

液体窒素クーリング工法の適用時における白煙対策の検討

Removal of White Smoke Generated by Liquid Nitrogen Used for Cooling

小林 剛^{*1}

Takeshi Kobayashi

槇島 修^{*1}

Osamu Makishima

川里 麻莉子^{*2}

Mariko Kawasato

【要旨】

マスコンクリートの温度ひび割れ抑制手法の一つに、液体窒素クーリング工法があり、温度ひび割れ対策としての有効性が確認されている。一方で、水蒸気を含んだ空気が液体窒素の投入によって、急速に冷やされることで白煙が発生する。この白煙の発生により、作業環境の悪化に加え、施工性の低下などの課題があげられる。

これらの課題の解決策として、白煙が発生するアジテータ車のホッパー位置に白煙を一時的に留める回収装置と搬送装置を組み合わせ、作業環境や施工性などへの影響が少ない場所に搬送する「白煙回収システム」を考案した。本報告は、事前検討にて評価した白煙回収性能および白煙減少効果と、実機実験にて確認した白煙回収システムの有効性について報告するものである。

【キーワード】 マスコンクリート 温度ひび割れ 液体窒素 クーリング 白煙

1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れ抑制手法の一つに、液体窒素クーリング工法があり、温度ひび割れ対策としての有効性¹⁾が確認されている。液体窒素クーリング工法は、 -196°C 以下に冷却された液体窒素をアジテータ車内に直接投入し、攪拌することで、コンクリートを急速に冷却するものである。液体窒素投入状況を写真-1に示す。一方で、液体窒素の投入によって、水蒸気を含んだ周辺の空気が急速に冷やされることで白煙が発生する。クーリング実施時の白煙発生状況を写真-2に示す。

この白煙の発生による課題を以下に示す。

- ① 白煙発生に伴う視界不良による、液体窒素の投入作業性の低下
- ② 液体窒素の気化に伴う酸素濃度の低下による、作業環境の悪化
- ③ 運転手の視界不良に伴うアジテータ車の運行の遅延による、打込み速度の低下
- ④ 近隣の車道や民家等への白煙の流出による、トラブル（交通事故、火災通報等）の発生

これらの課題を解決するために求められる白煙対策は、白煙を発生させない方法と、白煙を問題とにならない場所に搬送する方法が考えられる。

そこで筆者らは、白煙が発生するアジテータ車のホッパー位置に白煙を一時的に留める回収装置と搬送装置を組み合わせ、作業環境や施工性などへの影響が少ない場所に搬送する「白煙回収システム」を考案した。

本報告は、事前検討にて評価した白煙回収性能および白煙減少効果と、実機実験にて確認した白煙回収システムの有効性について報告するものである。



写真-1 液体窒素投入状況



写真-2 クーリング実施時の白煙発生状況

1. 技術研究所 研究開発G 第三研究室 2. 土木事業本部 プロジェクト統括部 民間プロジェクトグループ

2. 白煙回収システムの概要

白煙回収システムは、液体窒素投入位置で白煙を一時的に留める回収装置と、留めた白煙を任意の場所に排出する搬送装置で構成する。回収装置の概要を図-1に示す。回収装置は、W1.8m×D1.8m×H0.6mの箱型で、液体窒素による白煙の発生源であるアジテータ車のホッパー部分を覆い、白煙を一時的に留める役割を持つ。液体窒素の投入は、仮設足場からホッパー部に液体窒素投入ノズルを挿入して行われるため、回収装置には、下部にホッパー部を設置するための開口(①)と上部に液体窒素投入ノズルを挿入する挿入口(②)、側面に白煙の排出口(③)を設けた。また、回収装置は装置全体を上下に可動する構造とし、アジテータ車に設置する際には、ホッパー部と回収装置の隙間を最小化した。

