

# 長寿命化コンクリート

EIEN

横 関 康 祐・渡 邊 賢 三・芦 澤 良 一・取 違 剛

コンクリート構造物の早期劣化問題や維持管理の重要性が認識され、ライフサイクルコストを重視した新設構造物の設計や補修工法が広く認知されるようになってきている。これらに資する技術として、二酸化炭素による養生と $\gamma$ -C<sub>2</sub>S（ダイカルシウムシリケート $\gamma$ 相）の利用という新しい発想による長寿命化コンクリートを開発した。本長寿命化コンクリートは永遠にその性能を発揮できることを期待するとともに、地球環境に配慮した新しい材料である。本報告では、長寿命化コンクリートの特徴、長寿命のメカニズム、適用事例について概説する。

キーワード：コンクリート、耐久性、溶脱、磨耗、塩害、ライフサイクルコスト

## 1. はじめに

近年、建設投資額の縮小や社会情勢の変化から、作っては壊すという従来のスクラップ・アンド・ビルド型の社会資本整備ではなく、循環型社会、すなわちサステイナブル・ディベロップメントを目指すべきであるとの声が高まり、社会資本のアセットマネジメントやライフサイクルコストを重視した設計や維持管理が進められるようになってきている。これらを実現させるためには、高精度な診断技術、劣化予測技術、マネジメントシステムなどのソフト技術に加えて、構造物の設計耐用年数に応じた性能が明らかな、高い耐久性を有する材料、施工法といったハード技術が必要となる。

このような背景に鑑み、高い耐久性を有する材料技術として、筆者らは、数千年前の古代コンクリートの調査を通じてアイデアを得た、二酸化炭素による促進養生と特殊混和材 $\gamma$ -C<sub>2</sub>S（ダイカルシウムシリケート $\gamma$ 相）の利用という新しい発想により、長寿命化コンクリートを開発した<sup>1), 2)</sup>。本長寿命化コンクリートは永遠にその性能を発揮できることを期待するとともに、Earth, Infinity, ENvironmentを意識し地球環境に配慮した新しいコンクリート材料であり、ライフサイクルコストの低減や、CO<sub>2</sub>排出量の低減など環境負荷低減に活用できる新しい技術である。本報告では、本長寿命化コンクリートの特徴、長寿命化メカニズム、適用事例について概説する。

## 2. 長寿命化コンクリートの特徴

### (1) 材料および配合

本長寿命化コンクリートに使用する材料的な特徴は、低熱ポルトランドセメントと $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを含む特殊混和材を使用すること、また、補強材には、新型のカーボン繊維もしくはステンレス鉄筋を用いることにある。セメント系材料としては、モルタルあるいはコンクリートのいずれも製造可能であり、骨材の種類や品質について特に制限はない。配合としては、使用される環境条件に応じて水結合材比や混和材の添加量を調整することができる。また、初期欠陥の低減や施工性の向上を目的として高流動コンクリートとしている。

### (2) 製造方法

本長寿命化コンクリートは、プレキャストコンクリートとほぼ同様な製造方法、施工方法を用いる。水平二軸強制練りミキサで通常よりもやや長い3～5分程度練り混ぜたコンクリートを型枠内に打設する。次に、およそ10時間後に圧縮強度が15 N/mm<sup>2</sup>となった時点で脱型し、写真—1に示す特殊養生槽中で強制炭酸化養生を行う。このときの養生槽内は、CO<sub>2</sub>濃度=20%、湿度=50% RH、温度=40～50℃に機械的に制御して、7～28日間保持する。所定の養生を終了後、建設現場に運搬し、通常のプレキャスト埋設型枠と同様に施工する（写真—2）。

