

# 亜硝酸リチウムを添加した耐寒無収縮モルタルの諸特性に関する基礎的検討

Fundamental study on characteristics of anti-freezing non-shrink mortar using lithium nitrite

北見工業大学工学部地域未来デザイン工学科○学生員 福岡優作 (Yusaku Fukuma)  
 北見工業大学工学部社会環境系 正員 井上真澄 (Masumi Inoue)  
 北見工業大学工学部社会環境系 正員 崔希燮 (Heesup Choi)  
 日本高压コンクリート(株) 正員 吉岡憲一 (Kenichi Yoshioka)  
 日産化学(株) 正員 須藤裕司 (Yuhji Sudoh)

## 1. はじめに

セメント系無収縮モルタルは、橋梁の上部(桁)と下部(脚)の接続部となる支承位置や風力発電(風車)の基礎、橋梁を補強する際に橋脚外周に巻き立てる補強鋼板と躯体との間詰部(鋼板巻立て工法)など、多様な構造物に使用されている。一般に施工時期の気温が氷点下になるような寒中施工では、ジェットヒーター等の給熱機器を用いてモルタル材が初期凍害を受けないとされる強度を発現するまで給熱・保温養生状態を維持することが求められる。しかし、寒冷地において構造物の一部である支承部や間詰部を給熱し保温状態を維持するためには、構造物全体を覆う大掛かりな養生囲いを設ける必要があり、給熱機器に使用する燃料費も膨大となるため、使用するモルタル材の量に比べて過大となる場合が多い。特に橋脚は河川内に多くあることから、橋脚工事は渇水期となる冬期に行われることが多く、寒中施工の頻度も高い。

この問題の解決には、養生囲いや給熱を行わなくとも氷点環境下において凍結しない耐寒性を有する無収縮モルタルの開発が必要と考えられる。一般にセメント系材料に耐寒性を付与し強度促進を図る場合、無塩化・無アルカリ型の亜硝酸塩や硝酸塩が硬化促進剤(耐寒剤)として使用されている<sup>1)</sup>。著者らは、その亜硝酸塩のうち亜硝酸リチウムに着目し、セメント系材料に多量添加した場合の凍結点降下作用や氷点環境下での強度発現性などを明らかにしてきた<sup>2)</sup>。また、氷点環境下においても特別な養生を必要としない亜硝酸リチウムを添加した耐寒PCグラウトの性能を評価し、その実用性の検討を行ってきた<sup>3)</sup>。

本研究では、 $-10^{\circ}\text{C}$ 程度の氷点環境下において特別な養生を必要としない耐寒無収縮モルタルの開発を目的として、亜硝酸リチウムを含有する硬化促進剤を添加した無収縮モルタルの流動性や、練混ぜ直後から氷点環境下において養生した場合の強度発現性と膨張収縮挙動に及ぼす影響などについて基礎的検討を行った。

## 2. 亜硝酸リチウムを添加した無収縮モルタルの諸特性

### 2.1 概要

まず亜硝酸リチウムを添加した無収縮モルタルの諸特性を把握するため、流動性や練混ぜ直後から氷点環境下で養生した場合の強度発現性と膨張収縮挙動について検討を行った。

### 2.2 使用材料および配合

試験に使用した無収縮モルタルには、一般に使用され

表-1 無収縮モルタルの配合

W/B* (%)	W ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	プレミックス材( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	
		結合材 B	細骨材 S
36.0	338	938	938

\*: 流動性試験(流下時間)の規格値  $8 \pm 2$  秒<sup>4)</sup>を満たすように試験練りにより決定

表-2 実験要因

要因	仕様
LN 添加率	0%、6%
練混ぜ環境	$10 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $85 \pm 5\% \text{RH}$
養生条件	$-10^{\circ}\text{C}$ (材齢 7 日以降、 $20^{\circ}\text{C}$ 回復養生)
強度試験材齢	7、28、56 日
試験項目	流動性試験(JSCE-F 541 に準拠) 圧縮強度試験(JSCE-G 541 に準拠) 膨張率試験(JSCE-F 535 を参考にメスシリンダーを用いて測定)

