

## 長期暴露した炭酸化コンクリートの力学特性に関する検討

鹿島建設(株) 正会員 ○小川雄一郎 取違 剛 関 健吾 中国電力(株) 正会員 河内友一  
デンカ(株) 正会員 森泰一郎 ランデス(株) 正会員 細谷多慶 藤木昭宏

## 1. 目的

筆者らはこれまでに、 $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (以下、 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ ) をセメントの一部に置換したコンクリートを高濃度の $\text{CO}_2$ 環境下で材齢初期から強制的に炭酸化養生することで、無置換のものと同様以上の強度や空隙率を確保しつつ、大量の $\text{CO}_2$ をコンクリートに固定できることを明らかにしてきた<sup>1)</sup>。このコンクリート(以下、炭酸化コンクリート)は、材齢初期からの炭酸化養生によって主要鉱物が $\text{CaCO}_3$ と低Ca/Si比のC-S-Hとなっており、一般的なコンクリートの鉱物組成とはやや異なることから、コンクリートとしての長期的な品質の変遷を把握することが重要である。本研究では、9年間自然環境に暴露した炭酸化コンクリートの力学特性を評価した。

## 2. 検討概要

今回対象としたのは、インターロッキングブロック(以下、ILB)と、歩車道境界ブロック向けの有スランプリングコンクリート(以下、境界ブロック)である。使用材料を表-1に、ILBの配合を表-2に、境界ブロックの配合を表-3に示す。ILBについて、高炉セメントB種を用いたW/P=30%の即時脱型が可能なモルタルを一般配合とした。また、高炉セメントの一部を $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ および石炭灰で置換し、即時脱型が可能なように単位水量を調整した炭酸化ILBを2種類作製した。境界ブロックについては、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末、 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ および石炭灰で置換した炭酸化コンクリートを用いた。比較として、W/C=47%、スランプ18cmの一般的な配合のコンクリートも暴露試験に供した。

それぞれの配合のILBは、100mm×200mm×80mmに即時脱型機械によって成型した。境界ブロックは、練混ぜ後に $\phi$ 100mm×200mmの円柱型枠に打ち込んだ。その後、一般配合のILBおよび境界ブロックに関しては、1日間プレキャスト製品工場にて約60℃の蒸気養生を翌朝まで行ったのち、屋外環境で暴露を開始した。炭酸化養生を行ったILBおよび境界ブ

ロックは、既報<sup>1)</sup>のとおり、打込みから2日まで大気中にて養生し、その後、温度50℃、湿度50%RHに設定した炭酸化養生槽内にて、火力発電所の排気ガスを封入して28日間養生した。養生期間中における槽内の $\text{CO}_2$ 濃度は15~20%であり、養生完了時点で全断面が炭酸化していることをフェノールフタレイン溶液にて確認した。養生終了後のILBおよび境界ブロックを広島県福山市内の

表-1 使用材料

種別	材料	記号	概要
インターロッキングブロック	セメント	BB	高炉セメントB種：密度 3.04 g/cm <sup>3</sup>
	混和材	$\gamma\text{-C}_2\text{S}$	γ-カルシウムシリケートγ相：密度 2.85g/cm <sup>3</sup>
		F	石炭灰：密度 2.20g/cm <sup>3</sup>
	細骨材	S1	山砂：表乾密度 2.56 g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率 2.47
混和剤	AD1	特殊非イオン活性剤	
コンクリート	セメント	OPC	普通ポルトランドセメント：密度 3.15 g/cm <sup>3</sup>
	混和材	BFS	高炉スラグ微粉末：密度 2.92 g/cm <sup>3</sup>
	細骨材	S2	山砂：表乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率 2.76
	粗骨材	G	碎石 (Gmax=20mm) 表乾密度：2.61g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率 6.65
混和剤	AD2	AE減水剤(リゲニンスルホン酸系)	

表-2 インターロッキングブロックの配合

配合	W/P (%)	W/BB+ $\gamma$ (%)	設計空隙率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	BB	$\gamma\text{-C}_2\text{S}$	F	S1
一般	30	30	8.0	181	603	0	0	1386
炭酸化-40%		40		190	428	48	157	1282
炭酸化-60%		60		210	315	35	350	1114

※P=BB+ $\gamma$ +F, ※AD1=P×1%添加

表-3 歩車道境界ブロック向け有スランプリングコンクリートの配合

配合	W/P (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
				W	OPC	BFS	$\gamma\text{-C}_2\text{S}$	F	S2	G	AD
一般	47	18	4.5	173	368	—	—	—	629	1104	0.92
炭酸化	60	12	4.5	161	101	82	32	53	844	965	0.67

※P=OPC+BFS+ $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ +F

キーワード：環境配慮型コンクリート、 $\text{CO}_2$ 吸収コンクリート、 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$ 、圧縮強度、曲げ強度

連絡先：〒760-0050 香川県高松市亀井町1番地3 鹿島建設(株)四国支店 TEL 087-839-3055

環境に暴露し、材齢半年、1.9年、および9年において境界ブロックの圧縮強度、静弾性係数を測定した。また、ILBの曲げ強度をJIS A 5371の曲げ耐力評価手法に準拠して三点曲げ載荷試験にて測定した。

