

T-eConcrete[®]/Carbon-Recycleの社会実装の進展に向けた 既存の設計・施工指針の活用

近藤 祥太*¹・鶴田 孝司*¹・宮原 茂禎*¹・目黒 貴史*¹
大脇 英司*²・岡本 修一*³・松元 淳一*¹・堀口 賢一*¹

Keywords : ground granulated blast furnace slag, carbon recycling, CCU, calcium carbonate, mechanical properties, durability

高炉スラグ微粉末, カーボンリサイクル, CCU, 炭酸カルシウム, 力学特性, 耐久性

1. はじめに

ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材で大量に置換することは、コンクリートの製造に関わる CO₂ 排出量を削減する代表的な手段の一つである¹⁾。2018 年に土木学会「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」(以下、指針案)が発刊され²⁾、脱炭素社会の実現に向け、普及が期待されている。指針案が対象とする粉体構成の範囲を図-1 に示す。筆者らは、ポルトランドセメントの使用を“ゼロ”とし、高炉スラグ微粉末を主な結合材とする環境配慮コンクリート(以下、T-eConcrete/セメント・ゼロ型、図-1: ■)を開発し、指針案を活用して社会実装を進めている³⁾。

他方、排ガス等から分離・回収した CO₂ をセメント原料やコンクリート材料等として活用する CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 技術の開発が進められている^{4,5)}。筆者らは、CO₂ を吸収・固定した炭酸カルシウム(以下、CCU-CaCO₃) をセメント・ゼロ型に添加し、CO₂ の排出削減に加えて CO₂ を資源として活用し、さらに長期間に渡り安定して固定できる T-eConcrete/Carbon-Recycle (以下、カーボンリサイクル・コンクリート) を開発した^{6,7)}。現時点では CCU-CaCO₃ を用いたコンクリートの規準・規格類はなく、社会実装の加速に向けてその整備が望まれる。

本稿では、カーボンリサイクル・コンクリートの粉体構成が指針案の対象とするコンクリートの粉体構成に近いことに着目し(図-1)、カーボンリサイクル・コンクリートの力学特性や耐久性を混和材を大量に使用したコンクリートの場合と比較し、指針案のカーボンリ

サイクル・コンクリートへの適用可能性について検討した。

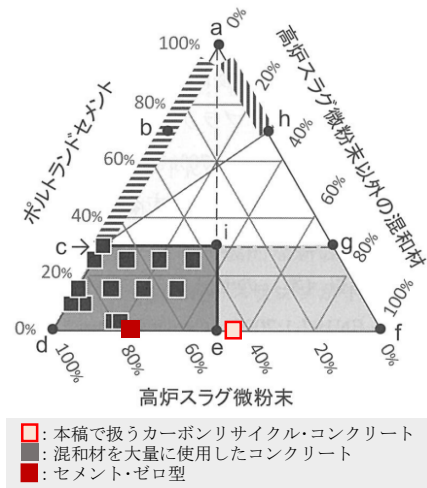


図-1 カーボンリサイクル・コンクリートの粉体構成(文献 2) に加筆

Fig.1 Powder composition of carbon recycled concrete (addition to Reference 2)

2. 使用材料および配合

2.1 使用材料

カーボンリサイクル・コンクリートの使用材料を表-1 に、CCU-CaCO₃ の品質を表-2 に示す。比表面積と密度は JIS R 5201 に準拠して測定した。化学組成は JIS R 5204 に準拠し、CaCO₃ 純度は JIS R 5210 に示される少量混合成分としての石灰石を対象とした算出方法を用いた。湿分は JIS A 6201、メチレンブルー吸着量は JCAS I-61 に規定されるフライアッシュを対象とした

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 コンクリートGX研究室

* 3 土木本部 土木技術部

* 2 技術センター 社会基盤技術研究部

方法を用いた。鉱物組成は粉末 X 線回折法による同定結果である。カルシウム系の刺激材には相当する規格がないが、原料は従来のセメントやコンクリートにおいて使用実績がある工業的に製造された粉体である。

表-2 には参考までに CCU-CaCO₃ と化学組成や鉱物組成が類似するコンクリート用石灰石微粉末に対する品質規格（案）⁸⁾に規定される全項目を併記した。使用した CCU-CaCO₃ の品質はいずれも参考の規格値を満足した。