さらに、この技術を応用し、本長寿命化コンクリートを場所打ちすることも可能である。通常の生コンと



写真一 炭酸化養生槽



写真二 長寿命化コンクリートプレキャスト埋設型枠の運搬



写真三 現場炭酸化養生状況

同様に練り混ぜ、打設された長寿命化コンクリートに対し、現場で密閉空間をつくり、プレキャストと同様な炭酸化養生を現場で行うものである（写真一三）。

(3) 長寿命化コンクリートの諸性能

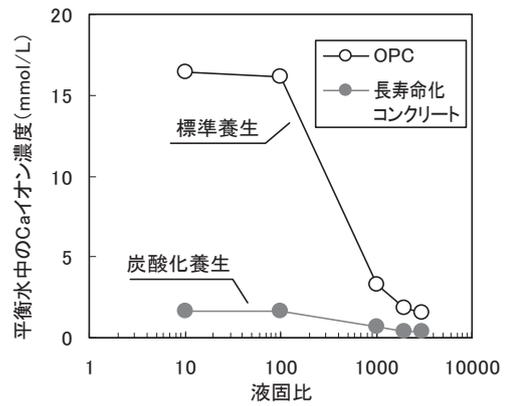
本長寿命化コンクリートの特徴は以下のとおりである。

①溶脱抵抗性が高い

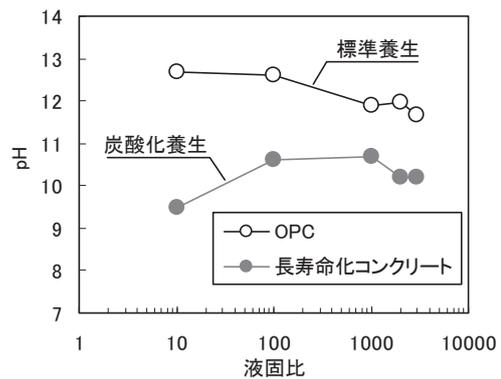
水に接した場合のカルシウム溶脱量は、図一1のように標準養生コンクリート（OPC）の1/10以下となる。これは、本長寿命化コンクリートが、セメント水和物の中でも比較的溶解度の高い水酸化カルシウムを生成せず、炭酸カルシウム  $\text{CaCO}_3$  とケイ酸カルシウム水和物 C-S-H が主成分となるためである。

②低アルカリ性である（pHが低い）

図一2に示すように炭酸化反応の効果により水和



図一 溶解試験におけるCa溶脱量



図二 溶解試験における作用水中のpH

物の溶出が抑制され、結果として周囲の作用水のpHを9～10.5程度と標準養生コンクリートのpH = 12～13に比べて大幅に低く（低アルカリ）することができる。また、一般的に炭酸化によって六価クロムの溶出量が増加すると言われて<sup>3)</sup>が、長寿命化コンクリートでは六価クロムの溶出はほとんどないため、周辺環境や生物に対してやさしい材料であると言える。写真一四は、長寿命化コンクリートもしくは普通コンクリートを粉砕したものを水槽に入れ攪拌したものであるが、普通コンクリートではアルカリ成分が溶け出し、濁りが発生しているのに対し、長寿命化コンクリートの入った水槽は透明である。写真一五は、普通セメント（OPC）、高炉セメントB種（BB）、長寿命化コンクリートの硬化体を粉砕して砂や黒土に混



写真四 水槽内のpHや成分溶出を抑制

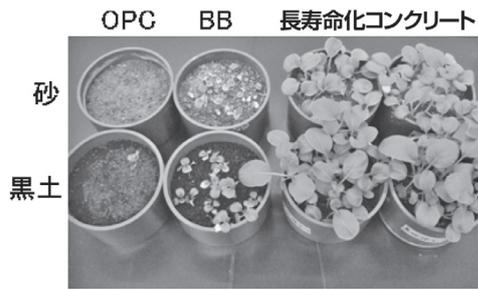


写真-5 長寿命化コンクリートの植物への影響

ぜ、植物の生育を確認した実験であるが、明らかに長寿命化コンクリートの生育がよいことが分かる。

③非常に緻密であり、物質遮断性が高い

炭酸化養生によって空隙率が大幅に小さくなることにより、普通コンクリート（OPC）に比べて拡散係数や透水係数を1/100程度まで小さくすることができる。図-3は、塩水に試験体を1年間浸漬した際の塩化物イオン濃度分布であるが、長寿命化コンクリートは、普通コンクリート（OPC）に比べて塩化物イオンの浸透を大幅に抑制することができている。

