

CO₂ 固定化を目指した普通コンクリート舗装の配合に関する要素検討
ー G I 基金事業『CUCO』開発成果ー

鹿島道路（株） 正会員 ○田口翔大，横田慎也，鎌田 修，千葉浩幸
鹿島建設（株） フェロー会員 坂井吾郎 正会員 取違 剛，関 健吾

1. はじめに

我が国は、2020 年 10 月に 2050 年カーボンニュートラルを目指すことを宣言し、それに伴い「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が 2021 年 6 月に策定された。今後、CO₂ 削減・有効利用技術の開発が期待される中、筆者らはコンソーシアム「CUCO（Carbon Utilized COncrete）」の一員として研究開発を進めている。これまで、CO₂ と反応して硬化するダイカルシウムシリケート γ 相（以下、 γ C₂S）をコンクリート用混和材として用い、強制的に炭酸化（以下、炭酸化養生）することで、コンクリート中に CO₂ を固定する技術を研究してきた^{1) 2)}。当該技術を一般的な普通コンクリート舗装に適用することができれば、有用な CO₂ 削減技術の一つとなり得る。そこで本研究では、普通コンクリート舗装への CO₂ 固定化を目指し、室内にて配合に関する要素検討を実施した。

2. コンクリート配合と養生条件

使用材料を表-1 に、実施配合を表-2 に示す。舗装用コンクリートの基本配合（No.1）は、曲げ 4.5-2.5-20BB とした。 γ C₂S を添加した配合（No.2～No.5）は、これまでの検討結果¹⁾ を参考に γ C₂S の添加量（以下、 γ 置換率）をセメント質量に対して 5%および 30%とし、 γ C₂S をセメントと置換した配合の No.2、No.3 と、砂と置換した配合の No.4、No.5 を設定した。フレッシュ性状は、混和剤使用量を標準の範囲内で調整することで確保できることを確認しているが、粉体量の最も多い配合 No.5 についてのみ、AE 減水剤標準形（高機能タイプ）での調整が難しく、高性能 AE 減水剤を使用した。供試体は、20℃で 1 日の封緘養生を行った後に脱型し、その後所定の材齢まで表-3 に示す条件で養生した。標準養生は No.1 のみ実施し、炭酸化養生 A および B は全配合にて実施した。

3. 試験内容と評価項目

試験は、まず炭酸化養生開始時の強度を確認するため、材齢 1 日における圧縮強度試験（JIS A 1108）を実施した。次に、曲げ強度試験（JIS A 1106）によって各配合の硬化特性を評価し、曲げ強度試験後の供試体断面を対象に中性化（炭酸化）深さの測定（JIS A 1152）を行い、炭酸化進行状況を確認した。曲げ強度試験および炭酸化深さの測定は配合、材齢、および養生条件毎に n=3 で実施した。

4. 各要素が硬化性状と炭酸化状況に与える影響

(1) 硬化性状

材齢 1 日における圧縮強度試験結果を図-1 に示す。基本配合の No.1 と比較し、セメントと γ C₂S を置換した配合の No.2、No.3 は、 γ 置換率が大きくなる（セメント量が減少する）と初期強度が低下した。一方、砂を γ C₂S と置換した配合の No.4、No.5 は、 γ 置換率が大きくなると初期強度が向上した。この現象は、微粉末効果（水和反応速度の促進や物理的な充填作用）が働いた³⁾ ためと思われる。次に、各条件における曲げ強度試験結果を図-2 に示す。基本配合 No.1 の材齢 28 日の曲げ強度は、炭酸化養生 A のほうが標準養生よりも大きく、炭酸化養生による強度増進効果を確認した。 γ C₂S をセメント

表-1 使用材料

項目	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	C	B 高炉セメント B 種、密度：3.04g/cm ³
混和材	γ	
細骨材	S	山砂、密度：2.63g/cm ³
粗骨材	G	硬質砂岩、密度：2.65g/cm ³
混和剤	Ad	AE 減水剤標準形（高機能タイプ）、高性能 AE 減水剤

表-2 実施配合

No.	W/B (%)	γ 置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	B		G	S
					C	γ		
1	48.0	0.0	37.6	145	302	0	1177	697
2	48.0	5.0	37.6	145	287	15	1177	697
3	48.0	30.0	37.6	145	211	91	1177	697
4	45.7	5.0	37.1	145	302	15	1177	684
5	36.9	30.0	34.8	145	302	91	1177	619

表-3 養生条件

名称	記号	養生条件（摘要）	総材齢
標準養生	N	20℃水中養生（基本配合 No.1 のみ）	7, 28
炭酸化養生 A	A	CO ₂ 濃度 80%, 気温 50℃, 湿度 40%	3, 5, 7, 28
炭酸化養生 B	B	CO ₂ 濃度 20%, 気温 50℃, 湿度 40%	3, 7

キーワード：CUCO，炭酸化養生，普通コンクリート舗装，曲げ強度，炭酸化深さ
連絡先：〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島道路（株）技術研究所 TEL.042-483-0541