2.2 配合

カーボンリサイクル・コンクリートの配合を表-3 に示す。CCU-CaCO₃-A を用いた配合については、水結合材比 0.55, 0.47, 0.40 の 3 水準（以下, CC55, CC47, CC40）を対象に、力学特性や耐久性を評価した。また、CC55-Ad3-A は初期の強度発現性を向上させるため、CC-55 に亜硝酸塩と硝酸塩を主成分とする硬化促進剤（JIS A 6204）を粉体に対して 3.0%添加した配合である。CC55-Ad3-BはCCU-CaCO₃-Bを用いた配合であり、硬化促進剤を粉体に対して 6.0%添加した。混和材を大量に使用したコンクリートでは凍害に対する抵抗性を確保する観点から、空気量を 6%程度とすることが推奨されている²⁾。これらを踏まえ、カーボンリサイクル・コンクリートにおいては、フレッシュ性状の目標をスランプフロー：600±100mm, 空気量：6±1.5%とした。これらを満足するよう、化学混和剤 Ad1～Ad4 の添加量を適宜、調整した。

3. 試験方法

3.1 強度特性

カーボンリサイクル・コンクリートの強度特性として、圧縮強度、引張強度、ヤング係数、ポアソン比について試験を実施した。圧縮強度は標準養生した試験体を対象に材齢 28 日において JIS A 1108 に従って求めた。また材齢 28 日における圧縮強度と引張強度、ヤング係数、ポアソン比の関係を評価した。引張強度は JIS A 1113 に準拠して求めた。ヤング係数は JIS A 1149 に準拠し、ポアソン比はヤング係数測定時に試験体の円周方向にひずみゲージを追加して求めた。

3.2 劣化抵抗性

カーボンリサイクル・コンクリートの劣化抵抗性として、凍害に対する抵抗性を凍結融解試験で評価し、アルカリシリカ反応に対する抵抗性を「無害でない」骨材を用いてモルタルバー法で評価した。凍結融解試験は、JIS A1148（A 法）に準拠して実施した。また、

表-1 使用材料

Table 1 Materials

名称・規格	記号	仕様・物性など
水 JIS A 5308	W	上水道水
高炉スラグ微粉末 JIS A 6206	BFS	高炉スラグ微粉末 4000, 密度 2.89g/cm ³ , 比表面積 4470cm ² /g
刺激材	St	カルシウム系化合物, 主成分:Ca(OH) ₂ , 密度 2.89g/cm ³
炭酸カルシウム A	CCU-CaCO ₃ -A	表-2に記載
炭酸カルシウム B	CCU-CaCO ₃ -B	表-2に記載
細骨材 JIS A 5005	S	君津産山砂と石灰岩砕砂の混合砂, 表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.0%
粗骨材 JIS A 5005	G	砕石 2005, 青梅産硬質砂岩, 表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.7%
化学混和剤 JIS A 6204	Ad1	高性能減水剤, ポリカルボン酸エーテル系
	Ad2	減水剤, リグニンスルホン酸系とオキシカルボン酸系の複合体
	Ad3	硬化促進剤
	Ad4	AE 剤

表-2 使用した炭酸カルシウムの品質

Table 2 Quality of calcium carbonate

		CCU-CaCO ₃		参考規格値*
		A	B	
比表面積	(cm ² /g)	4130	4350	2500 以上
密度	(g/cm ³)	2.67	2.64	—
化学組成	MgO	0.3%	0.1%	5%以下
	SO ₃	0.3%	1.6%	0.5%以下
	Al ₂ O ₃	0.12%	0.2%	1.0%以下
CaCO ₃ 純度		98.0%	95.8%	90%以上
湿分	—	0.1%	1.4%	1.0%以下
メチレンブルー吸着量	mg/g	0.02	0.27	1.0 以下
鉱物組成	XRD	calcite のみ		—

※JCI-SLP コンクリート用石灰石微粉末品質規格（案）⁸⁾

表-3 コンクリートの配合

Table 3 concrete mix

配合名	W/B	単位量(kg/m ³)						
		W	粉体:P				骨材	
			結合材:B		CCU-CaCO ₃		S	G
			BFS	St	A	B		
CC55	0.55	175	263	55	260	—	624	810
CC47	0.47	175	309	65	260	—	602	840
CC40	0.40	151	312	66	260	—	627	845
CC55-Ad3-A	0.55	175	263	55	260	—	624	810
CC55-Ad3-B	0.55	175	263	55	—	260	618	836