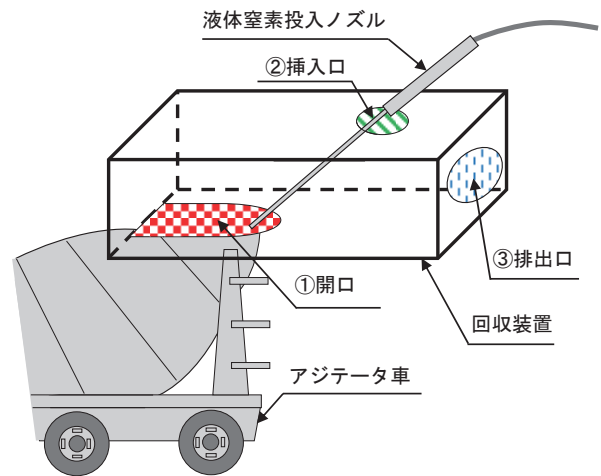


図-1 回収装置の概要

搬送装置は、回収装置に留めた白煙を送風機と風管を用いて所定の位置まで搬送する役割を持つ。液体窒素は気化すると容積が増加する。そのため、発生したすべての白煙の搬送には、投入する液体窒素の気化する体積以上の気体を送風可能な能力が求められる。また、本検討では、特定の工事への適用を考慮し、回収装置からの搬送距離を35mとすれば、作業環境や施工性などを確保できると仮定して各種の検討を行った。

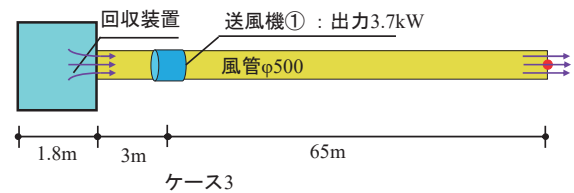
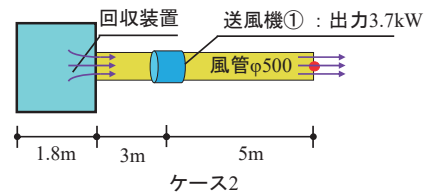
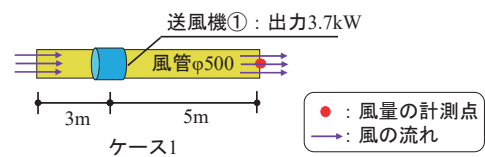


図-2 風量損失の検討概要図

3. 要素実験

3.1 実験概要

(1) 風量損失の検討

搬送装置では、風管を延長するほど風管内で送風抵抗が生じ、送風機が持つ送風能力が低下する。そこで、風管の長さによる風量の損失を把握した。風量損失の検討概要図を図-2に、検討要因と水準を表-1示す。ここでは、風管の長さとして回収装置との接続有無を実験要因として、風管8mと送風機①を組み合わせた「ケース1」と、回収装置を設置した「ケース2」、白煙対策として作業環境や施工性などを確保できると考えた距離の約2倍の68mに風管を延長した「ケース3」の3水準を設定した。また、搬送に使用する送風機の能力を確認するため、送風機単独で運転した際の風量を計測した。

表-1 検討要因と水準

ケース No.	風管の長さ(m)	回収装置との接続有無
1	8	無
2	8	有
3	68	有

(2) 白煙の漏えい検討

回収装置とアジテータ車のホッパー部分の間には僅かな隙間が生じるため、隙間から白煙の漏えいが想定される。同様に、液体窒素投入ノズルの挿入口にも隙間が生じるため、回収装置内が負圧となって、隙間から空気の漏えいが生じない風量を検討した。なお、搬送装置の送風機には、液体窒素が気化する容量の気体も回収する能力が求められる。

ここでは、液体窒素クーリング工法により、コンクリート温度を5℃低下させる場合を想定し、液体窒素の気体発生量を考慮した。アジテータ車1台あたりのコンクリー

ト積載量4.25m³を5℃低下させるために必要な液体窒素の量を260kg³⁾、投入時間を3分⁴⁾とした場合、液体窒素は気化により容積が約700倍となるため、時間あたりの気体発生量は約80m³/minと計算される。そこで、気体発生量に相当する風量の風を送風機②によって回収装置内に送り、隙間から空気の漏えいが生じない能力の送風機①を検討した。白煙の漏えい検討概要図を図-3に示す。送風機②によって回収装置に吹き込む風量は、気体発生量に相当する風量になることの確認と、隙間からの空気の漏えいを吹流しにて目視確認した。漏えい確認方法の概要図を図-4に示す。