ているプレミックス型のセメント系無収縮モルタルを使用した。表-1 に無収縮モルタルの配合を示す。結合材には、セメントのほか、無収縮性を保持するために石灰系膨張材とアルミニウム粉末などが配合されている。水結合材比(W/B)は流動性試験より得られる流下時間の規格値  $8 \pm 2$  秒<sup>4)</sup>を満たすように試験練りにより決定した。硬化促進剤には亜硝酸リチウムを含有する濃度 40%水溶液(密度:  $1.25\text{g}/\text{cm}^3$ 、以下 LN と称す)を使用した。LN の添加率は、プレミックス材に含有する結合材質量に対する亜硝酸リチウムの固形分量の割合として計算し、その添加率は $-10^{\circ}\text{C}$ 環境下での使用を想定して既報告の結果<sup>2),3)</sup>を参考に 6%とし、LN 無添加の場合と比較した。表-2 に実験要因を示す。

### 2.3 実験条件および方法

コンクリート標準示方書(土木学会)では、寒中施工において凍結融解作用を受けやすい場合にはコンクリートの打込み温度を  $10^{\circ}\text{C}$ 程度に確保することが推奨されている<sup>5)</sup>。そこで本実験では、温度  $10 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $85 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内にて各材料を温度管理し、ハンドミキサーを用いて練混ぜを行った。その後、同室内において JSCE-F 541 に準拠して流下時間を測定した。測定は練混ぜ直後、15 分後、30 分後の計 3 回とした。

圧縮強度は、練混ぜ直後に  $\phi 50 \times 100\text{mm}$  のぶりき製軽量型枠に打込み、打込み面をラップで覆い封緘した。その後、初期養生せずに打込み直後から氷点環境下を想定して $-10^{\circ}\text{C}$ の恒温槽内にて封緘養生し、材齢 7 日において圧縮強度試験(JSCE-G 541)を行った。また、材齢 7

表-3 実験結果

配合	練上がり温度(°C)			流下時間(秒)			圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )			膨張率(%)
	直後	15分	30分	直後	15分	30分	材齢7日	材齢28日	材齢56日	24hr後
LN=0%	16.0	16.0	16.0	7.9	9.8	13.8	1.0	28.6	23.3	0.20 (※20°C養生)
LN=6%	20.0	20.0	20.0	6.3	6.8	9.1	19.7	59.7	64.1	-0.55 (※-10°C養生)

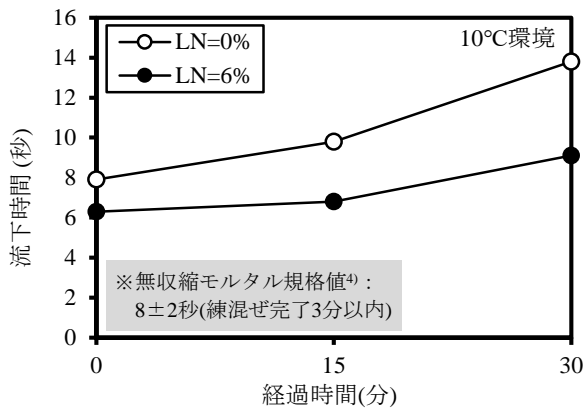


図-1 流下時間

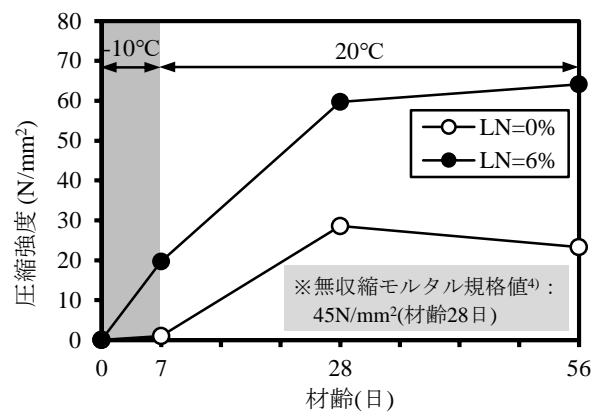


図-2 圧縮強度の経時変化

日以降は、氷点環境下における養生後の追加養生による強度回復の有無を確認するため、20°Cの恒温槽内において追加養生(以下、回復養生と称す)を行い、材齢28日および材齢56日にて圧縮強度試験を行った。なお、-10°C養生後に実施する材齢7日の圧縮強度試験に際しては、-10°Cの恒温槽より取り出した供試体を20°Cの水中に浸漬し、供試体内部の温度が5°Cに達した時点で圧縮強度試験を実施した。

