を2台(送風機A:風量 $190\text{m}^3/\text{分}$ 、送風機B:風量 $110\text{m}^3/\text{分}$)使用し、回収装置から 25m

の位置で風管を分岐させる方法をとった。図-1に搬送装置の概要図を示す。

2-3 温度計測概要

温度計測の位置は、図-1に示す白煙の回収装置内1箇所と回収装置から 25m の位置の風管内1箇所および、回収装置から 35m の位置の排出口2箇所の合計4箇所とした。

3. 結果および考察

3-1 白煙回収効果

写真-2に白煙の回収装置および搬送装置を用いた液体窒素クーリング状況を示す。回収装置および搬送装置を用いることで、白煙は回収装置内にとどまり、搬送装置により 35m 先に搬送できることを確認した。

風管から排出される白煙の風量は、風速計を用いた計測により $128\text{m}^3/\text{分}$ と推定された。



写真-1 クーリング実施時の白煙発生状況

表-1 クーリング前後のフレッシュ試験結果

試験実施時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)
クーリング前	10.5	4.0	27	26
クーリング後	10.5	3.4	22	26

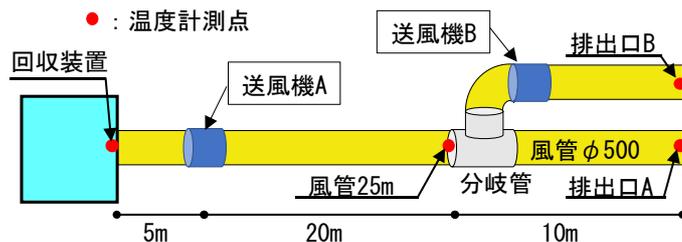


図-1 搬送装置の概要図

キーワード 液体窒素, プレクーリング, 白煙対策, 温度計測

連絡先 〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472 TEL 04-7198-7577

3-2 温度計測結果

温度計測結果を図-2 に示す。回収装置内の温度は、液体窒素の投入直後から時間とともに直線的に低下し、投入30秒後から1分後の30秒間で9.9℃から-10.5℃に約20℃低下した。投入1分15秒以降は、温度低下速度は緩やかになり、1分45秒で-33℃に達した後は、クーリング終了の2分45秒まで-30℃以下を維持する状態であった。

計測された最低温度は、白煙回収装置内で-33.7℃、風管25mの位置で-13.1℃、排出口Aで-9.2℃、排出口Bで-1.5℃となった。

当日の気象条件は、外気温26℃、相対湿度60%と計測されており、図-3 に示す温度と飽和水蒸気量の関係を考慮すると、17.2℃以下で結露が発生し、0℃以下になると結露水が氷結し白煙になったものと考えられる。温度計測結果から、回収装置内は-30℃程度の環境であったことから、大気中の水蒸気量14.6g/m³のほとんどが氷結した結露になっているものと考えられる。

3-3 白煙を消失させるための対策

回収装置から35mの排出口までの間に24.5℃および32.2℃の温度上昇がみられた。この結果から、回収装置から、風管の長さを延長させることで白煙温度を大気温度に近づけられる可能性が考えられた。なお、送風機の発熱の影響を受けていない風管の経路となる「風管25m」と「排出口A」の間10mの温度上昇量は、3.9℃であった。そこで、風管の延長による温度上昇が同様に生じると仮定すれば、排出口Aの最低温度-9.2℃から結露が消失する17.2℃まで26.4℃上昇させるためには、風管を約68m延長する必要がある。

ただし、風管の延長は圧力損失によって風量の低下につながるため、白煙の回収能力を考えた場合に風管の延長だけで白煙を消失させることは現実的でないと考えられた。また、今回の試験当日の気象条件よりも気温と湿度の高い気象条件では、白煙が消失する温度も上昇するため、白煙を消失させるためには、温風を吹き込むなどの熱源が必要になると考える。

4. まとめ

以下に得られた結果をまとめる。

- ① 考案した白煙回収および搬送装置を用いることで、効率的に白煙を回収できることを確認した。
- ② 液体窒素の投入口付近では、最低温度が-33.7℃に達し、大気中の結露が氷点下の低温環境になることで白煙が発生したのと考えられる。



写真-2 回収・搬送装置を用いたクーリング状況

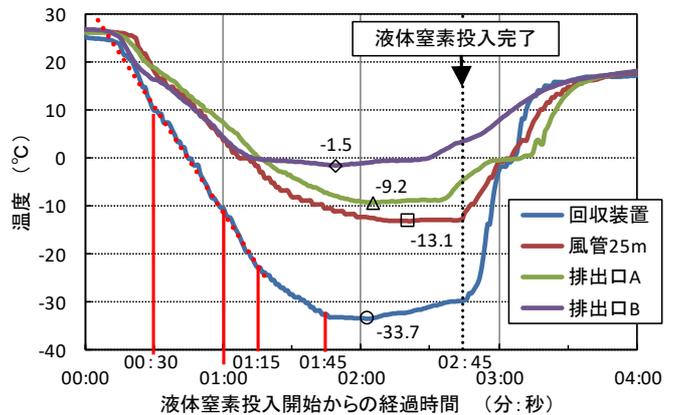


図-2 温度計測結果

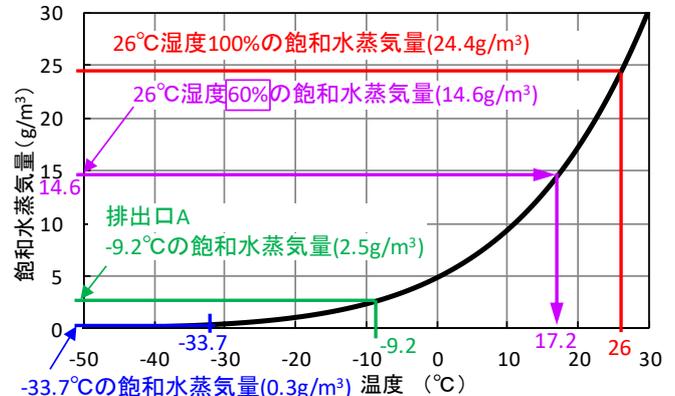


図-3 温度と飽和水蒸気量の関係

- ③ 35mの搬送により、温度は約30℃上昇するが、白煙消失には至らなかった。また、風管を延長させる方法だけでは白煙消失は難しいと考える。

参考文献

- 1) 槇島修, 川里麻莉子: 液体窒素クーリングの適用による温度ひび割れ抑制手法と効果, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, 6-577, pp.1153-1154, 2017.9
- 2) 西脇敬一, 川又篤, 唐沢智之: 液体窒素によるプレクーリング方法に関する基礎研究, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 5-667, pp.1333-1334, 2010.9