

カーボンニュートラル対応コンクリートの長期耐久性に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令4～令6

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：古賀裕久、櫻庭浩樹、
加藤祐哉

【要旨】

コンクリートの低炭素化が求められていることから、低炭素を実現するための各種技術の状況や課題などを調査し、カーボンニュートラル対応コンクリート（以下、CNコンクリート）について、技術的に確認しておくべき項目を整理した。その結果、国内外の研究状況から、CNコンクリートの評価項目として、中性化抵抗性、中性化したコンクリートにおける鋼材腐食の実態、流水に対するすりへり抵抗性などを抽出した。そのうち、CNコンクリートを採用したときに課題となりうる実環境での中性化の進行や、中性化が鋼材腐食与える影響について、将来の技術基準類の改定等の際の参考資料とするために、調査を行ってデータを蓄積した。例えば、セメントの使用量が少ない場合では、実環境では中性化進行が緩慢なことや配合からその程度を推定できることを示した。
キーワード：カーボンニュートラル、中性化、混和材、CO₂固定化骨材、耐久性

1. はじめに

地球温暖化が原因と見られる気象変動などが生じていることから、温暖化の原因となる二酸化炭素の排出量の削減が求められており、建設分野でもその対応が急務となっている。

コンクリートに関しては、主要な構成材料であるセメントの製造時に多くのCO₂が排出される事などから、CO₂の排出量が小さいコンクリートや、排出量がゼロかマイナスになるCNコンクリートの検討が盛んに行われている。国内で行われている検討では、グリーンイノベーション基金¹などを活用した研究など、2030年ごろの実用化を目指したものが多い。

コンクリートの製造・施工の過程で二酸化炭素排出を減少させる技術には様々な提案があるが、混和材料

等を活用してセメントの使用量を減少させる方法、本来アルカリ性を有するコンクリートに二酸化炭素を固定化して中性化させる方法、あらかじめ二酸化炭素を固定化した材料を従来材料の代わりに骨材等としてコンクリートに用いる方法に大別される。これにより次章に後述するように、コンクリートが中性化している（しやすくなる）、これまで利用実績のない材料が骨材として含まれる、などの違いが生じうる。

公共事業にCNコンクリートを活用するためには、上記のような従来の相違点をより明確にし、その影響に関するデータを蓄積する必要がある。

2. CNコンクリートの評価項目に関する検討

2.1 CNコンクリートの種類

CNコンクリートを実現するためには、先に述べた複数の方法を組み合わせる必要がある。これらの方法を用いる場合に、一般的に危惧される技術的課題を表-1に示す。

セメント使用量を減らしたコンクリートは、混和材料でセメントを置き換える割合（置換率）の範囲によっては、すでに広く普及している技術である。このようなコンクリートは、促進試験の環境で中性化速度が増大することが知られているが、従来は、中性化させる意図はなく、置換率も中性化が一定の範囲に抑制される程度であった。

一方で、近年では、二酸化炭素を固定化する目的で

表-1 二酸化炭素排出量を削減する方法と
コンクリートへの影響

方法の分類	想定される影響
セメント使用量の減少	<ul style="list-style-type: none">必要な強度を得るのが難しくなるおそれがある（特に材齢初期）コンクリートの中性化が生じやすくなるおそれがある。
コンクリートの中性化	<ul style="list-style-type: none">コンクリート中の鋼材が腐食しやすくなるおそれがある。
二酸化炭素を固定化した骨材等	<ul style="list-style-type: none">従来コンクリートに使用されていなかった材料については、その特性により種々の影響が生じうる。炭酸カルシウムで製造した骨材には溶脱が生じやすくなるおそれがある。

コンクリート製造時や養生中に二酸化炭素を供給し、積極的に中性化させる技術も提案されている。

従来は、コンクリートが中性化するとコンクリート中の鋼材が腐食しやすくなるおそれがあり、中性化は避けるべき劣化現象と認識されてきた。一方で、近年の研究から、コンクリートが中性化したとしても、コンクリート中の鋼材が十分かぶりで保護されており、水や酸素の供給がなければ腐食が生じないことが指摘されている。また、実環境では、中性化は雨掛かりがない部位など乾燥環境で進行するが、水の供給がなければ腐食は生じにくいことなどが指摘されている。

今後、CN コンクリートを活用するにあたっては、コンクリート構造物の中性化の実態や中性化が実際に鋼材腐食に与えている影響などを調査し、適用箇所などを検討することが必要と考えられる。