膨張率は、JSCE-F 535「PCグラウトのブリーディング率および体積変化率試験方法(鉛直管方法)(案)」を参考に、容量1Lのメスシリンダーを用いて測定した。モルタル充填後24時間経過した時点で計測した無収縮モルタル上端の高さの変化量を充填直後の初期高さで割ることにより算出した。

#### 2.4 実験結果および考察

図-1に10°C環境下における練混ぜ直後から30分までの無収縮モルタルの流下時間を示す。無収縮モルタルにLNを6%添加した場合、流動性の低下は見られず、LN無添加の場合より流下時間は早くなる傾向にあり、流下時間は練混ぜ直後から30分まで規格値(8±2秒)<sup>④</sup>を満足することを確認した。

図-2に打込み直後から材齢7日まで-10°Cの氷点環境下において封緘養生した場合の圧縮強度の経時変化を示す。材齢7日強度に着目すると、LN無添加では1.0N/mm<sup>2</sup>であった。回復養生後の強度増進は見られるものの材齢28日では28.6N/mm<sup>2</sup>であり、圧縮強度の規格値(45N/mm<sup>2</sup>)を下回る結果となった。LN無添加の場合はモルタル中の水分の凍結挙動の影響により初期凍害を受け強度増進しなかったものと考えられる。これに対して、LNを6%添加した場合は材齢7日時点で19.7N/mm<sup>2</sup>の強度が得られており、回復養生後には規格値を大きく上回る60N/mm<sup>2</sup>程度まで強度増進した。これは、LNの凍結点降下作用によりモルタル中の水分の凍結が抑制されるとともに、LNに含有する亜硝酸イオ

ンがセメントの水和反応を促進することにより、氷点環境下においても強度増進したものと考えられる<sup>2)</sup>。

膨張率の結果を表-3に示す。LN無添加の場合-10°C環境下では凍結膨張の影響があるため、参考までに20°C環境下における膨張率を確認したところ練混ぜ後24時間で0.20%の膨張率を得た。一方、LNを6%添加して-10°C環境下において膨張率を測定したところ、24時間経過した時点で-0.55%と収縮側に挙動することを確認した。本実験で使用した無収縮モルタルには初期の収縮を抑制するためにアルミニウム粉末(以下、AL粉末と称す)などが配合されているが、AL粉末はセメント中の水酸化カルシウムと反応して水素ガスを発生する化学反応<sup>⑥</sup>であるため、その反応は温度条件に対する依存性があること<sup>7),8)</sup>が報告されており、氷点環境下では十分な初期膨張が得られなかったものと推察される。

### 3. AL粉末の添加が耐寒無収縮モルタルの強度発現および膨張率に及ぼす影響

#### 3.1 概要

LNを添加した無収縮モルタルは氷点環境下においても凍結せずに良好な強度発現が得られる一方で、無収縮性の保持に課題がある。そこで初期膨張の付与を目的としてLNを添加した無収縮モルタルにAL粉末を追加添加した場合の強度発現性と膨張率に及ぼす影響について検討を行った。

#### 3.2 使用材料と配合

表-4に示す無収縮モルタルにLNを6%添加した配合をベースとして、AL粉末(主成分:アルミニウム、密度:2.70g/cm<sup>3</sup>)を結合材質量に対して0.150~0.175%の範

表-4 無収縮モルタルの配合

W/B* (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	プレミックス材(kg/m <sup>3</sup> )	
		結合材B	細骨材S
34.4	327	950	950

