

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

－GI 基金事業『CUCO』開発成果－

ジオスター（株） 正会員 ○松野 真樹 正会員 鶴田 昌宏

鹿島建設（株） 正会員 関 健吾 正会員 山野 泰明 正会員 境 美緒

1. 目的

2020 年 10 月，日本政府は 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言し，これらの検討・開発が各分野で加速している．建設分野に目を向けると，様々な構造物等でコンクリートが用いられているが，その主要材料のセメントは，焼成工程における熱源による CO₂ 排出と，石灰石からの多量の脱炭酸による CO₂ の排出で，CO₂ 排出原単位が非常に高いといった一面を持つ．したがって，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，材料や配合の検討を行い，これらを削減していくことが急務である．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，研究開発を進めている¹⁾．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に適用することを目的に，配合検討を実施した結果について報告する．

2. 実験概要

本検討では，シールドセグメントへ適用可能な CO₂ 固定化コンクリートの配合構築を見据えつつ，当該コンクリートに CO₂ 固定化材料である炭酸化混和材をどの程度まで混和でき，その際の CO₂ 排出原単位がどの程度であるかを見極めることを目的とした．

実験に用いた材料およびそれぞれの CO₂ 排出原単位を表 1 に，示方配合を表 2 に示す．

なお，配合表中の

NB-L260/NB-L292 はモル

タル先練りでの混練を行

い，それ以外の水準は材料

一括投入で混練を行った．

また，シールドセグメン

ト用配合の導出（スランブ

配合：3cm，設計基準強

度：42N/mm²，脱型強度：

12N/mm²，カーボンニュー

トラル化）にあたり，材料由来

の CO₂ 排出原単位を削減する

ため，現行配合を基にフレッシュ

性状と設計基準強度を満た

す範囲で，高炉スラグ微粉末の

混和を行った．また，単位水量

が過大とならない範囲で，コン

クリートの CO₂ 固定化のポテ

表 1 使用材料および CO₂ 排出原単位

使用材料	産地その他	記号	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	NC	766.6 ²⁾	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3240 cm ² /g
	高炉スラグ微粉末	BFS	26.5 ²⁾	密度：2.88g/cm ³ ，比表面積：4160 cm ² /g
混和材	石灰系膨張材	EX	764.3 ³⁾	密度：3.05g/cm ³ ，比表面積：4940 cm ² /g
	炭酸化混和材	γ-C ₂ S	124.5 ⁴⁾	密度：2.85g/cm ³ ，比表面積：2420 cm ² /g
細骨材	大井川産川砂	S	3.7 ²⁾	表乾密度：2.62g/cm ³ ，絶乾密度：2.60g/cm ³ ， 吸水率：1.03%，粗粒率：2.93，微粒分量：0.61%
粗骨材	大井川産玉砕石 (20-5mm)	G	2.9 ²⁾	表乾密度：2.65g/cm ³ ，絶乾密度：2.64g/cm ³ ， 吸水率：0.69%，粗粒率：6.49，実積率：63.0%
混和剤	高性能減水剤	SP	---	ポリカルボン酸系化合物
	初期強度促進剤	N2	---	窒素系無機塩化合物

表 2 検討に用いたコンクリートの示方配合

Series	W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	目標 スランブ® (cm)	目標 空気量 (%)	単位量 (kg/m³)						SP (P×%)	N2 (B×%)	
						W	P				S			G
							B			γ-C₂S				
							NC	BFS	EX					
N-L0	33.8	33.8	41.9	3.0 ±1.5	2.0 ±1.5	135	380	---	20	0	788	1107	0.325	3.0
N-L60	37.0	31.7	41.0			135	345	---	20	60	761	1107	0.255	3.0
NB-L60	38.6	32.9	41.0			135	195	135	20	60	761	1107	0.255	3.0
NB-L160	45.3	30.9	36.4			155	190	132	20	160	626	1107	0.275	3.0
NB-L210	50.0	30.9	33.1			170	185	135	20	210	542	1107	0.325	3.0
NB-L235	51.5	30.4	31.6			175	185	135	20	235	506	1107	0.35	3.0
NB-L260	52.9	30.0	30.0			180	185	135	20	260	470	1107	0.35	3.0
NB-L288	61.4	32.6	32.7			200	181	126	20	288	490	1020	0.275	3.0
NB-L292	57.1	30.3	32.7					189	184	127	20	292	497	1035

キーワード シールドセグメント，カーボンニュートラル，環境配慮型コンクリート，γ-C₂S，高炉スラグ，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

ンシヤルを最大化できるように、可能な限り多量の炭酸化混和材 (γ -C₂S) を混和することを試みた。強度試験用の供試体は、 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の鋼製型枠にて作製した。なお、蒸気養生は、前置き 2 時間、蒸気養生 3 時間 (昇温速度: $20^\circ\text{C}/\text{h}$ で 50°C まで、 50°C で 1.5 時間保持、その後 20°C の試験室に移動) とした。気中/標準養生は、供試体打設直後に 20°C の試験室に静置し、翌日脱型後から気中/水中で養生の上、所定材齢で圧縮強度試験に供した。

