

亜硝酸塩系硬化促進剤を添加したコンクリートの変形挙動と強度発現に関する基礎的研究

北見工業大学大学院 学生員 ○岩澤 実和
日産化学工業(株) 正会員 須藤 裕司

北見工業大学 正会員 井上 真澄
北見工業大学 正会員 崔 希燮
北見工業大学 正会員 岡田 包儀

1. はじめに

寒中コンクリートの施工において、厳しい低温環境下や現場条件により仮囲いの設置が困難な場合には耐寒剤を使用する場合がある。著者らは、外気温が -10°C 以下になるような厳冬期の効率的なコンクリート施工のために、亜硝酸塩系硬化促進剤を多量に添加することにより、初期凍害防止とともに既存の耐寒剤より効果的な強度発現を両立する耐寒剤の研究開発を進めてきた^{1,2)}。一方で、耐寒剤使用時の打設初期から中・長期に至るコンクリートの変形(膨張および収縮)の観点からその挙動を明確にした研究は少ないのが現状である。そこで本研究では、 -10°C の低温環境下において亜硝酸塩系硬化促進剤の多量添加がコンクリートの膨張収縮挙動や強度発現に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実験的検討を行った。

2. 実験概要

表-1 に実験に用いた配合および養生条件を、図-1 に実験フローを示す。本研究では、亜硝酸塩系硬化促進剤がセメント系材料に及ぼす水和促進の影響をより明確にするためにセメントペーストを用いて実験を行った。セメントは普通ポルトランドセメント(密度： $3.14\text{g}/\text{cm}^3$)、耐寒剤には主成分として亜硝酸カルシウムを主体とする

表-1 配合および養生温度条件

配合名	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)		混和剤 (C×%)	養生温度条件($^{\circ}\text{C}$)
		W	C		
CN0_-10	50	617	1234	0	$+10 \rightarrow -10$ $\rightarrow +20$
CN11_-10				11	
CN14_-10				14	
CN0_20				0	$+20$

耐寒成分を含んだ濃度 45%の混合水溶液(CN45、密度： $1.42 \sim 1.44\text{g}/\text{cm}^3$)を用いた。水セメント比は 50%、CN45 の添加量は、既往研究²⁾を参考にセメントに対して 11%を基準とし、0%、11%、14%の 3 水準で比較を行った。材料管理、練混ぜおよび打込みは $+10.0 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $85 \pm 5\% \text{RH}$ の恒温恒湿室にて行い、打設面をビニールで覆い封緘養生した。その後、

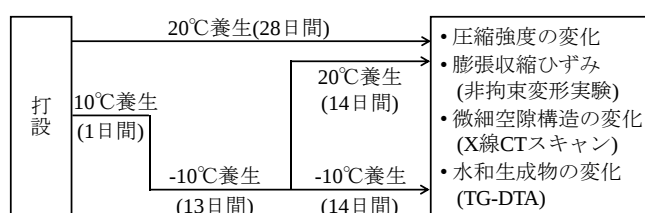


図-1 実験フロー

材齢 1 日まで $+10.0 \pm 1^{\circ}\text{C}$ の恒温恒湿室内で養生を行い、材齢 14 日までは $-10.0 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温槽で、材齢 14 日から材齢 28 日までは強度回復を確認するために、 $+20.0 \pm 1^{\circ}\text{C}$ の恒温室にて封緘養生した。また一部の試験体は、材齢 1 日から材齢 28 日まで $-10.0 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温槽にて養生を行った。さらに、比較のため CN45 無添加の配合について $+20.0 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $85 \pm 5\% \text{RH}$ の恒温恒湿室にて供試体を作製し、そのまま同室内にて封緘養生を行った。

圧縮強度試験は、JSCE-G 505-2013 に準拠して $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱試験体を用い、材齢 1、3、7、14、28 日の圧縮強度を測定した。非拘束変形実験には、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の型枠を用い、型枠による拘束や乾燥による水分の逸散が生じないように型枠の内側にテフロンシートおよびスチレンボードを設け、型枠中央部に埋込みゲージを設置し、打設直後から膨張収縮ひずみの測定を行った。微細空隙構造の変化は、 $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の試験体を作製し、X 線 CT スキャンを用いて、材齢 1、3、7、28 日で測定を行った。水和生成物の変化は、熱重量-示差熱分析装置(TG-DTA)を用いて、材齢 7、14、28 日の試験体から直径 $75 \mu\text{m}$ 以下の粉末試料を作製し、各ケースの水和生成物の経時計測を行った。

3. 実験結果および考察

図-2 に圧縮強度の経時変化を示す。材齢 14 日までの -10°C 養生下では CN45 の添加量が多いほど高い強度発現が確認された。さらに材齢 14 日以降の $+20^{\circ}\text{C}$ の再養生により強度が大きく回復しており、添加量が最も多い CN14_-10 では 20°C 定温養生を行った CN0_20 と同程度まで強度が回復した。CN45 を多量添加した場合、再養生下で材齢を経ることでさらに強度回復が可能であると考えられる。

キーワード 亜硝酸塩系硬化促進剤、膨張収縮、圧縮強度、水和反応、微細空隙構造

連絡先 〒090-8507 北海道北見市公園町 165 北見工業大学 工学部 社会環境工学科 TEL 0157-26-9518

図-3に空隙体積比の経時変化を示す。

どのケースにおいても材齢が進むにつれ空隙体積が減少する傾向が確認できた。特に、CN45を添加した場合は、10℃養生の材齢1日の時点では無添加と比較して大きな差はないが、その後の養生下では空隙体積比が明確に低下しており、低温環境下でも組織の緻密化が進んでいることが伺える。