3.2 実験結果および考察

(1) 風量損失の検討

風量損失の検討における風量計測結果を表-2に示す。風管の排出口における風量は、「ケース1」で150 m³/min, 「ケース2」で121 m³/min, 「ケース3」で75 m³/minとなった。このことから、回収装置を接続することによる風量の損失は29 m³/minであることが確認された。また、風管を60m延長することにより、46 m³/minの風量の損失が生じ、風管1m当たりの風量損失量としては0.8 m³/min/mであることが確認された。また、搬送に使用した送風機のメーカー仕様と風量の実測値の関係を表-3に示す。このように、各送風機の風量の能力は、メーカー仕様より2割程度低減することを確認した。

(2) 白煙の漏えい検討

白煙の漏えい検討における風量計測結果を表-4に示す。回収装置内部に送風される風量は87 m³/minとなり、想定される気体発生量の約80 m³/minに相当する風量が確保できることを確認した。

また、白煙回収のために選定した能力の高い送風機①では、排出口の風量が128 m³/minとなり、気体発生量に相当する風量を十分に上回ることを確認した。隙間に生じる風は、吹き流しによって、すべての開口において回収装置の外部から内部に流入することを確認した。このことから、本検討で選定した送風機①を用いることで、回収装置から白煙が漏えいすることなく回収できると考えた。また、ここで得られた排出口の風量128 m³/minを白煙回収のための目標値と設定した。

4. 実大モデルの送風確認実験

4.1 実験概要

要素実験の結果を考慮して、発生する白煙を回収可能な能力を確保するために、送風機①、送風機②を組み合わせた白煙の搬送装置を考えた。白煙の搬送装置の概要図を図-5に示す。これにより、各排出口の風量を計測し、合計する風量が目標とする排出口の風量を確保できるかについて確認した。

4.2 実験結果および考察

風量計測結果を表-6に示す。2つの排出口の風量の合計は129 m³/minであり、回収装置から白煙を漏えいすることなく回収できる風量が確保できることを確認した。これにより、考案した白煙回収システムは、液体窒素投入時に発生する白煙を十分回収可能な能力を有していると判断した。また、排出口で計測された合計風量が想定した風量と一致していることから、搬送距離に応じた風量の損失は、要素実験で得られた結果と合致していると考えられた。

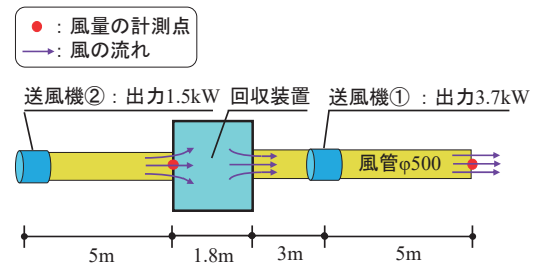


図-3 白煙の漏えい検討概要図

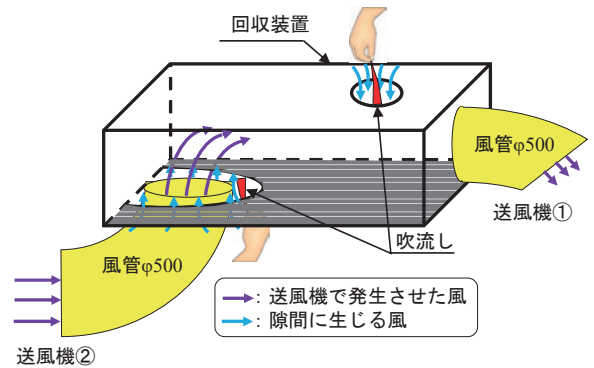


図-4 漏えい確認方法の概要図

表-2 風量損失の検討における風量計測結果

ケース No.	風管の長さ (m)	回収装置の有無	風量 (m ³ /min)	風量の損失(m ³ /min)	
				回収装置の有無	風管の延長
1	8	無	150	29	—
2	8	有	121		46
3	68	有	75	—	—

表-3 送風機のメーカー仕様と実測値の関係

機材	出力 (kW)	風量(m ³ /min)		風量の低減率(%)
		メーカー仕様	実測値	
送風機①	3.7	190	154	19
送風機②	1.5	110	87	21