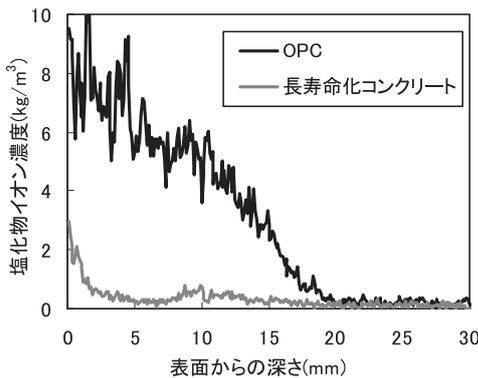


図-3 塩水浸漬試験（1年）

④腐食しない

長寿命化コンクリートは、鉄筋や鋼繊維を使用せず、写真-6に示す新型カーボン繊維や耐食性の高いステンレス鉄筋を使用することで、鋼材の腐食を起こさ

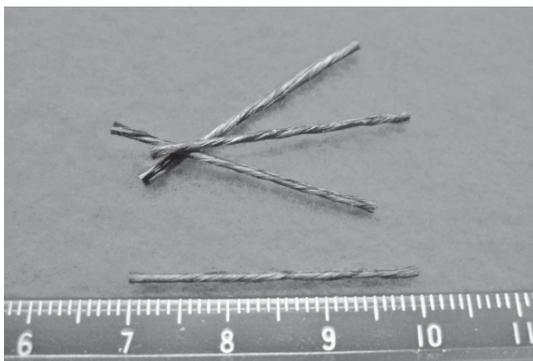


写真-6 新型カーボン繊維

ない配慮がなされている。また、上述したように塩化物イオンや二酸化炭素、水分などを浸透させにくくしているため、長寿命化コンクリートパネルよりも内側に配置されるコンクリート中の鋼材腐食も防ぐことができる。

⑤耐摩耗性が高い

図-4に、すり減り試験の結果を示す。長寿命化コンクリートは、溶脱抵抗性が高いこと、また、表面が緻密化することにより、圧縮強度30N/mm<sup>2</sup>の普通コンクリートに比べて4倍以上、80N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートに比べても2倍以上、耐摩耗性が高くなるという特徴を有する。

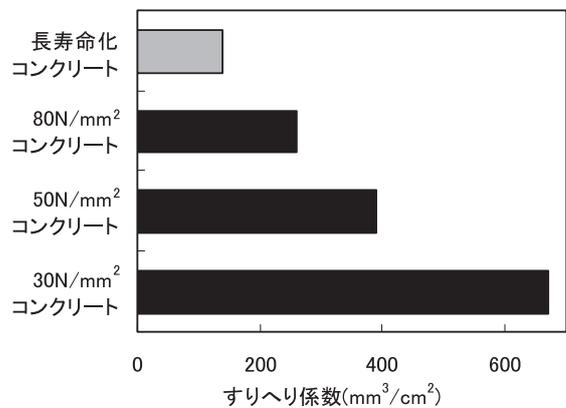


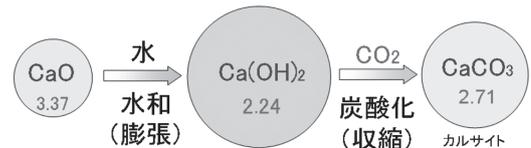
図-4 すり減り試験結果

3. 長寿命化のメカニズム

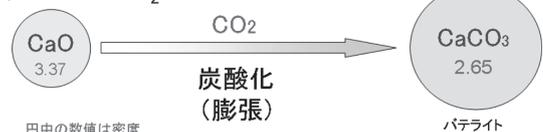
上記のような長寿命化コンクリートの高い性能を得るメカニズムについて以下に紹介する。

図-5にセメント中の酸化カルシウムCaOの水和と炭酸化反応による体積変化を模式化して示す。通常のセメントは、水和反応により水酸化カルシウムCa(OH)<sub>2</sub>を生成する際に膨張する。次に水酸化カルシウムが、炭酸化した場合には、体積収縮を引き起こす。一方、強制的にγ-2CaO・SiO<sub>2</sub>(γ-C<sub>2</sub>S)を炭酸化

セメント中のCaOの炭酸化プロセス



γ-2CaO・SiO<sub>2</sub>のCaOの炭酸化プロセス



円中の数値は密度

バテライト

図-5 γ-C<sub>2</sub>Sの炭酸化による緻密化のメカニズム

させた場合、水酸化カルシウムをほとんど生成せず、直接炭酸カルシウム  $\text{CaCO}_3$  になる。また、生成される炭酸カルシウムは、通常の炭酸化反応で生成するカルサイト ( $\rho=2.71$ ) よりも密度の低いバテライト ( $\rho=2.65$ ) となるため、体積は膨張すると考えられる。これらの結果、空隙が充填されるとともにケミカルプレストレスが発生し、高い耐久性や高い強度が得られるものと考えられる。空気中の二酸化炭素と接した場合の中性化と長寿命化コンクリートを強制炭酸化養生した場合の結晶構造を模式化して図-6に示す。長寿命化コンクリートは、炭酸化反応によるC-S-Hの分解が起きにくく、C-S-Hの骨格を生成したあとに炭酸カルシウム的一种であるカルサイトやバテライトが空隙を充てんすることで緻密な硬化体を形成しているものと考えられる。