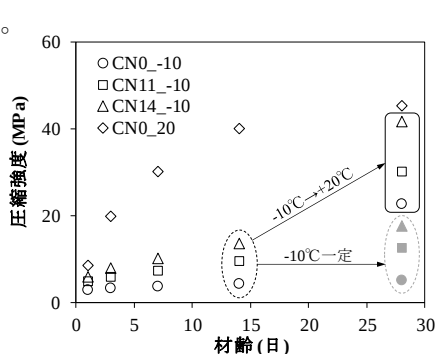


図-2 圧縮強度の経時変化

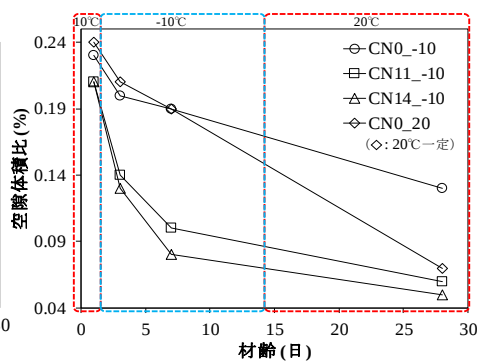


図-3 空隙体積比の経時変化

図-4に非拘束条件下における膨張収縮挙動を示す。材齢1日(+10℃養生)までに着目すると、CN11_-10の膨張量が大きくなった。これは打設初期からC₃Aの反応率が非常に高いことと同時に、多少のC₃SとC₂Sの水和が促進され、ペーストの凝結が早く進行したことによるものと考えられる。材齢1日以降の-10℃養生下ではいずれのケースでも収縮傾向を示したが、その後CN11_-10では徐々に膨張傾向を示しており、CN45がセメントの水和に長期的に寄与していると考えられる。材齢14日以降の20℃による再養生した場合、CN11_-10は大幅に再膨張した後徐々に収縮する傾向を示した。これはセメントマトリクス中に残存する未反応の亜硝酸カルシウムとセメント粒子との水和反応であると考えられ、これが再養生後の強度発現に繋がったものと推察される。

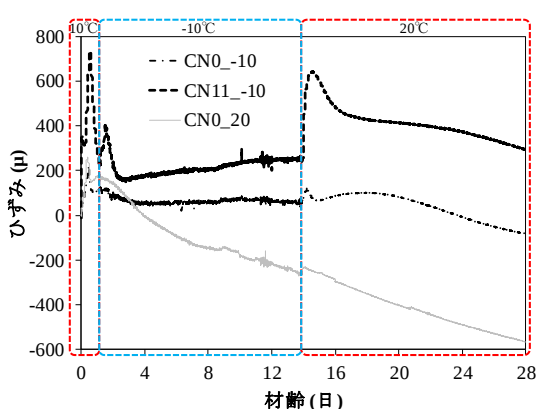


図-4 非拘束膨張収縮ひずみの経時変化

図-5に水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)およびC-S-Hゲルの生成量の経時変化を示す。-10℃環境下での養生でも水和生成物の生成量が材齢を経るごとに増加しており、低温環境下においても少しずつ膨張が進行していたことの理解ができる。また、CN45を添加したケースでは、その効果により水和が促進しCN45を添加していないケースよりもC-S-Hゲルの生成量が多くなった。一方で+20℃に再養生した場合の材齢28日に着目すると、-10℃定温養生の材齢28日に比べ大幅にC-S-Hゲルの生成量が増加した。特に、再養生したCN14_-10の材齢28日におけるC-S-Hゲルの生成量は、20℃定温養生したCN0_20を上回る傾向を示した。

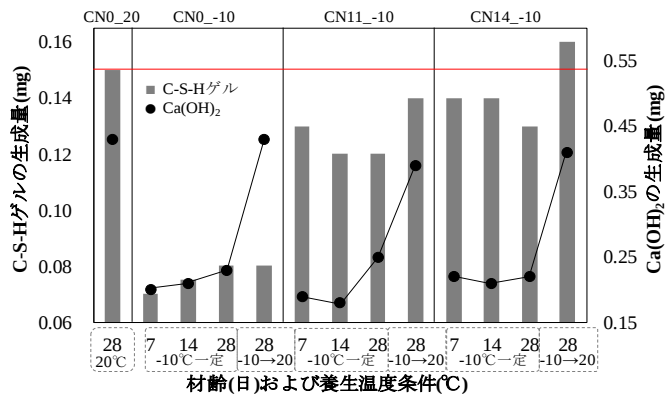


図-5 水和生成物の生成量

4. まとめ

- 1) -10℃養生下ではCN45の添加量が多いほど高い強度発現が確認された。また、-10℃養生後に20℃による再養生を行うことで強度の回復も確認された。
- 2) 材齢1日までの10℃養生期間ではCN45の多量添加により水和が急激に促進され膨張が大きくなった。その後の-10℃養生でもCN45によりセメントの水和が長期的に促進し強度発現へ寄与していることが確認できた。
- 3) CN45を多量添加することにより、-10℃環境下でも水和が進行して水和生成物が多く生成されるとともに、空隙体積比も徐々に減少することを確認できた。

参考文献

- 1) 赤間智仁、井上真澄、須藤裕司、三上修一：亜硝酸カルシウムと各種減水剤を併用したコンクリートのフレッシュ性状および初期強度発現の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.1、pp.155-159、2012
- 2) 岩澤実和、井上真澄、須藤裕司、崔希燮、岡田包儀：亜硝酸塩系硬化促進剤と各種減水剤を併用したコンクリートの低温環境下での物性、土木学会北海道支部論文報告集、第72号、E-13、2016.1