φ100×200mm 円柱供試体の切断面を用いてリニアトラバース法により硬化後の空気量と気泡間隔係数を求めた。モルタルバー法はJIS A 1146に準拠した。JIS A1145(化学法)にて「無害でない」と判定された細骨材と表-1に示す細骨材を3:7の割合で混合して使用した。使用材料に含まれるNa₂O_{eq}(全アルカリ量)を考慮してNa₂O_{eq}が結合材の1.2%となるようにNaOH溶液を添加し、JIS A 1146の配合に基づき角柱供試体を作製した。JIS A 1146に示された規格通りの配合物であるモルタル、セメントを高炉セメント B 種に変更したモルタル、セメントを各種カーボンリサイクル・コンクリートの粉体(CC55,CC47,CC55-Ad3-A,CC55-Ad3-B)に変更したモルタルの計5種類を作製した。材齢2日で脱型した後、温度40°Cで湿気箱に貯蔵し、所定の材齢で膨張率を測定した。

3.3 物質の透過に対する抵抗性

カーボンリサイクル・コンクリートの物質の透過に対する抵抗性として、中性化に対する抵抗性を促進中性化試験、水分の浸透に対する抵抗性を水分浸透試験、塩害に対する抵抗性を塩化物イオンの拡散係数試験により評価した。促進中性化試験はJIS A 1153に準拠した。水分浸透速度係数試験は、φ100×200mmの円柱供試体を用いてJSCE-G 582-2018に準拠して実施した。脱型した試験体の底面から25mmの位置で切断して下部を除去した後、20°C, RH60%環境下に91日間静置した。その後、円柱の柱面に防水シールを貼付し、切断面(φ100mm)を下、打込み面を上にしてほぼ垂直に設置し、試験体下部から10mmの高さまで水に浸せきした。浸せき開始から5, 24, 48時間後に割裂し、水分検知剤を噴霧して呈色した部分を水分浸透深さとして求めた。水分浸透深さと浸せき時間の平方根の関係を直線で近似し、傾きを水分浸透速度係数とした。塩化物イオンの拡散係数試験は土木学会規準 JSCEG572-2018に準拠した。材齢28日まで20°Cで水中養生したφ100×200mm円柱供試体を用いた。両端を切除して長さを150mmにした後、1日間、室温20°C, RH60%の室内に静置し、柱面と底面の1面(型枠側)をエポキシ樹脂で被覆した。樹脂の硬化後、1日間、20°Cの水中に浸せきした後、20°Cで濃度10%のNaCl溶液に移し、半年後と1年後に浸せき面から5~10mm間隔で切断して全塩化物イオン濃度を測定した。

3.4 ひび割れ抵抗性

カーボンリサイクル・コンクリートのひび割れ抵抗性に関連して乾燥収縮量、断熱上昇量を測定した。乾燥収縮量測定はJIS A 1129-2に準拠した。断熱温度上昇量

はマスブロックを用いた簡易法⁹⁾で測定した。断熱した型枠に450mm立方のコンクリートを打込み、コンクリートや環境の温度を計測して断熱温度上昇量に換算した。

4. 試験結果

4.1 強度特性

カーボンリサイクル・コンクリートの水結合材比と圧縮強度の関係を、指針案の対象とする混和材を大量に使用したコンクリートと比較して図-2に示す。圧縮強度は結合材水比の増加(水結合材比の減少)とともに

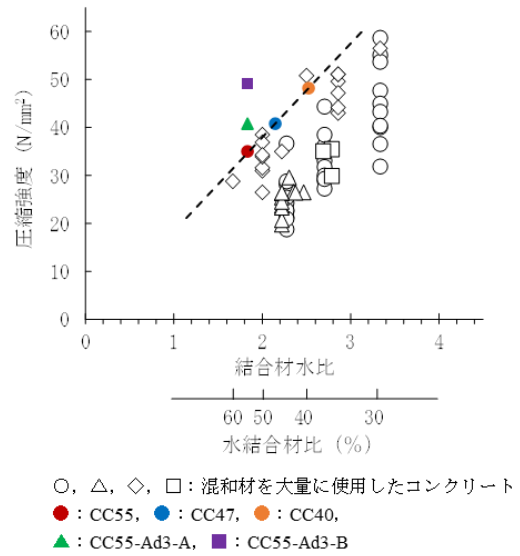


図-2 水結合材比と圧縮強度の関係 (文献2)に加筆

Fig.2 Relationship between water-binder ratio and compressive strength(Addition to Reference 2)