表-4 白煙の漏えい検討における風量計測結果

計測区分	風量(m ³ /min)	
	実測値	想定する気体発生量
回収装置内部への送風量	87	80
排出口の送風量	128	—

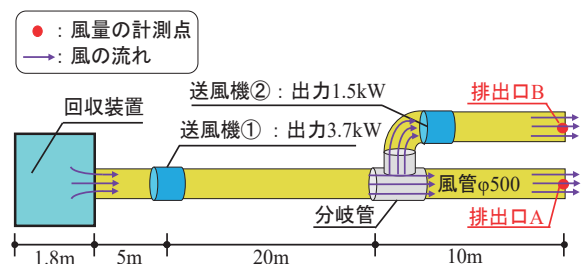


図-5 白煙の搬送装置の概要図

5. 実機実験

5.1 実験概要

実機試験では、考案した白煙回収システムの白煙回収性能を確認することを目的として、液体窒素をアジータ車に投入する際の白煙の動きを観察した。

一方で、白煙を減少もしくは消失させるためには、白煙を含む空気の色度を上げ、飽和水蒸気量を増加させることで水蒸気を空気中に戻すことが有効と考えられるが、基準となる白煙を含む空気の色度が確認されていない。

そこで、白煙を含む空気の色度を計測することとした。白煙発生時の空気の色度は、回収装置の排出口にて計測した。また、白煙は白煙回収システムによって搬送される間、外気温の影響を受け、温度上昇する。これにより、風管内の飽和水蒸気量が増加し、白煙が減少する可能性が考えられる。そこで、風管内の色度を確認することによって、白煙回収システムの白煙減少効果を評価した。白煙回収システムの概要図と温度計測位置を図-6に示す。

5.2 実験結果および考察

(1) 白煙回収性能の確認

クーリング実施時における作業環境の状況を写真-3に、排出口の状況を写真-4に示す。白煙回収システムの稼働により、白煙の漏れは確認されず、作業環境や施工性を確保できると仮定した35mの搬送距離に排出できることを確認した。

(2) 白煙を含む空気の色度計測

クーリング実施時の温度履歴を図-7に、温度計測結果を表-7に示す。計測された最低温度は、回収装置の排出口で-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。これらの結果から、白煙を含む空気の色度は、回収装置の排出口から35m先の排出口までの間に排出口Aで24.5℃、排出口Bで32.2℃上昇することを確認した。なお、排出口Bの温度が高い理由は、搬送経路に送風機②が設置されているため、機器の発熱によって温度が上昇したと考えられる。この結果から、白煙を含む空気の色度は、風管の長さや送風機によって上昇することが確認された。

(3) 白煙減少効果の評価

飽和水蒸気量と気色との関係式⁹⁾から算出した両者の関係と計測結果を図-8に示す。クーリング前の実環境条件は、外気温26℃湿度60%であり、空気中に含まれる水蒸気の色度は14.6g/m³と算定される。このことから、白煙を消失させるためには、白煙を含む空気の色度を飽和水蒸気量が14.6g/m³以上となる17.2℃以上に温める必要がある。各排出口の色度が-9.2℃、-1.5℃であり、各温度の飽和水蒸気量(2.5g/m³、4.4g/m³)を考慮すると、白煙はそれぞれ約15%、29%減少したと考えられる。この