表 3 実験結果

Series	フレッシュ性状			圧縮強度 (N/mm ²)				
	スランブ (cm)	空気量 (%)	CT ($^\circ\text{C}$)	20h 気中	20h 蒸気	7d 気中	28d 気中	標準養生
Ref.	2.9	3.4	15.3	12.6	14.1	47.3	53.4	61.3
N-L0	3.3	2.9	17.7	18.9	22.4	54.9	66.0	67.9
N-L60	2.0	2.6	18.3	18.7	19.6	51.7	63.1	68.0
NB-L60	1.5	2.5	17.7	11.4	12.7	41.5	56.8	64.3
NB-L160	1.5	2.8	16.9	6.99	11.8	35.3	45.0	57.2
NB-L210	2.0	2.3	17.8	6.19	10.3	32.3	42.3	46.5
NB-L235	1.9	2.0	18.7	5.81	9.55	32.8	42.1	48.9
NB-L260	1.7	2.5	18.3	5.06	9.58	30.9	41.3	50.0
NB-L288	2.8	2.1	18.7	5.03	7.51	24.2	34.9	42.4
NB-L292	6.0	1.9	18.6	6.66	9.56	30.4	44.4	49.9

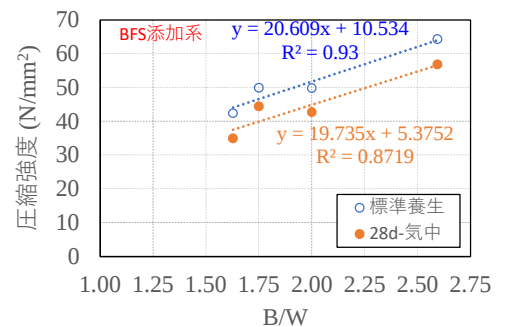


図 1 圧縮強度 (材齢 28 日) と B/W の関係

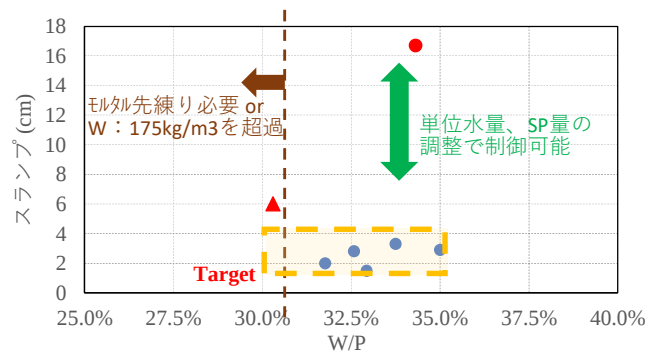


図 2 シールドセグメント用配合のターゲット

3. 実験結果および考察

実験結果を表 3 に示す。28 日材齢における圧縮強度と B/W の関係は、 γ -C₂S の添加量に関わらず、線形関係が成り立つことを確認した (図 1 参照)。コンクリート標準示方書の範囲内 ($W < 175\text{kg/m}^3$, $W/B < 55\%$) で、フレッシュ性状および設計基準強度の要求を満たしつつ、最も CO₂ 排出原単位が高いと試算される。

一方、更なる γ -C₂S の添加で CO₂ 固定化のポテンシャルを高めた (NB-L260, NB-L288, NB-L292) 場合、 γ -C₂S を 300kg/m^3 近く混和することで極端に粉体量が多く、一括練りではペースト分が団子状になる状態が見受けられた。この改善には、モルタル先練りが有効で、併せて単位水量の削減と γ -C₂S の増量が可能となる。図 2 に示すように、W/P が 30～31% を下回る状況下では、混練方法も精査することが重要である。一方で、脱型強度まで到達するには、1 日では不十分であることから、今後、特に初期強度の立ち上がりを改善する必要があると考えられた。また、炭酸化養生による CO₂ 固定能力を確認していく必要がある。

4. まとめ

γ -C₂S を混和したコンクリートのシールドセグメントへ適用性を検討した結果、以下の知見が得られた。

- ① 標準示方書の制約を超過しても、フレッシュ性状/設計基準強度を満たせることが確認された。
- ② 既存の製造工程に乗せるには、20h 強度を 12N/mm^2 まで引き上げるような強度改善策構築が必要である。
- ③ γ -C₂S を混和したシールドセグメント用の配合としては、NB-L235 および NB-L292 (γ -C₂S の添加量: 300kg/m^3 程度、モルタル先練り) が最適と考えられ、CO₂ 固定化の検討に進めていく必要がある。

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・施工技術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・施工技術および品質評価技術の開発—CUCO (Carbon Utilized COConcrete) によるカーボンニュートラル社会の実現へ—, コンクリートテクノ, Vol.42, No.1, pp.58-64, 2023
- 2) 土木学会: コンクリートライブラリー134
- 3) セメント協会: セメントの LCI データの概要, 2013
- 4) 庄司慎 他: 副生の水酸化カルシウムを用いた C₂S の製造と CO₂ 排出原単位, Cement Science and Concrete Technology, Vol.67, No.1, pp.553-558, 2013