\*: 流動性試験(流下時間)の規格値8±2秒<sup>④</sup>を満たすように試験練りにより決定

囲で添加した。表-5 に実験要因を示す。

3.3 実験条件および方法

各材料の温度管理は、2 章と同じく寒中施工を想定して 10±1℃、湿度 85±5%の恒温恒湿室内にて行い、同室内にてハンドミキサーを用いて練混ぜを行った。その後の同室内での流動性試験(JSCE-F 541)および練混ぜ直後から-10℃の氷点環境下にて養生した場合の圧縮強度試験(JSCE-G 541)の経時変化を測定した。養生条件および試験内容は2 章と同様である。

膨張率については、JSCE-F 542「充填モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法(案)」に準拠して測定した。試験開始前日から-10℃の氷点環境下において鋼製型枠や型枠固定具など試験用器具一式を養生した上で、練混ぜ直後に型枠へ充填してから材齢 7 日まで氷点環境下(-10℃)において膨張率の測定を行った。

3.4 実験結果および考察

表-6 に実験結果を示す。練混ぜ直後に測定した流下時間は、AL 粉末の添加による明確な傾向は確認されず、いずれの配合も無収縮モルタルの規格値(8±2 秒)<sup>4)</sup>を満足する結果となった。

図-3 に圧縮強度の経時変化を、図-4 に膨張率の経時変化を示す。膨張率の結果を見ると、AL 添加率 0.150

～0.175%の範囲においては材齢 7 日まで無収縮性を示すことを確認した。いずれの添加率においても材齢 1 日時点で膨張率は最大を示し、その後は幾分膨張率が低下するものの概ね一定の膨張率を示した。また、AL 添加率を増加することにより膨張率は増加する傾向を示した。一方の圧縮強度は、AL 添加率の増加により強度が低下する傾向を示した。この強度低下は、AL 粉末の発泡による膨張に起因するものと考えられる。しかし、材齢 28 日の圧縮強度は、無収縮モルタルの規格値(45N/mm<sup>2</sup>)<sup>4)</sup>を概ね満足できており、材齢 56 日においてもその強度が増進していることを確認した。

以上の結果より本実験の範囲においては、LN を 6% 添加した無収縮モルタルに AL 粉末を 0.150%程度追加添加することで、-10℃の氷点環境履歴(7 日間)を受ける場合であっても無収縮モルタルの材齢 28 日圧縮強度および膨張率(材齢 7 日まで)の両規格値<sup>4)</sup>を満足できることを確認した。ただし、AL 粉末による膨張量は、養生温度に大きく依存する<sup>7,8)</sup>と考えられることから、養生温度条件毎に圧縮強度と無収縮性を確保できる LN と AL 粉末の最適な添加率についてさらに検討が必要である。

4. 耐寒無収縮モルタルの付着強度試験

4.1 概要

橋梁用支承の据付けにあたってグラウト材(沓座モルタル)として使用される無収縮モルタルには、アンカーボルトとの付着性能が要求される。そこで LN と AL 粉末を添加した耐寒無収縮モルタルを-10℃の氷点環境下にて養生した場合の付着強度試験を行った。

4.2 使用材料および配合

3 章の実験結果を踏まえて、無収縮モルタル(表-4 参照)をベース材として、LN を 6%、AL 粉末を 0.150% 添加した耐無収縮モルタルを試験対象とした。

表-5 実験要因

要因	仕様
LN 添加率	6%
AL 添加率	0.150%、0.163%、0.175%
練混ぜ環境	10±1℃、85±5%RH
養生条件	-10℃(材齢 7 日以降、20℃回復養生)
強度試験材齢	7、28、56 日
試験項目	流動性試験(JSCE-F 541 に準拠) 圧縮強度試験(JSCE-G 541 に準拠) 膨張率試験(JSCE-F 542 に準拠)

表-6 実験結果

LN 添加率(%)	AL 添加率(%)	練上り温度(℃)*	流下時間(秒)*	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )			膨張率(%)						
				7 日	28 日	56 日	1 日	2 日	3 日	4 日	5 日	6 日	7 日
6	0.150	19.0	7.7	20.6	45.2	51.4	0.387	0.361	0.365	0.370	0.369	0.369	0.369
	0.163	19.0	7.0	20.7	44.6	50.3	0.601	0.578	0.583	0.583	0.587	0.586	0.589
	0.175	19.0	8.5	16.7	39.2	44.8	0.703	0.672	0.665	0.672	0.672	0.673	0.673