表-6 風量計測結果

計測位置	風量(m ³ /min)	
	実測値	合計
排出口A	30	129
排出口B	99	

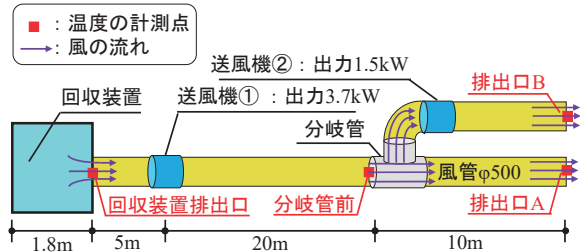


図-6 白煙回収システムの概要図と温度計測位置



写真-3 作業環境の状況



写真-4 排出口の状況

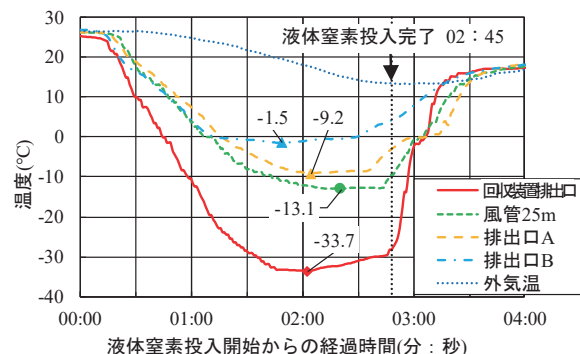


図-7 クーリング実施時の温度履歴

ように、搬送される白煙を含む空気温度変化が把握できたことにより、白煙を消失させるための対策が立案可能になった。

(4) 白煙消失の可能性

送風機②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°Cであった。そこで、風管による温度上昇が同様に生じると仮定すれば、搬送装置の全長を約103m以上にする事で白煙が消失する温度に達するものと考えられる。ただし、風管の延長は風量の損失が大きく、送風機の追加や、風管の径の拡大で風量を補う必要がある。また、より積極的に白煙を減少および消失させるためには、搬送装置から排出される白煙を積極的に温める方法などが有効と考えられる。

6. まとめ

以下に得られた結果をまとめる。

- ・考案した白煙回収システム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。また、搬送システムに求められる距離に応じた送風機を選定するための基礎データを得ることもできた。これにより、液体窒素クーリング工法の適用時における白煙対策が実現できるものと考えられた。
- ・搬送される白煙を含む空気温度変化が把握できたことにより、白煙を消失させるための対策が立案可能になった。

【参考文献】

- 1) 野稻清, 宇野洋志城, 大岩裕也: 液体窒素によるコンクリートのプレクーリングについて, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集, 6-594, pp.1187-1188, 2015.7
- 2) 槇島修, 川里麻莉子: 液体窒素クーリングの適用によ

Summary The liquid nitrogen cooling technique is an effective thermal crack control method for mass concrete. However, applying liquid nitrogen rapidly cools ambient air, which contains water vapor. In addition to generating white smoke, this degrades the work environment and constrains various tasks in progress.

In response, a system that collects white smoke was developed. The system consists of a storage space and conveyor, both positioned at the hopper of the agitator vehicle where white smoke is generated. White smoke is temporarily collected into the storage space, after which the conveyor transports the collected smoke to a place where the smoke has less impact on the work environment and operations in progress. This paper presents the results of a preliminary study carried out to evaluate the system's effectiveness in collecting and reducing white smoke and an account of actual performance in a simulation reproducing real-world conditions.

Key Words : mass concrete, thermal cracking, liquid nitrogen, cooling, white smoke

表-7 温度計測結果

計測位置	最低温度(°C)	回収装置からの温度上昇量(°C)
回収装置排出口	-33.7	—
分岐管前	-13.1	20.6
排出口 A	-9.2	24.5
排出口 B	-1.5	32.2

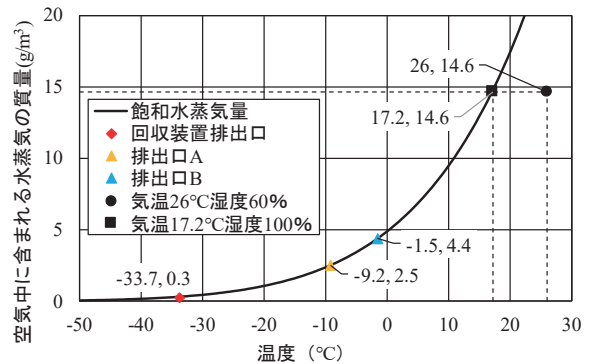


図-8 飽和水蒸気量と気温との関係式から算出した両者の関係と計測結果

- 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
- 3) 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
 - 4) 川里麻莉子, 槇島修, 高桑信, 滝戸慎二, 澤田邦博, 新垣健児: ケーソン側壁におけるプレクーリングの部分適用による温度ひび割れ抑制効果の確認, とびしま技報No.65, pp.51-54, 2017
 - 5) 田中俊六, 武田仁, 足立哲夫, 土屋喬雄: 最新建築環境工学, 井上書院, p.222, 1984.12