

γ-C₂S を混和したコンクリートのシールドセグメントへの適用性の検討 その2

ー G I 基金事業『CUCO』開発成果ー

ジオスター（株） 正会員 ○鶴田 昌宏 松野 真樹

鹿島建設（株） 正会員 関 健吾 山野 泰明 境 美緒

1. 目的

コンクリートのカーボンニュートラル化は、CO₂ 排出原単位の削減に大きく貢献できる可能性が高く、材料や配合に検討を加えてコンクリートの CO₂ 排出原単位を下げるのが急務である。このような中、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）に2兆円規模の「グリーンイノベーション（GI）基金」が造成され、筆者らもコンソーシアム「CUCO（Carbon Utilized COncrete）」の一員として、研究開発を進めており¹⁾、筆者らもγ-C₂S を混和したコンクリートをシールドセグメントに適用することを目的に、配合検討を実施してきた²⁾。本報では、γ-C₂S を混和したコンクリートをシールドセグメントの通常製造プロセスに適用する際に問題となる、脱型強度の改善に関する検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

本検討では、前報（その1）²⁾ で報告したシールドセグメント用の基本配合（表1を参照）に対して、種々の硬化促進材料を適用し、その効果を確認することを目的とした。当該材料には、それぞれ効果の異なる4種類を適用することとし、それらを併用した場合の効果についても確認を行った。なお、早強セメントについては、普通セメントと置換して使用し、亜硝酸系硬化促進剤の使用量はB×3.0%、C-S-H系硬化促進剤の使用量はB×4.5%、エトリンガイト系硬化促進材の使用量は20kg/m³（膨張材使用量を-10kg/m³）で固定した。

実験に用いたセメントおよび硬化促進材料を表2に示す。なお、他のコンクリート構成材料については、前報（その1）²⁾ を参照願いたい。また、養生条件および強度試験体の作製についても前報（その1）²⁾ に準ずる。

3. 結果および考察

実験結果を表3に、硬化促進材料使用時の圧縮強度の比較を図1に示す。

前報で問題提起した材齢20時間における圧縮強度（脱型強度）は、硬化促進材料を用いることで大幅に改善されることが確認された。これは各種の硬化促進材料によって、C₃Sの水和が促進された効果によると推察される。特に、早強セメントを用いた場合には、高ブレンによる高活性とセメントの鉱物組成上、C₃Sの含有率が高いことから、これらの硬化促進効果が顕著に認められ、蒸気養生を適用しなくても翌日には脱型基準強度（12N/mm²）を満たすことが可能であった。また、併用系に関しては、単体使用時よりも硬化促進の効果が高く、相乗効果が生じたと推察される。各材料に因る具体的な水と促進のメカニズムを把握するためには、水と解析を実施する必要があるものと捉える。

水と促進による初期強度の発

表1 γ-C₂S を混和したシールドセグメント用コンクリートの暫定配合

Series	W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)								SP (P×%)	N2 (B×%)	CSH (B×%)	CO ₂ 排出 原単位 (kg-CO ₂ /t)
				W	P				S	G					
					B						γ - C ₂ S				
					C	BFS	EX	CSA							
B-L235 (示方書基準内)	51.5	30.4	38.0	175	185	135	20	---	235	607	1003	0.35	0 / 3.0	0 / 4.5	190.3
	50.0	29.9	38.0	175	185	135	10	20	235	603	995	0.35	0 / 3.0	0 / 4.5	195.6
B-L310 (示方書基準外)	58.2	30.2	38.0	195	185	130	20	---	310	563	930	0.35	0 / 3.0	0 / 4.5	199.2
	56.5	29.8	38.0	195	185	130	10	20	310	559	922	0.35	0 / 3.0	0 / 4.5	204.4

[Note] C: Cement-NC/HC, BFS: Blast furnace slag, EX: Expansion admixture, S: Fine aggregate, G: Coarse aggregate, SP: Superplasticizer

表2 セメントおよび硬化促進材料

使用材料		記号	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	NC	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3240 cm ² /g
	早強ポルトランドセメント	HC	密度：3.14g/cm ³ ，比表面積：4390 cm ² /g
硬化促進材料	亜硝酸系硬化促進剤	N2	窒素系無機塩化合物
	C-S-H系硬化促進剤	CSH	カルシウムシリケート水和物
	CSA系硬化促進材	CSA	カルシウムサルフォアルミネート系

キーワード CUCO，シールドセグメント，環境配慮型コンクリート，γ-C₂S，硬化促進材料，蒸気養生

連絡先 〒112-0002 東京都文京区小石川1-4-1 住友不動産後楽園ビル

ジオスター（株）技術本部 TEL: 03-5844-1203

現度合いは、CSA > N2 > CSH の順に効果が高く、CSA に関しては粉体であるために実質的な W/B が低下する効果も含んでいるといえる。N2 に関しては、主成分である亜硝酸カルシウムが高炉スラグの水和も促進する³⁾ため、セメントの水和促進をメインとする CSH よりも、強度発現への寄与度が大きいものと推察される。