二酸化炭素を固定化させた骨材等に関しては、今後様々な提案が想定され、その評価方法を網羅的に検討することは不可能である。一方で、提案される可能性が高い材料として、人工的に回収した炭酸カルシウムを用いた骨材等がある。すでに炭酸カルシウムを主成分とした石灰石が骨材として広く活用されているが、近年、石灰石を用いると溶脱が大きい場合があるとの報告²⁾もある。したがって、この種の骨材についても確認が必要と考えられる。

2.2 CN コンクリートに関する研究事例の調査

CN コンクリートに関する技術的課題をさらに幅広く調査するため、海外文献の調査を行った。

海外文献から抽出された、CN コンクリートの耐久性に関する技術的課題を表-2 に示す。概ね、表-1 に示す想定される影響と同様の技術的課題が海外でも指摘されていることが分かる。

3. 社会実装に必要な基礎データの取得

前章に整理した結果を参考に、本研究課題の中では、セメントの使用量を減少させたコンクリートの中性化抵抗性、中性化したコンクリート中での鋼材の腐食、人工的に製造した骨材を使用した場合のすり減りに対する抵抗性に着目して、基礎データの取得を行った。

3.1 セメントの使用量を減少させたコンクリートの中性化抵抗性

3.1.1 検討方法

セメントの代替となるコンクリートの結合材として、高炉スラグ微粉末をセメントに対して 50%、70%、85% 置換した場合、フライアッシュをセメントに対して 20%、30%、40% 置換した場合の配合を検討した。水結合材比は 35% と 50% とし、合計 12 種類の配合について角柱試験体を製作し、これを屋外および屋内環境に最長で約 11 年暴露することで中性化抵抗性を評価した。

3.1.2 検討結果

中性化深さが最も大きかった水結合材比 50% で高炉スラグ微粉末の置換率 85% の試験体の中性化の状況を写真-1 に示す。屋外では、中性化の進行が遅いことが確認できる。屋外暴露での中性化深さの経時変化の例を図-1 に示す。高炉スラグ微粉末の置換率 70% までの配合は、屋外環境で試験期間が長くなっても中性化深さはほぼ横ばいであった。この理由として、コンクリー

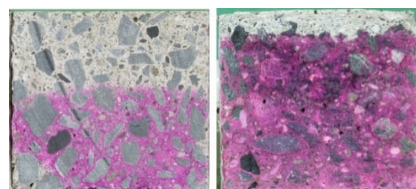


写真-1 中性化の状況の例
(左：屋内 136 か月、右：屋外 90 か月)

表-2 海外文献から抽出された CN コンクリートの耐久性に関する技術的課題

CN コンクリートの製造方法による分類		中性化抵抗性	塩化物イオン浸透抵抗性	強度	その他
セメント使用量の減少					
混和材料	石灰岩焼成粘土セメント	初期段階低下 ³⁾		強度発現遅延 ⁴⁾	
	メタカオリン	初期段階低下 ³⁾	低下 ⁵⁾	強度発現遅延 ³⁾	
	バイオ炭			Co 質量の 5% 超の置換で悪影響 ⁴⁾	作業性低下 ⁴⁾
	ナノシリカ	初期段階低下 ³⁾		強度発現遅延 ³⁾	
	消石灰	初期段階低下 ³⁾		強度発現遅延 ³⁾	
	ゼオライト	単独使用で低下 ⁶⁾		単独使用で低下 ⁶⁾	単独使用で凍結融解抵抗性低下 ⁶⁾
コンクリートの中性化		意図的に中性化			
二酸化炭素を固定化した骨材等		低下 ⁷⁾	低下 ⁷⁾		

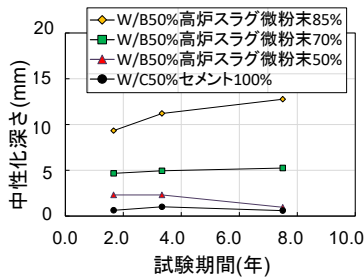


図-1 屋外暴露での中性化深さの経時変化の例

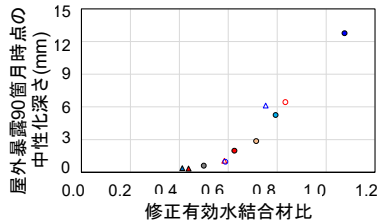


図-2 中性化深さと有効水結合材比の関係

トの内部がある程度湿潤に保たれて空隙が水で満たされるため、二酸化炭素の侵入が遅くなることが考えられる。ただし、置換率を85%まで大きくした配合では、中性化が進行する傾向があることが分かった。

コンクリートの中性化抵抗性の大きさを配合からある程度推定できると有用なため、これを検討した結果を図-2に示す。横軸の有効水結合材比は、高炉スラグ微粉末とフライアッシュの結合材としての寄与分を暴露試験結果に基づき補正し、水と結合材の質量比を求めたものである。この図から、高炉スラグ微粉末とフライアッシュの違いや置換率の違いによらず、有効結合材比を中性化抵抗性の指標とできることが確認された。