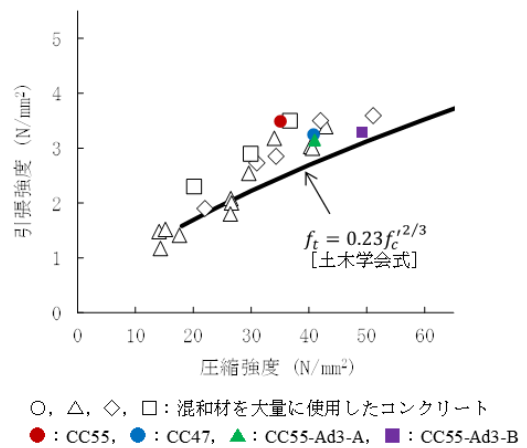


図-3 圧縮強度と引張強度の関係 (文献2)に加筆

Fig.3 Relationship between compressive strength and tensile strength(Addition to Reference 2)

大きくなり、混和材を大量に使用したコンクリートと同様に水結合材比を調節することで、圧縮強度について配合設計が可能であることを確認した。また CC55 に硬化促進剤を添加した CC55-Ad3-A の材齢 28 日における圧縮強度は 40.9N/mm² であり、CC55 の圧縮強度 (35.0N/mm²) と比較して 17%程度強度増進した。すなわち、水結合材比の減少に加え、硬化促進剤によっても材齢 28 日における圧縮強度は増進することが分かった。硬化促進剤を粉体に対して 6.0%添加した CC55-Ad3-B の材齢 28 日における圧縮強度は 49.1 N/mm² であり、同様に硬化促進剤の効果により圧縮強度は高くなった。

圧縮強度と引張強度、ヤング係数の関係をそれぞれ図-3、図-4 に示す。いずれの物性値についても混和材を大量に使用したコンクリートと同様の分布範囲に位置し、コンクリート標準示方書¹⁰⁾に示される式(1)、式(2)を用いて推定できることを確認した。

$$f_{tk} = 0.23f'_{ck}{}^{2/3} \quad (1)$$

ここで、 f_{tk} : 引張強度の特性値 [N/mm²]、 f'_{ck} : 圧縮強度の特性値 [N/mm²] である。

$$E_c = \left[2.2 + \frac{f'_c - 18}{20} \right] \times 10^4 \quad 20 \leq f'_c \leq 30 \text{N/mm}^2$$

$$E_c = \left[2.8 + \frac{f'_c - 30}{33} \right] \times 10^4 \quad 30 \leq f'_c \leq 40 \text{N/mm}^2 \quad (2)$$

$$E_c = \left[3.1 + \frac{f'_c - 40}{55} \right] \times 10^4 \quad 40 \leq f'_c \leq 60 \text{N/mm}^2$$

ここで、 E_c : ヤング係数 [N/mm²]、 f'_c : 圧縮強度 [N/mm²] である。

圧縮強度とポアソン比の関係を図-5 に示す。ポアソン比は圧縮強度に関わらず概ね 0.2 であり、コンクリート標準示方書に示されるように、カーボンリサイクル・コンクリートについても弾性範囲内において、一般に 0.2 としてよいことを確認した。

4.2 劣化抵抗性

カーボンリサイクル・コンクリートの凍結融解試験結果を図-6 に示す。試験終了時 (300 サイクル) の相対動弾性係数は、いずれの配合についても 80%以上となり、中でも CC55 と CC47、CC55-Ad3-B はコンクリート標準示方書によると“凍害に対する照査不要”と判断される 90%以上を維持した。また硬化コンクリートの気泡間隔係数は、CC55 が 125 μ m、CC47 が 163 μ m、CC55-

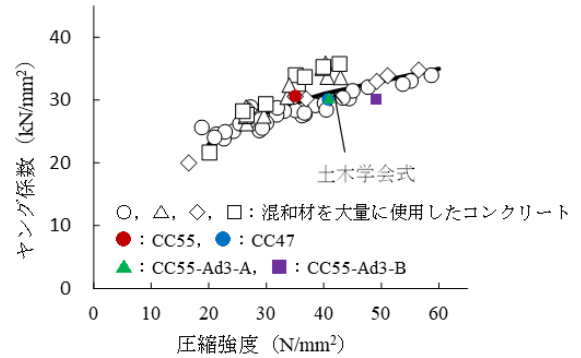


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係 (文献 2) に加筆

Fig.4 Relationship between compressive strength and Young's modulus(Addition to Reference 2)

