

亜硝酸・硝酸カルシウム量が高炉スラグ含有モルタルの収縮ひび割れに及ぼす影響

北見工業大学大学院 学生員 ○富田 悠輔

北見工業大学 正会員 崔 希燮

北見工業大学 正会員 井上 真澄

日産化学工業(株) 正会員 須藤 裕司

1. はじめに

低温環境下において、亜硝酸カルシウムおよび硝酸カルシウムを主成分とする硬化促進剤(CN)は、高炉スラグ微粉末含有セメント(以降、高炉スラグセメント)に対して添加すると硬化促進や凍結点低下などの性能を発揮し、初期強度改善効果が期待でき、寒中施工における高炉スラグセメントの短所を克服する可能性があるため、近年は環境負荷低減型寒中コンクリート施工技術として、高炉スラグセメントとCNを併用したコンクリートに関する研究が進められている¹⁾。しかし、多くの研究は高炉スラグセメントを用いたコンクリートの初期凍害防止の観点から初期材齢における強度回復に着眼しており、初期以降における耐久性、特にコンクリートの劣化の起点となる収縮ひび割れに関する研究は少ない。本研究では、低温環境下において高炉スラグセメントに亜硝酸カルシウム・硝酸カルシウムを主成分としたCNを添加した際の圧縮強度試験、拘束収縮試験を行い、収縮ひび割れ、ひび割れポテンシャルなど、強度発現性や収縮ひび割れ特性の把握を目的としてモルタルを用いて研究を行った。

2. 実験概要

表-1にモルタル配合を示す。使用するCNは亜硝酸カルシウムと硝酸カルシウムの濃度45%混合水溶液である。水結合材比は50%とし、S/(C+B)は2.5とした。CN添加量の変化による違いを明確にするため、CNの置換率はCNを固形物換算し、結合材に対して0%、1%、3%、5%で内割置換した。

表-1 モルタル配合

配合名	W/(C+B) (%)	S/(C+B)	単位量(kg/m ³)				CN ((C+B)×%)
			W	C	B	S	
CN0	50	2.5	280	280	280	1398	0
CN1							1
CN3							3
CN5							5

温度10.0℃±1℃、湿度85%±5%の恒温恒湿室で材料管理を行った後、同室内で練混ぜを行った。その後の各実験についてもすべて同室内で打込み・養生を行った。

圧縮強度は、φ50×100mmの型枠を使用し、各ケースにつき供試体を3体作成した。型枠にモルタルを打ち込んだ後、材齢1日で脱型して恒温恒湿室で封緘養生を行い、所定の材齢にて圧縮強度試験を行った。拘束収縮試験は、AASHTO PP34-98で提案されているリング型拘束試験を参考にし、実験を行った。試験体の高さは既往研究を参考に75mmとし²⁾、各ケースにつき供試体を1体作成した。本実験では外部リングからの拘束を最小限に抑えるため、外部リングとモルタルの間にテフロンシートを設けた。材齢1日で試験体上下面を脱型し、試験体上下面を露出させ、恒温恒湿室で養生を行った。拘束収縮ひずみはひずみゲージを内部リングの内側中央(37.5mm)に3か所貼り付け、打込み直後から10分ごとにひずみの経時変化の測定を行った。ひび割れの発生については、目視および取得したデータから確認した。なお、本研究では初期材齢を「1日、3日」、初期以降を「7日、28日」と定義した。