3.2 中性化したコンクリート中での鋼材の腐食

3.2.1 検討方法

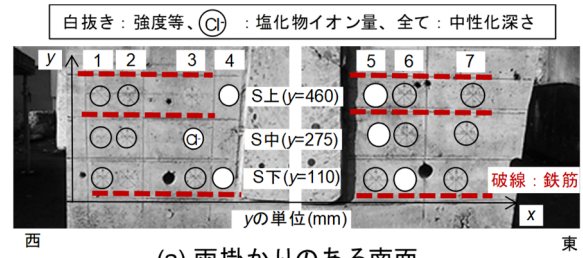
中性化したコンクリートと水の供給の有無による鋼材腐食の関係を確認するために、撤去部材を用いて検討を行った。この撤去部材は、東京都内で53年間供用し、その後12年間屋外に設置したもので、面によって雨掛かりの状態が異なっていたものである。

写真-2に示すように各面からコアを採取し、強度等や中性化深さを確認するとともに、表面に近い鉄筋を採取して腐食状況を確認して、中性化と水分供給の有無による鋼材腐食の関係を評価した。

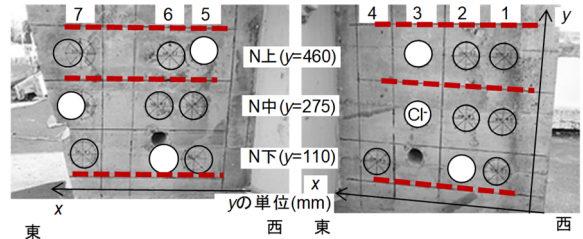
3.2.2 検討方法

(1) 中性化深さ

中性化深さの測定結果を図-4に示す。なお、鉄筋位置まで中性化が進行しているか否かを示すために、各面の表面側鉄筋の位置を黒四角で図-3中に示した。鉄



(a) 雨掛かりのある南面



(b) 雨掛かりのない北面

写真-2 コア採取位置

筋かぶりから中性化深さを除いた中性化残りは、雨掛かりのある南面では全ての鉄筋において15mm以上、一方、雨掛かりのない北面では、10mmと小さい鉄筋があった。

中性化の観点からは、雨掛かりのない北面の方が、中性化による鋼材腐食が生じやすい環境と考えられる。

(2) 鉄筋の腐食状況

中間横桁から取り出した各鉄筋の腐食面積率を図-4に示す。雨掛かりのある南面の鉄筋SE上が最も腐食面積率が大きく、雨掛かりのない北面のNW下が最も腐食面積率が小さかった。また、腐食面積率が25%を超えている鉄筋は、内側の腐食面積率が表面側の1/2未満と小さく、表面側に腐食が集中していた。

雨掛かりのある南面では、中性化残りが15~30mmと大きな値でも表面腐食が比較的大面積で生じたのに対し、雨掛かりのない北面では、表面腐食が比較的大面積で生じたのは中性化残りが10mmと小さい、または近傍にひび割れのある鉄筋であった。

これらのことから、中性化の有無に関わらず、水分供給のある条件では鉄筋の腐食面積率が大きく、腐食しやすい傾向のあることが分かった。

3.3 人工骨材を用いたコンクリートのすりへり

二酸化炭素を固定化して製造された、炭酸カルシウムが主成分の人工骨材を用いたコンクリートの流水に対するすりへり(溶脱)のしやすさを評価するために、図-5に示す平板状で、表面に粗骨材(硬質砂岩または二酸化炭素固定化骨材を模擬した石灰岩)を配置したモルタル供試体を表-4に示す4種類作製した。モルタル2は、二酸化炭素固定化細骨材を模擬した炭酸カル