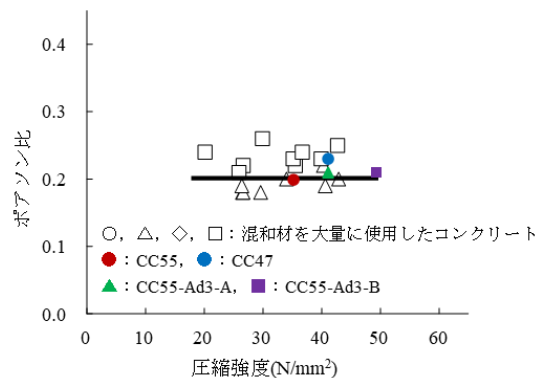


図-5 圧縮強度とポアソン比の関係 (文献 2) に加筆

Fig.5 Relationship between compressive strength and Poisson's ratio(Addition to Reference 2)

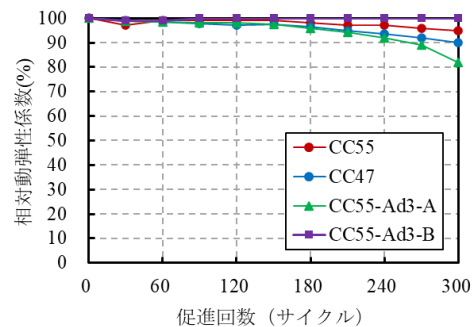


図-6 凍結融解抵抗性

Fig.6 Freeze-thaw resistance

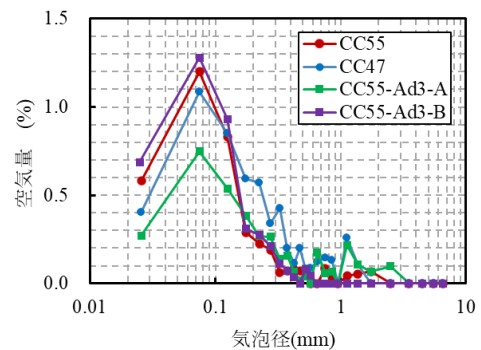


図-7 気泡径分布

Fig.7 Bubble size distribution

Ad-A が 192 μm , CC55-Ad-B が 120 μm で各配合の凍結融解試験における相対動弾性係数の低下状況と整合しており、従来のコンクリート同様に気泡間隔係数の大小と凍結融解抵抗性には相関があることが分かった。図-7 に示した気泡分布からも全ての配合で 0.1mm 以下の微細な空気が存在することが確認でき、特に良好な凍結融解抵抗性を示した CC55, CC47, CC55-Ad-B に多い傾向であった。以上より、カーボンリサイクル・コンクリートの凍結融解試験により求まる耐久性指数は、適切な空気量の設定により、80~90 を上回るように調整できることを確認した。

アルカリシリカ反応（以下、ASR）に対する抵抗性について、「無害でない」骨材を用いたモルタルバー法の試験結果を図-8 に示す。普通ポルトランドセメントを用いたモルタルでは促進期間 8 週まで 0.5% を超える大きな膨張を示した。また結合材に高炉セメント B 種を用いた場合、供試体の膨張は抑制されるものの、促進期間 8 週以降で判定基準を超える膨張を示した。これに対してカーボンリサイクル・コンクリートの膨張率はいずれの配合についても高炉セメント B 種よりも顕著に小さく、26 週時点でも判定基準を下回った。指針案にて、一部の混和材を大量に使用したコンクリートは優れた ASR 抑制効果を有すると記載されているが²⁾、カーボンリサイクル・コンクリートは同様に、良好なアルカリシリカ反応に対する抵抗性を有していることを確認した。

4.3 物質の透過に対する抵抗性

カーボンリサイクル・コンクリートの促進中性化試験結果について、中性化深さの進行は促進試験期間の平方根に比例するものとして整理し、比例定数である中性化速度係数と相関係数を図-9 に、促進中性化試験により求めた中性化速度係数を、混和材を大量に使用したコンクリートと比較して図-10 に示す。いずれの配合についても相関係数は高く、混和材を大量に使用したコンクリートと同様に、中性化の進行は促進試験期間の平方根に比例するものとして表現できることが確認できた。また中性化速度係数は黒丸で示された普通ポルトランドセメントのみを結合材に用いたコンクリートより大きいが、混和材を大量に使用したコンクリートの中性化速度係数の分布範囲の中では比較的小さな値であった。以上より、カーボンリサイクル・コンクリートは混和材を大量に使用したコンクリートと同様に促進中性化試験により中性化速度係数を得ることができ、中性化に対する抵抗性は混和材を大量に使用したコンクリートと同等であることが示唆された。