3. 実験結果および考察

図-1、図-2に圧縮強度の経時変化を示す。図-1の初期材齢の圧縮強度は、CN添加量が増えると強度が増加する傾向が見られた。一般に高炉スラグ微粉末は、アルカリ刺激剤と反応し、水和初期に普通ポルトランドセメントの水和物と類似なC-S-HおよびC-S-A-Hの生成が可能であり³⁾、この材齢1日、3日の強度の増加は、CNが刺激剤としての役割を持ち、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を促進させ、生成されたC-S-Hによりセメントマトリクスの組織が緻密化したことによるものと考えられる。また、CNが普通ポルトランドセメントの水和も促進させ、エトリンガイト生成速度の上昇とともにCN中の亜硝酸・硝酸イオンがC₃Aと反応し、亜硝酸・硝酸系水和物が生成され、セメントマトリクスの組織が緻密化したことによるものと考えられる⁴⁾。一方、図-2の初期以降ではCN5の強度が最も小さくなり、CN添加量が増えると、強度が低下する傾向が見られた。CN添加量が増えると普通ポルトランドセメントは初期材齢においてエトリンガイト生成速度の増加とともに亜硝酸・硝酸系水和物が多量に生成されるが、H₂Oを消費することでC₃SやβC₂Sの水和度が低下するため、C-S-HやCa(OH)₂などの生成量が相対的に減少することで初期以降の強度が低下することが知られている⁴⁾。このことから、初期以降では、CN添加量が増えることによって高炉スラグ微粉末の潜在水硬性が促進されることによる強度増加の影響よりも、普通ポルトランドセメントとCNの反応による影響が大きいと考えられる。

キーワード 亜硝酸カルシウム、高炉スラグ微粉末、強度発現、膨張、収縮、ひび割れ

連絡先 〒090-8507 北海道北見市公園町165 北見工業大学工学部地域未来デザイン工学科 TEL 0157-26-9518

図-3 に拘束収縮ひずみの経時変化を、図-4 に拘束引張応力の経時変化を示す。拘束引張応力は式(1)から算出した^{2),5)}。ここで、 $\sigma_{\theta\text{imax}}$ は拘束引張応力、 γ_{is} 、 γ_{os} は鋼材の内部および外部の半径、 γ_{ic} 、 γ_{oc} はモルタルの内部半径および外部半径、 E_{st} は鋼材の弾性係数(200000N/mm²)、 ε_{st} は拘束収縮ひずみを示している。CN 添加量が増えると拘束収縮ひずみ量が増加する傾向が見られた。また、拘束収縮ひずみ量の増加とともに拘束引張応力が増加し、ひび割れが早く発生することが確認された。ひび割れポテンシャルは拘束引張応力と引張強度の応力強度比(拘束引張応力/引張強度)であり、各材齢における応力強度比によって算出した。図-5 に圧縮強度から推定した引張強度の経時変化を、図-6 に各ケースのひび割れポテンシャルの経時変化を示す。引張強度は圧縮強度の結果を利用して式(2)から算出した^{5),6)}。ここで F_c は圧縮強度を、 f は圧縮強度より算出した引張強度を示している。CN 添加量が増えると、ひび割れポテンシャルは増加する傾向が見られた。これは、CN 添加量が増えるほど拘束収縮ひずみ量が増加し、内部リングの拘束によって発生する拘束引張応力が増加したためであると考えられる。これらの結果から、本実験の拘束条件の範囲内では CN 添加量が増えると、モルタルの拘束収縮ひずみ量が増加し、ひび割れ発生の可能性が高くなることが示された。

$$\sigma_{\theta\text{imax}} = \frac{(\gamma_{\text{os}}^2 - \gamma_{\text{is}}^2)}{2\gamma_{\text{os}}^2} \cdot \frac{(\gamma_{\text{im}}^2 + \gamma_{\text{om}}^2)}{(\gamma_{\text{om}}^2 - \gamma_{\text{im}}^2)} \cdot E_{\text{st}} \cdot \varepsilon_{\text{st}} \quad (1)$$

$$f = 0.291 \cdot F_c^{0.658} \quad (2)$$

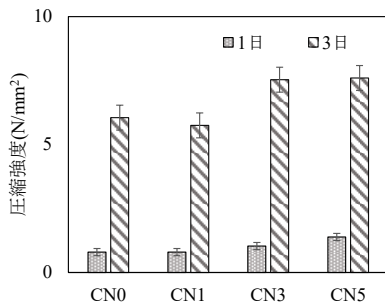


図-1 圧縮強度(初期材齢)

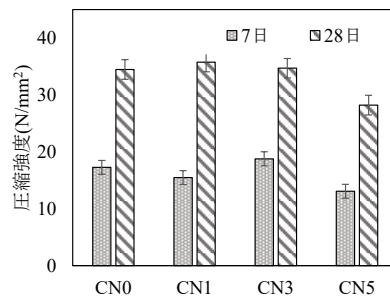


図-2 圧縮強度(初期以降)