\*: 練上り直後に測定

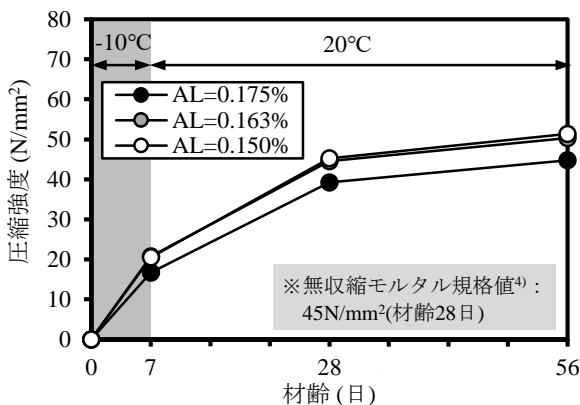


図-3 圧縮強度の経時変化

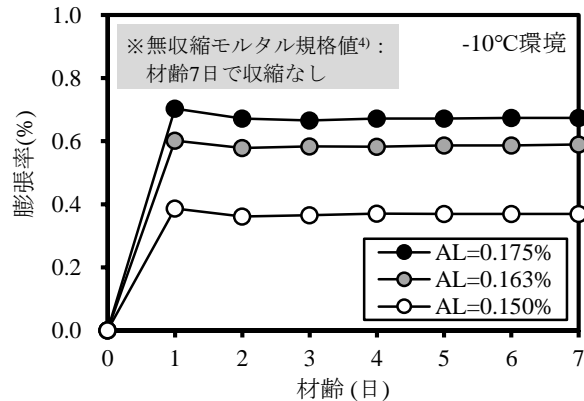


図-4 膨張率の経時変化

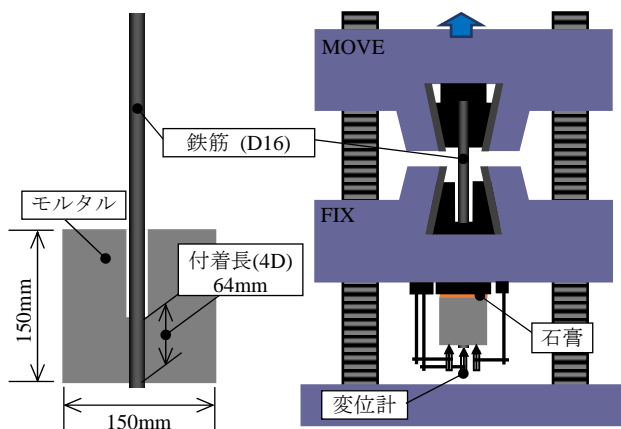


図-5 引抜き試験体概要および荷重試験方法

#### 4.3 実験条件および方法

付着試験は、JSCE-G 503「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」に準拠した。

図-5 に引抜き試験体の概要を示す。立方体試験体の一边の長さは150mmとした。鉄筋はD16(SD345)の異形棒鋼とし、鉄筋とモルタル試験体の付着区間は自由端側に設け、その長さは鉄筋(D16)の直径の4倍(4D = 64mm)とした。また、試験体は3体作製した。

各材料の温度管理は、前章までと同じく寒中施工を想定して10±1℃、湿度85±5%の恒温恒湿室内にて行い、同室内にてハンドミキサーを用いて練混ぜを行った。モルタルを型枠に打込んだ直後から-10℃の恒温槽内において材齢7日まで封緘養生した。材齢7日以降は材齢28日まで20℃の恒温槽内にて回復養生を行い、材齢28日において引抜き試験を行った。なお、同一養生条件を経た耐寒無収縮モルタル供試体(φ50×100mm)の圧縮強度は、材齢28日で50.3N/mm<sup>2</sup>であった。