### 3. 試験結果

境界ブロックにおける材齢と圧縮強度の関係を図-1に示す。一般配合の境界ブロックは材齢1.9年から材齢9年で圧縮強度が1.15倍に増加した。これは、未水和セメントの長期的な水和反応によるものと考えられる。一方、炭酸化養生した境界ブロックは材齢1.9年まで圧縮強度が増加するものの、その後変化しない結果となった。材齢初期の炭酸化養生によって、セメント中のCa分の多くや $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sが炭酸化し、未反応のセメントや高炉スラグ微粉末も材齢1.9年までのあいだで反応したのと考えられる。なお、ポーラスコンクリートを対象とした既往の研究<sup>2)</sup>では、炭酸化養生を過度に長く行うことでC-S-Hが分解し、強度低下が生じる可能性が指摘されているが、本検討でその傾向は見られなかった。

次に、境界ブロックにおける圧縮強度と静弾性係数の関係を図-2に示す。同図には、2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】に示されている両者の関係を併記した。一般配合の境界ブロックは示方書の式上にプロットされた。一方、炭酸化養生を行った境界ブロックは、示方書式に比べて静弾性係数がやや小さい結果となった。今後データの蓄積が必要であるものの、炭酸化コンクリートは一般的なコンクリートに比べて静弾性係数がやや小さい可能性がある。

ILBにおける材齢と曲げ強度の関係を図-3に示す。同図には各材齢における3体の試験結果をすべてプロットし、その平均値を線で示した。一般配合のILBは材齢によらずほぼ一定となった一方、炭酸化させたILBは曲げ強度が増加した。特に炭酸化-40%は材齢1.9年から9年で曲げ強度が1.75倍に増加した。炭酸化反応は圧縮強度よりも曲げ強度増加に大きく寄与することが既往の研究<sup>3)</sup>で明らかにされているが、このような長期での曲げ強度増加についての研究成果は見られない。C-S-Hの組成に変化が起こった可能性があり、今後、詳細なメカニズムについて検討する必要がある。

### 4. まとめ

9年間、自然環境に暴露した炭酸化コンクリートの力学特性を評価した結果、圧縮強度は長期的に変化せず、曲げ強度が大きく向上する可能性が示された。今後、メカニズムに関する詳細な分析を行う予定である。

### 参考文献

1) 取違ほか：炭酸化養生を行ったコンクリートのCO<sub>2</sub>収支ならびに品質評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1450-1455，2012。 2) 島ほか：ポーラスコンクリートの二酸化炭素ガス吸収による強度増加，セメント・コンクリート論文集，No.46，pp.904-909，1992。 3) 渡邊ほか：各種混和材を含んだモルタルの炭酸化養生による高耐久化，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.653-658，2003。

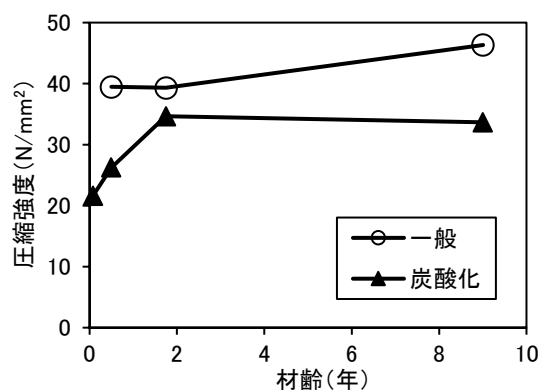


図-1 材齢と圧縮強度 (境界ブロック)

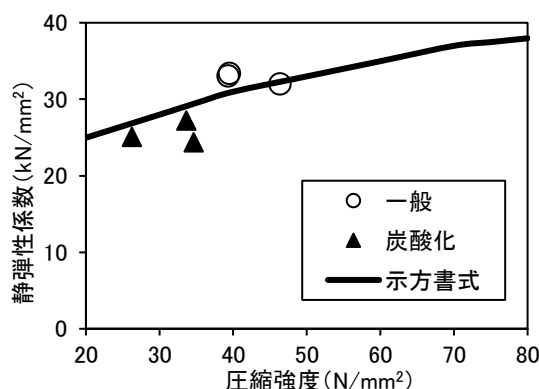


図-2 圧縮強度と静弾性係数 (境界ブロック)

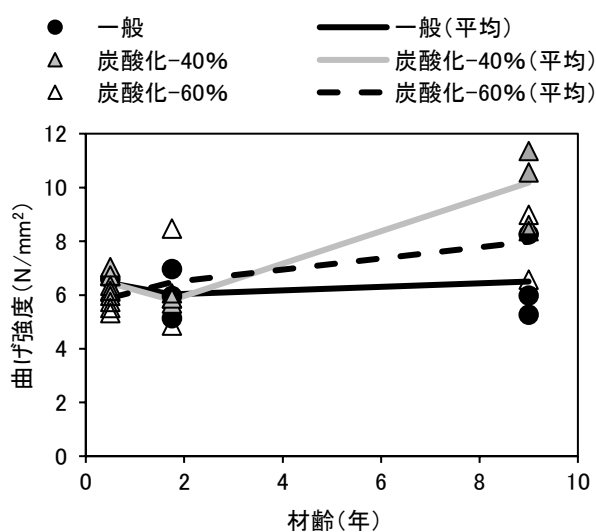


図-3 ILBにおける材齢と曲げ強度