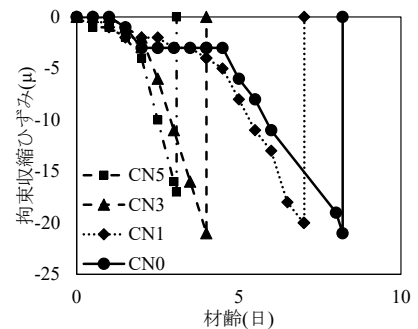


図-3 拘束収縮ひずみ

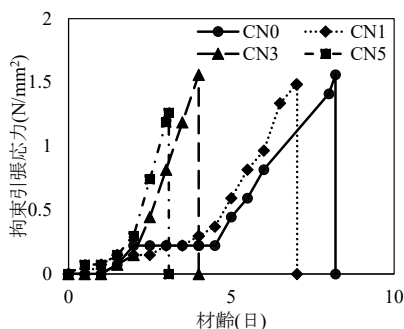


図-4 拘束引張応力

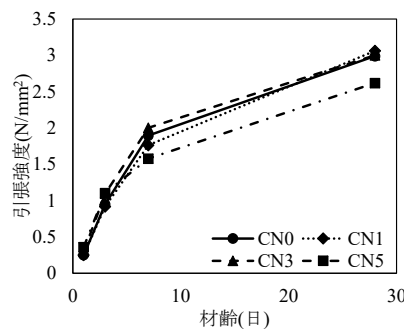


図-5 引張強度

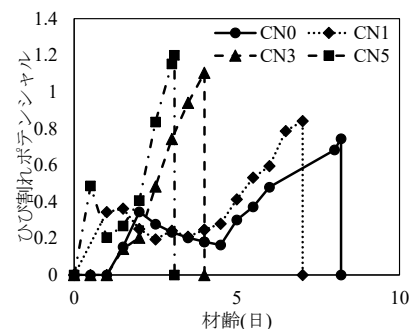


図-6 ひび割れポテンシャル

4. まとめ

- 1) CN 添加量が増えると高炉スラグ微粉末の潜在水硬性の促進とともに、普通ポルトランドセメントの水和も促進されることで材齢 1 日、3 日の強度が増加したが、材齢 7 日以降の強度が低下する傾向が見られた。
- 2) CN 添加量が増えると、拘束収縮ひずみ量が増加し、拘束引張応力が増加することでひび割れが早く発生した。
- 3) 本実験の拘束条件の範囲内では、CN 添加量が増えると、拘束収縮ひずみ量の増加とともにひび割れポテンシャルが増加することから、ひび割れ発生の可能性が高くなることが示された。

参考文献

- 1) 野々村佳哲, 島多昭典, 嶋田久俊, 吉田行: 耐寒促進剤の高炉セメントへの利用拡大に向けた基礎的検討, 寒地土木研究所月報, No.749, pp45-50, 2015.10
- 2) Choi HG, Lim MK, Kitagaki R, Noguchi T, Kim G.Y.: Restrained shrinkage behavior of expansive mortar at early ages, Construction and Building Materials, Vol.84, No.1, pp.468-476, 2015.
- 3) Xie J, Yin J, Chen J, Xu J: Study on the geopolymer based on fly ash and slag, International Conference on Energy and Environment Technology Guilin, Guangxi, China, pp.578-581, 2009
- 4) Choi HS, Inoue M, Choi HG, Kim J, Sudoh Y, Kwon S, Lee B, Yoneyama A: Physicochemical Study on the Strength Development Characteristics of Cold Weather Concrete Using Nitrite・Nitrate-Based Accelerator, Journal of the Materials, Vol.12, No.17, pp.1~14, 2019.
- 5) Hossain AB, Weiss WJ.: Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens, Cement and Concrete Composites, Vol.26, No.5, pp.531-540, 2004.
- 6) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.60, No.472, pp.11-16, 1995.