28 日強度に関しては、気中養生と水中養生（標準養生）で大きな差が認められた。標準養生を行った場合は、硬化促進材料を使用したことによる脱型時の強度差が、最終的な圧縮強度に関しても影響を及ぼしている。一方で、気中養生を行った場合は、硬化促進材料の種類やセメント種類によって、大きな違いは認められていない。したがって、現状の配合では十分な水和反応を導くためには、外部からの水の供給が不可欠といえる。当該配合において 28 日の設計基準強度に依拠して、水中養生導入の検討を行う必要があると考えられる。なお、この状況は B-L235 と比較して W/B が高い B-L310 の配合についても該当し、適切な水中養生を行うことで強度増進の可能性が認められるとともに、蒸気養生なしでも脱型基準強度を満足することが確認された。

4. まとめ

γ -C₂S を混和したコンクリート配合において、硬化促進材料の効果を検討した結果、以下の知見が得られた。

- ① 早強セメントと硬化促進材料を併用した場合、蒸気養生を実施しなくても脱型基準強度を満足できる。
- ② 水和促進による初期強度の発現度合いは、CSA > N2 > CSH の順に効果が高い結果であった。
- ③ 28 日の設計基準強度に依拠して、所定期間の水中養生を行うことで水和反応による緻密化の効果が得られ、圧縮強度の底上げを図ることができる。

謝辞：本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP21014）を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技术及び評価技術の開発で得られた成果である。

参考文献

1) 取達剛 他：コンクリートの材料・施工技术および品質評価技術の開発－CUCO（Carbon Utilized COcrete）によるカーボンニュートラル社会の実現へー，コンクリートテクノ，Vol.42, No.1, pp.58-64, 2023

2) 松野真樹 他： γ -C₂S を混和したコンクリートのシールドセグメントへの適用性の検討 その 1，土木学会第 78 回年次学術講演会, 2023（投稿中）

3) 坂井悦郎 他：亜硝酸カルシウムを添加した高炉スラグ高含有セメントの水和，Cement Science and Concrete Technology, Vol.71, No.1, pp.62-67, 2017

表 3 実験結果

Series	セメント種類	硬化促進材料			圧縮強度 (N/mm ²)					20h 気中養生の強度増進倍率*
		N2	CSH	CSA	20h 気中	20h 蒸気	7d 気中	28d 気中	標準養生	
B-L235 ベース	N-PL	---	---	---	3.34	6.82	30.6	34.7	47.3	1.00
	N-N2	○	---	---	5.81	9.55	32.8	42.1	48.9	1.74
	N-CSH	---	○	---	4.70	9.17	30.2	38.6	50.1	1.41
	N-CSA	---	---	○	7.32	12.1	35.9	49.6	55.4	2.19
	N-(N2+CSH)	○	○	---	7.59	13.3	32.2	44.0	49.9	2.27
	N-(N2+CSA)	○	---	---	9.70	14.6	37.3	54.8	58.7	2.90
	N-全併用	○	○	○	11.3	15.9	40.6	52.6	65.5	3.38
	H-PL	---	---	---	6.08	8.96	28.8	35.2	48.6	1.82
	H-N2	○	---	---	10.6	14.6	33.7	43.1	51.9	3.17
	H-CSH	---	○	---	9.59	15.3	32.1	42.0	55.0	2.87
	H-CSA	---	---	○	11.7	18.1	38.0	50.1	58.9	3.50
	H-(N2+CSH)	○	○	---	12.0	19.3	36.6	45.4	54.9	3.59
	H-(N2+CSA)	○	---	○	14.9	19.7	43.2	55.5	63.0	4.46
	H-全併用	○	○	○	16.8	22.5	42.8	57.4	61.2	5.03
B-L310 ベース	N-全併用	NC	○	○	9.84	16.0	33.3	41.6	59.0	N/A
	H-N2	HC	○	---	11.1	13.6	32.5	38.6	51.3	N/A
	H-全併用	HC	○	○	15.6	20.3	38.0	45.9	61.2	N/A

※ 硬化促進材料使用時の強度/N-PL の強度

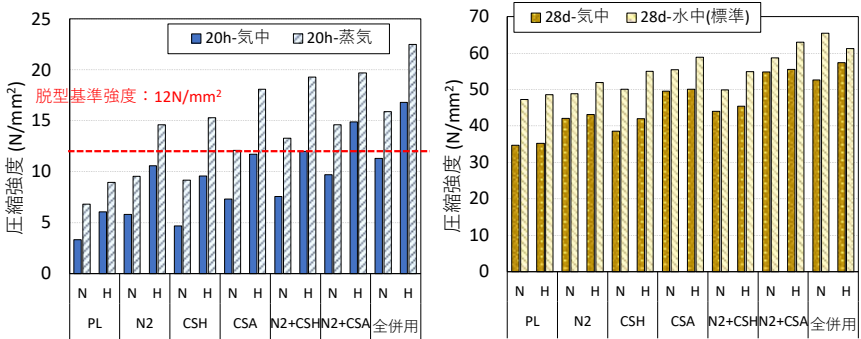


図 1 硬化促進材料使用時の圧縮強度の比較（B-L235 シリーズ）