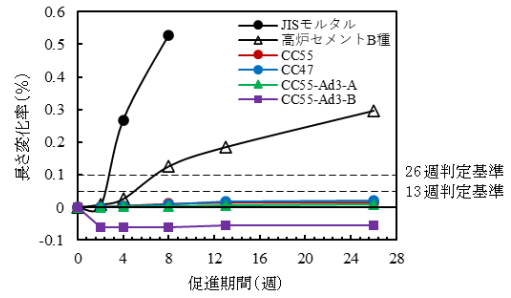
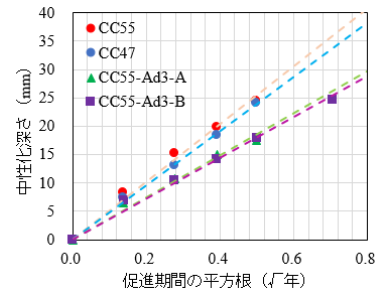


図-8 ASR 抵抗性
Fig.8 ASR resistance



配合	中性化速度係数	相関係数
CC55	48.9 mm/√年	0.997
CC47	47.1	0.999
CC55-Ad3-A	35.9	0.996
CC55-Ad3-B	36.0	0.996

図-9 促進中性化試験による中性化深さの変化
Fig.9 Changes in neutralization depth based on accelerated carbonation tests

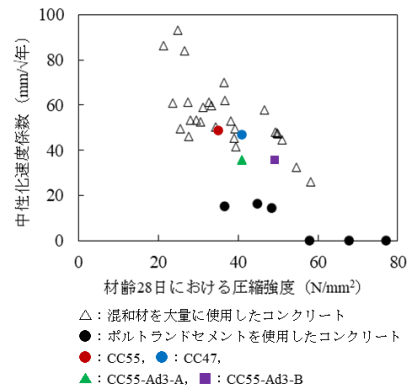


図-10 促進中性化速度係数（文献 2）に加筆
Fig.10 Accelerated carbonation rate coefficient (Addition to Reference 2)

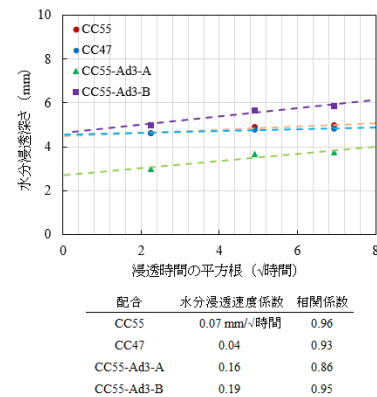


図-11 水分浸透速度係数

Fig.11 Water permeability coefficient

配合	水分浸透速度係数	相関係数
CC55	0.07 mm/√時間	0.96
CC47	0.04	0.93
CC55-Ad3-A	0.16	0.86
CC55-Ad3-B	0.19	0.95

カーボンリサイクル・コンクリートの水分浸透試験結果について、水分浸透深さの進行は水分浸透期間の平方根に比例するものとして整理し、比例定数である水分浸透速度係数と相関係数を図-11 に示す。いずれの配合についても相関係数は高く、一般のコンクリートと同様に、水分の浸透は促進試験期間の平方根に比例するものとして表現できることが確認できた。また現状、混和材を大量に使用したコンクリートの水分浸透速度に関する検討事例は少ないが、普通ポルトランドセメントのみを結合材に用いたコンクリートや各種高炉セメントの水分浸透速度を検討している既報¹⁾と比較すると、カーボンリサイクル・コンクリートの水分浸透速度係数は小さい傾向であった。以上より、カーボンリサイクル・コンクリートは一般のコンクリートと同様に水分浸透試験により水分浸透速度係数を得ることができ、水分浸透抵抗性は一般のコンクリートより優れることが示唆された。先述した通りカーボンリサイクル・コンクリートの中性化速度はセメントのみのコンクリートよりも早くなるが、水の浸透が遅い場合には、中性化の進行が早くても鋼材腐食が速く進むことがないため、優れた水分浸透抵抗性は鋼材腐食の抑止に有効であると考えられる。