と置換した配合 No.2, No.3 の材齢 28 日の曲げ強度は、同じく炭酸化養生 A を実施した基本配合 No.1 よりも増加した。γ 置換率が大きいほどその傾向は強く、これは図-1 に示す初期強度とは異なる傾向である。すなわち、セメント量が少ない配合では初期強度は低いものの、炭酸化による長期強度の増進が期待できる結果となった。一方、γC₂S を砂と置換した配合 No.4, No.5 の材齢 28 日の曲げ強度は、炭酸化養生 A を実施した基本配合 No.1 よりもやや低い。すなわち、γC₂S を砂と置換し総粉体量を増加させた配合では初期強度は増加する一方、表層が緻密化することにより炭酸化が進行しづらく、長期的には強度増進にくくなる傾向となった。また、炭酸化養生の CO₂ 濃度の違いが、材齢 7 日までの若材齢期の曲げ強度へ与える影響については、本研究では一定の傾向が見られなかった。

(2) 炭酸化状況

材齢 7 日までの炭酸化深さ測定結果を図-3、炭酸化深さから算出した炭酸化速度係数を表-4、炭酸化養生後における供試体断面の代表例を表-5 に示す。基本配合 No.1 と比較し、γC₂S をセメントと置換した配合 No.2, No.3 では炭酸化の進行が早く、特に γ 置換率の大きい配合 No.3 ではその傾向が顕著であった。一方、γC₂S を砂と置換した配合では、γ 置換率の小さい配合 No.4 は基本配合と同程度の炭酸化進行状況であったが、γ 置換率の大きい配合 No.5 では炭酸化の進行が鈍くなっていることが確認された。γC₂S を含めた総粉体量が多くなると、炭酸化養生初期に表面が緻密化し、その後の内部への炭酸化が阻害される可能性が示唆された。また、CO₂ 濃度を 80%とした炭酸化養生 A が、CO₂ 濃度を 20%とした炭酸化養生 B よりも炭酸化の進行が早い傾向が確認されたが、その差は配合毎に変化していた。

5. まとめと今後の展望

普通コンクリート舗装への CO₂ 固定化に関する要素検討として、γC₂S を添加したコンクリート配合で硬化特性と炭酸化の進行状況を評価した結果、γC₂S を置換する対象物質（セメント、砂）および γ 置換率の違いが、硬化特性や炭酸化状況に影響を与えることがわかった。なお、本研究では CO₂ 濃度を変化させた 2 条件での炭酸化養生を所定の材齢まで行い、炭酸化養生開始時期も材齢 1 日に設定した。実際は、炭酸化養生は現場にて実施することを想定しており、最適な CO₂ 固定化コンクリート配合を見出す際には、現場における炭酸化養生条件や期間と併せて検討、評価する必要がある。

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) 取道剛, 横田真也, 吉岡一郎, 盛岡実:炭酸化したセメント系材料における CO₂ 固定量の評価手法および物性変化に関する研究 土木学会論文集 E2, Vol.77, No.2, pp.37-54, 2021.

2) 横田真也, 神下竜三, 鎌田修, 吉田祐麻, 小林聖, 取道剛, 芦沢良一:炭酸化養生を行った透水性コンクリート舗装の性能に関する一検討, 第77回年次学術講演会, V-92, 2022.9.

3) (社) 日本コンクリート工学協会:石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム, pp.59-60, 1998.5.

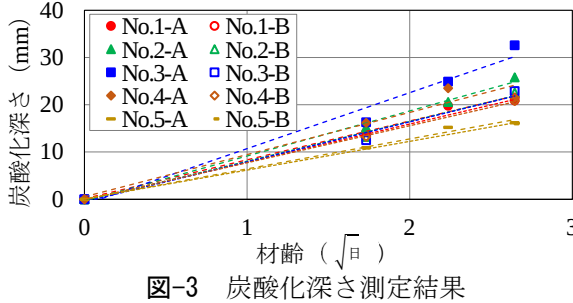
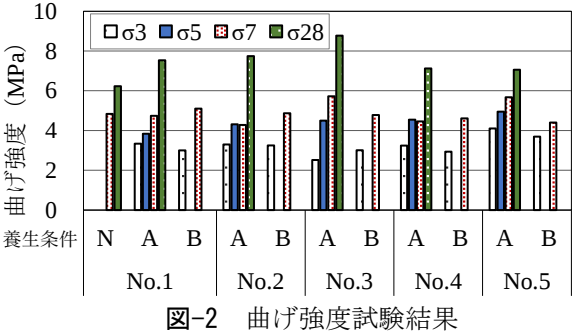
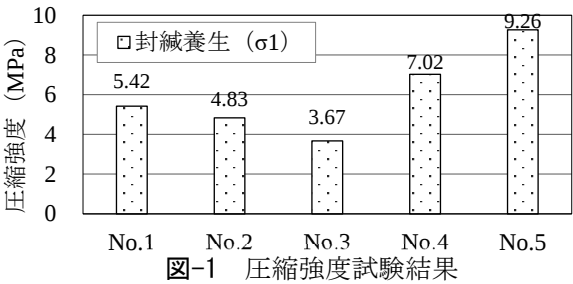


表-4 炭酸化速度係数 (材齢 7 日)

配合	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
炭酸養生 A	8.22	9.55	11.8	8.93	6.35
炭酸養生 B	8.06	8.42	8.47	7.83	6.08

表-5 炭酸化養生後における供試体断面の代表例

条件*	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
炭酸 A σ7					
炭酸 B σ7					
炭酸 A σ28					

*炭酸 A：炭酸化養生 A，炭酸 B：炭酸化養生 B を示す