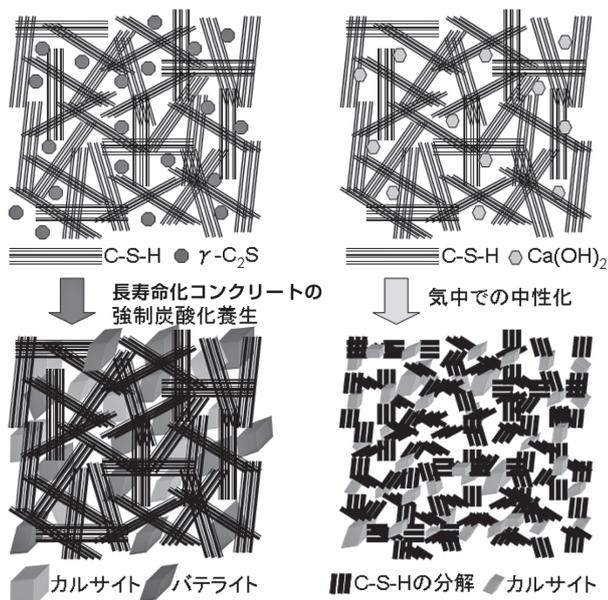


図-6 長寿命化コンクリートの強制炭酸化と通常の中性化の模式図

#### 4. 長寿命化コンクリートの適用事例

対象とした栈橋は約40年の供用期間を経ており、これまでに床版部分を2回補修している。土木学会コンクリート標準示方書に示される劣化過程としては、「劣化期」に相当しており、早急な対策が必要と考えられた<sup>4)</sup>。また、床版厚250mmの全体において腐食発生限界塩化物イオン濃度 $1.2\text{ kg/m}^3$ を超える塩分が浸透しており、目視調査からも鉄筋の腐食、ひび割れ発生が確認できた。このため、断面修復や表面被覆などではなく、床版のコンクリート全体を更新する必要がある。また、本栈橋は石油の荷卸や積込を行う栈橋であるため、電気防食、床版厚の増加などができな

かった。そのため、塩分供給量の多い床版下面側に長寿命化コンクリートの埋設型枠を用い、鉄筋を全て更新し、新たにコンクリートを打設し、床版上面には浸透性吸水防止材を用いることで塩分浸透を抑制することとした。補修前後の外観を写真-7に示す。

本構造物の補修後の耐久性評価を行った結果、補修工法として最も一般的な断面修復工法では10年ごとに繰り返し補修が必要であり、打換え工法でも20～30年程度の寿命と推定された。それに対し、長寿命化コンクリート工法では、74年以上の耐久性が見込めるとの試算結果が得られた。また、長寿命化コンクリート工法は、断面修復工法に比べて、初期補修費用はやや大きくなるが、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた打換え工法や、電気防食工法よりも低コストで、かつ経年的な補修が不要である。したがって、補修後20年以上供用する場合、図-7に示すようにライフサイクルコストLCCを大幅に低減できる。

さらに、同種工事において、補修時における $\text{CO}_2$ 排出量を算定した結果を図-8に示す。これによると、ライフサイクル $\text{CO}_2$  (LCCO<sub>2</sub>)も20年以上供用することにより、他の工法に比べて大幅に低減でき、環境への貢献も期待できると考えられる。