カーボンリサイクル・コンクリートの塩化物イオンの拡散係数試験結果について、浸せき表面からの深さと塩化物イオン濃度の関係を図-12 に、浸せき 1 年におけるコンクリート表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を、混和材を大量に使用したコンクリートと比較して図-13 に示す。混和材を大量に使用したコンクリートにおいては、浸せき期間が経過しても塩化物の侵入が継続せずに停滞することが指針案にて報告されているが、カーボンリサイクル・コンクリートについても浸せき期間の経過に伴う変化は僅かであり、同様に停滞する傾向が確認された。しかし、試験の実績が 1 年と短いことや、停滞の機構が明らかでないことから、混和材を大量に使用したコンクリートや従来のコンクリートと同様に塩化物イオンが継続して侵入するとし、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査の手順は 2017 年度版コンクリート標準示方書に従うべきと考えられる。表面塩化物イオン濃度は浸せき水の NaCl 濃度の影響を強く受けるため、濃度 10% で実施したカーボンリサイクル・コンクリートの値は濃度 10% の場合の混和材を大量に使用したコンクリートと同様であった。一方、拡散係数は混和材を大量に使用したコンクリートより僅かに大きいですが、ポルトランドセメントのみを結合材に用い、水結合材比が同等のコンクリートより

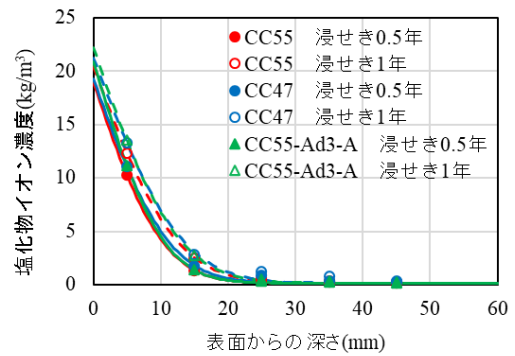


図-12 NaCl 溶液への浸せき試験
Fig.12 Immersion test in NaCl solution

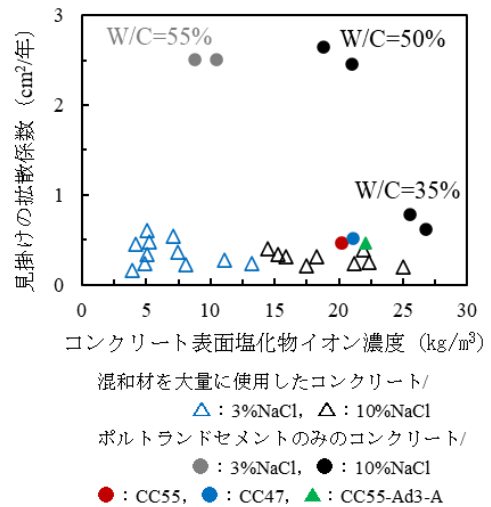


図-13 見掛けの拡散係数とコンクリート表面塩化物イオン濃度 (文献 2) に加筆
Fig.13 Apparent diffusion coefficient and chloride ion concentration on concrete surface (Addition to Reference 2)

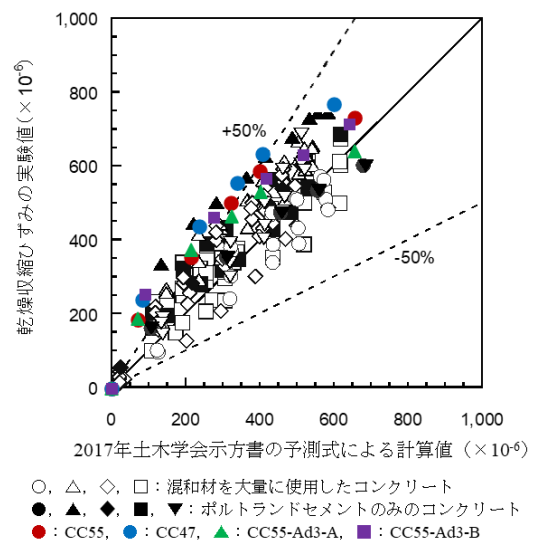


図-14 乾燥収縮ひずみ (文献 2) に加筆
Fig.14 Drying shrinkage strain (Addition to Reference 2)