引抜き試験は、図-5 に示すように万能試験機の固定側となる下側の荷重梁下部にモルタル試験体をセットし、上側の荷重梁で鉄筋をチャック締めして引き上げることにより荷重を行った。その際、荷重時の偏心の影響を極力低減するため、試験体表面と荷重板の間には硬質石膏による不陸調整を行った。荷重は、鉄筋の引張応力度の増加が毎分50N/mm<sup>2</sup>以下となる荷重速度で実施した。また、鉄筋のすべり量は自由端側の鉄筋とその周辺のモルタル面に変位計を取り付け、その相対変位により測定した。

#### 4.4 実験結果および考察

図-6 に付着応力～すべり曲線を示す。本実験では、全てのケースにおいて最大荷重時にモルタル試験体が割裂破壊した。その最大荷重から算出した最大付着応力度の平均値は、3体の平均で13.7N/mm<sup>2</sup>であった。道路橋示方書では、無収縮モルタルとアンカーボルトの付着強度の特性値は、支承が取り付けられる下部構造の設計基準強度(21～60N/mm<sup>2</sup>)に対して異形棒鋼を用いる場合2.40～3.40N/mm<sup>2</sup>が規定されている<sup>9)</sup>。本実験で得られた最大付着応力度は、この特性値を大きく上回るものであり、-10℃の氷点環境履歴を受けた場合であっても設計上十分な付着強度を有するものと考えられる。

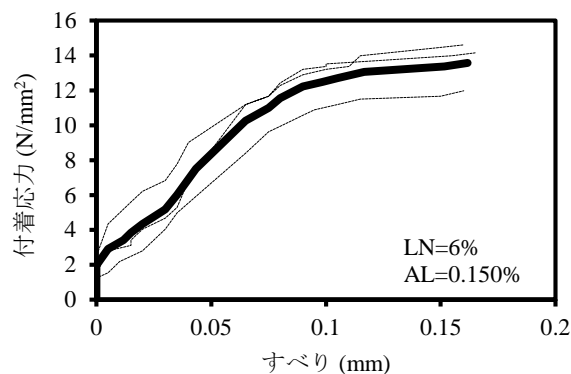


図-6 付着応力～すべり曲線

#### 5. まとめ

本研究では、-10℃程度の氷点環境下において特別な養生を必要としない耐寒無収縮モルタルの開発を目的として、亜硝酸リチウム(LN)とアルミニウム粉末(AL粉末)を添加した無収縮モルタルの流動性や、練混ぜ直後から氷点環境下において養生した場合の強度発現性と膨張収縮挙動に及ぼす影響などについて基礎的検討を行った。本実験の範囲で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) -10℃の氷点環境下を想定した実験の結果、LNを6%添加した無収縮モルタルにAL粉末を0.150%程度追加することで、材齢28日圧縮強度の規格値を満足するとともに、材齢7日までの無収縮性を保持できることを確認した。
- 2) 同配合を対象とした付着強度試験の結果、-10℃の氷点環境履歴を受けても十分な付着強度が得られることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 通年施工推進協議会：耐寒剤運用マニュアル(案)、pp.4-6、2003
- 2) 井上真澄、崔希燮、田家康平、須藤裕司、吉岡憲一：亜硝酸塩を添加したセメントペーストの氷点下における強度発現性、材料、Vol.71、No.4、pp.388-394、2022
- 3) 井上真澄、吉岡憲一、須藤裕司、崔希燮、田家康平：亜硝酸リチウムを添加した耐寒PCグラウトの基礎物性とその実用性の検討、土木学会論文集、Vol.78、No.3、pp.210-223、2022
- 4) 日本道路協会：道路橋支承便覧、pp.89-90、2018
- 5) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書(施工編)、pp.165-167、2018
- 6) 阿久津兼二：起ほう剤・発ほう剤、コンクリート工学、Vol.16、No.3、pp.59-61、1978
- 7) 川島宏幸、平田隆祥、十河茂幸：PSアンカーの急速施工に適した早強性グラウトの実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.1447-1452、1997
- 8) 神代泰道、小柳光生、中島啓喜：膨張性高流動コンクリートによる沈下補償に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.153-158、2008
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(III コンクリート橋・コンクリート部材編)、pp.211-212、2019