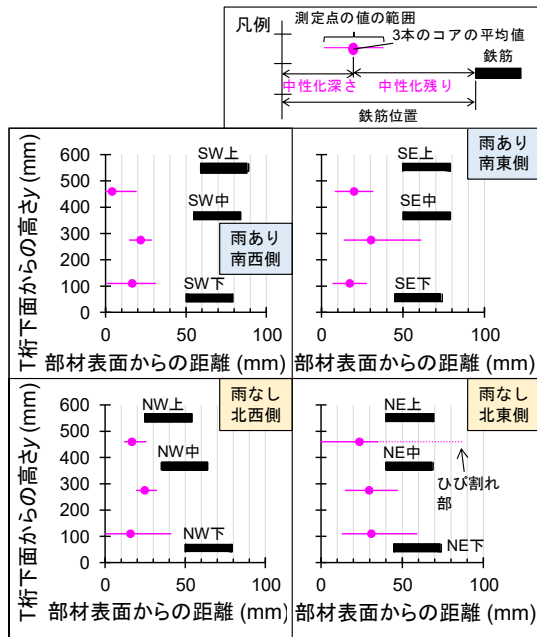


図-3 中性化深さと鉄筋位置

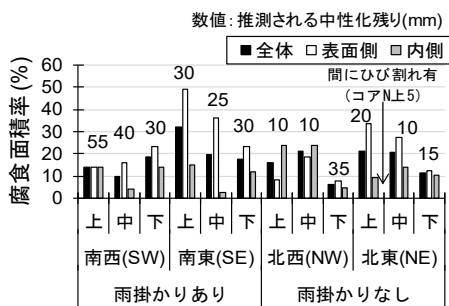


図-4 鉄筋の腐食面積率

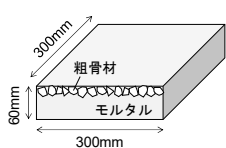


図-5 暴露供試体

表-4 暴露供試体の種類

記号	モルタル	粗骨材
1-k	1	硬質砂岩
1-s	1	石灰岩
2-k	2	硬質砂岩
2-s	2	石灰岩



(a) 暴露開始時 (b) 11箇月後の外観

写真-3 暴露供試体の外観

シウム (CaCO₃) を砂の 25wt%混和したものとした。
暴露場所は、岐阜県各務原市の自然共生研究セン

ター内の実験河川とし、水質は pH7.1、Ca 濃度 22mg/L に令和 6 年 1 月より河川に沈めて暴露を開始した。

その結果、今回調査した 11 箇月の範囲では、写真-3 のとおり、特段の変状は認められなかった。

4. まとめ

本研究では、低炭素実現の 1 つの選択肢として、CN コンクリートが普及することを踏まえ、構造物への影響を確認しておくべき項目とその実態調査を行った。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 高炉スラグ微粉末の置換率が 70%以下の場合と 85%まで増加したケースでは、実環境での中性化進行の傾向が異なっていた。
- 2) 中性化残りが 10mm の鋼材でも水分の供給がほとんどない場合は、水分の供給がある場合で中性化残りが 15cm 以上ある鋼材よりも腐食面積率が小さく、水分供給を防止できれば鋼材腐食を抑制できることが分かった。

参考文献

- 1) CO₂ を用いたコンクリート等製造技術開発、NEDO グリーンイノベーション基金、<https://green-innovation.nedo.go.jp/project/development-manufacturing-concrete-using-co2/>、2025 年 5 月 8 日閲覧
- 2) 金平修祐、北辻政文：コンクリート水利施設の石灰石骨材溶脱に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.44、No.1、pp.628-633、2022.6
- 3) Suliman Khan, Rida Alwi Assaggaf, et al.: Mechanical and durability behaviours of low carbon concrete: A systematic review, Journal of Building Engineering, 100, 111633, 2025
- 4) Sachini Supunsala Senadheera, et al.: Application of biochar in concrete -A review, Cement and Concrete Composites, 143, 105204, 2023
- 5) Patric Azar, et al.: Transfer properties and chloride-induced corrosion resistance of GGBS and metakaolin alkali-activated materials, Cement and Concrete Composite, Vol.142, 105182, 2023.9
- 6) Danutė Vaičiukynienė, et al.: Production of an eco-friendly concrete by including high-volume zeolitic supplementary cementitious materials and quicklime, Nature portfolio, Scientific reports, 14:188, 2024
- 7) Qiang Wang, et al.: Long-term properties of concrete containing limestone powder, Materials and Structures, Vol.50, No.168, 2017

RESEARCH ON LONG-TERM DURABILITY OF CARBON-NEUTRAL CONCRETE

Research Period: FY2022-2024

Research Team: Material and Resources Research Group

Author: KOGA Hirohisa

SAKURABA Hiroki

KATO Yuya

Abstract: In response to the demand for carbon-neutral concrete (CN concrete), we surveyed the status of various technologies and issues to achieve low carbon and summarized the items that need to be technically confirmed. As a result, from a survey of the research situation in Japan and abroad, we extracted items to be evaluated such as progress of carbonation in CN concrete. In order to provide reference information for future revisions of technical standards, testing data was accumulated through investigations. Several studies were conducted to accumulate data on the progression of carbonation under actual conditions, and on the effects of carbonation on steel corrosion. For example, the results of an exposure test on concrete with a low cement volume showed that carbonation under actual condition showed a slow progress, and this can be estimated based on the mixture.

Keywords: Carbon-neutral, Carbonation, Mineral admixture, CO₂-immobilized aggregate, Durability of concrete