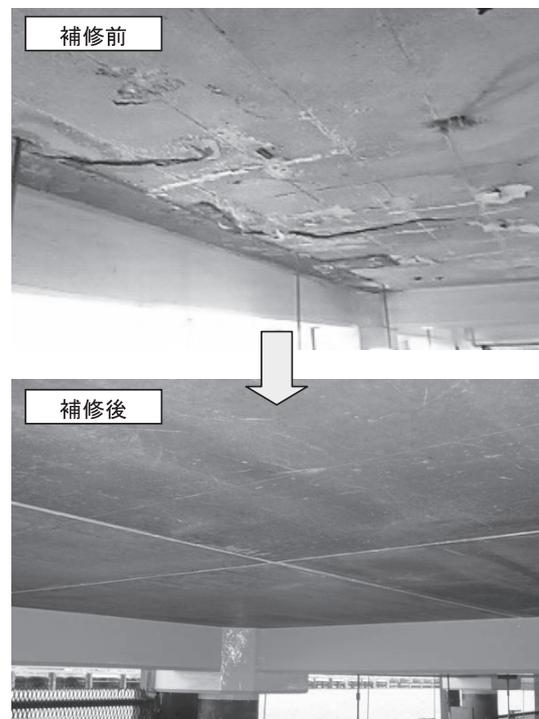


写真-7 栈橋底版の補修前後の外観

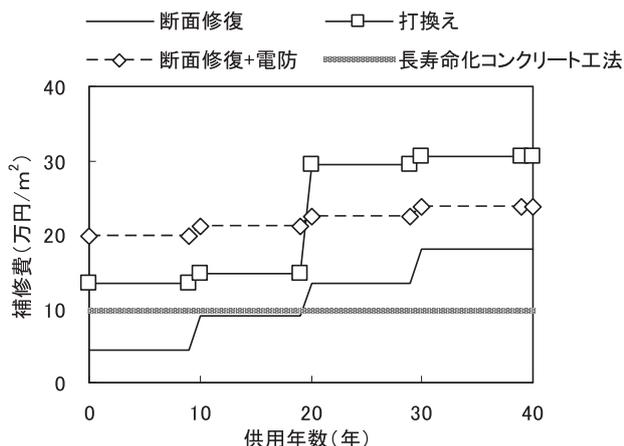


図-7 ライフサイクルコスト算出結果

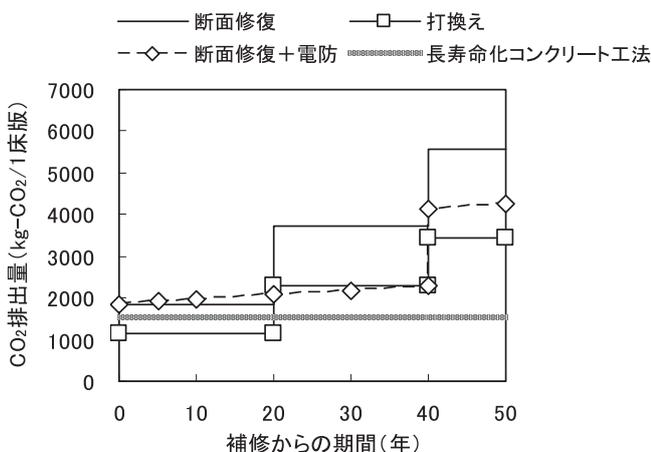


図-8 ライフサイクルCO<sub>2</sub>算出結果

## 5. おわりに

本開発長寿命化コンクリートはEIEN<sup>®</sup>と命名された。EIEN<sup>®</sup>は、セメントの水和反応のみで硬化するものではなく、鉄筋コンクリートにおいては毒とされていた二酸化炭素との反応を利用し、さらにコンクリートには利用されてこなかった $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを含む特殊混和材を利用した革新的なコンクリートである。

今後は、塩害を受ける臨海構造物、磨耗や溶脱が起こる水路や水処理施設などでの利用が期待される。さらに、ポーラスコンクリートとして利用することも可能であるため、生物に対する悪影響を及ぼさず、CO<sub>2</sub>

の固定やセメント量の低減・コスト低減を達成することができるなど、幅広い可能性を秘めた技術である。更なる研究を遂行し、社会や環境に役立つ技術開発を進めていきたいと考える。

JCMIA

### 《参考文献》

- 1) 渡邊賢三, 横関康祐, 取違剛, 坂田昇: 炭酸化養生によるコンクリートの高耐久化技術—EIENの開発と試験施工—, コンクリート工学, Vol.45, No.7, 2007, pp.31-37
- 2) 渡邊賢三, 横関康祐, 坂井悦郎, 大門正機: 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, 2003, pp.653-658
- 3) 土木学会. コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題, コンクリートライブラリー 111, 2003
- 4) 渡邊賢三, 取違剛, 横関康祐, 坂田昇: 超高耐久カーボン繊維補強コンクリートを用いた新しい栈橋補修工法, 鹿島技術研究所年報, Vol.54, 2006, pp.85-90

### 【筆者紹介】



横関 康祐 (よこぜき こうすけ)  
鹿島建設株式会社  
技術研究所 土木材料グループ  
首席研究員



渡邊 賢三 (わたなべ けんぞう)  
鹿島建設株式会社  
技術研究所 土木材料グループ  
主任研究員



芦澤 良一 (あしざわ りょういち)  
鹿島建設株式会社  
技術研究所 土木材料グループ  
研究員



取違 剛 (とりちがひ たけし)  
鹿島建設株式会社  
技術研究所 土木材料グループ  
研究員