顕著に小さくなった。以上より、カーボンリサイクル・コンクリートは混和材を大量に使用したコンクリートと同様に塩化物の侵入が停滞する傾向があること、ポ

ルトランドセメントのみを結合材に用いたコンクリートよりも塩害抵抗性が高いことを確認した。

4.4 ひび割れ抵抗性

乾燥収縮量の試験結果について、標準示方書の予測式による方法をカーボンリサイクル・コンクリートに適用して求めた計算値と比較し、図-14 に示す。図には混和材を大量に使用したコンクリートやポルトランドセメントのみのコンクリートの値も併記している。計算値はコンクリートの単位水量、セメント水比、骨材の吸水率と単位量、配合から求める単位容積質量を用いて得られる¹²⁾。ここではセメント水比を結合材水比に読み替えて適用した。カーボンリサイクル・コンクリートの場合、初期材齢において測定値が計算値より大きい傾向であるものの、混和材を大量に使用したコンクリートと同様に、乾燥収縮ひずみの実験値は概ね予測値の±50%の精度で予測されていることを確認した。

したがって、カーボンリサイクル・コンクリートの乾燥収縮ひずみは、実験値によらない場合、一般のコンクリートと同様にコンクリート標準示方書に示される予測式を適用すればよい。

断熱温度上昇量は式(3)に示す関数で整理した。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t - t_{0,Q})\}] \quad (3)$$

ここで、 $Q(t)$: 断熱温度上昇量 [°C], Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 [°C], r : 温度上昇速度に関する係数 [-], $t_{0,Q}$: 有効材齢に関する係数 [d] である。

Q_{∞} と r について、カーボンリサイクル・コンクリートおよび混和材を大量に使用したコンクリートの測定値と一般的なセメントに関する値を図-15 に示す。カーボンリサイクル・コンクリートの Q_{∞} は JIS に規定されるセメントより小さく混和材を大量に使用したコンクリートと同等の値を示した。 r は混和材を大量に使用したコンクリートより僅かに大きくなる傾向であったが、JIS に規定されるセメントと同等であり、温度の上昇速度も従来のセメントと同程度であった。以上より、カーボンリサイクル・コンクリートは混和材を大量に使用したコンクリートと同様に、JIS に規定されるセメントよりも低発熱性に優れており、温度ひび割れの抵抗性が高いことを確認した。

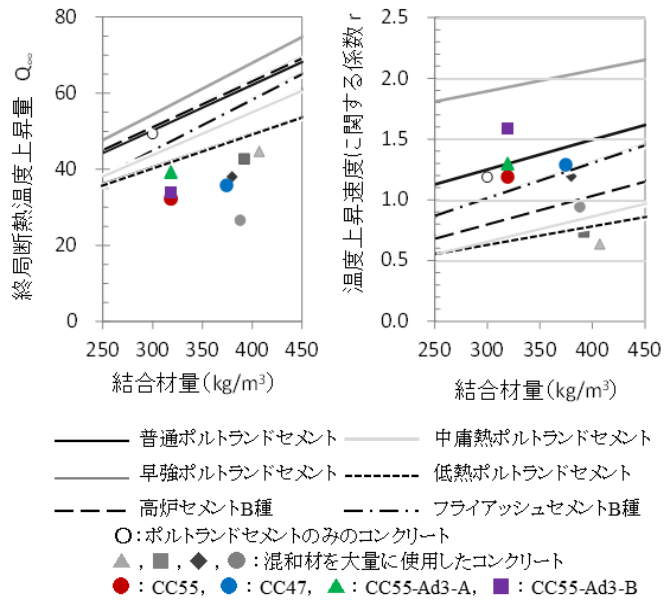


図-15 断熱温度上昇特性 (文献 2) に加筆

Fig.15 Insulation temperature rise characteristics (Addition to Reference 2)

表-4 土木学会「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針 (案)」と比較したカーボンリサイクル・コンクリートの特徴

Table 4 Features of carbon recycled concrete compared to the Japan Society of Civil Engineers “Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures Containing High-volume Mineral Admixtures”

項目	特徴
圧縮強度	指針案と同様に水結合材比で設計可能
その他力学特性	指針案と同様に圧縮強度との関係式で推定可能
凍結融解抵抗性	指針案と同等
ASR 抵抗性	優れた抑制効果を有する
中性化抵抗性	指針案と同様に中性化の進行は平方根に比例し、室内試験により速度係数を算出可能
水分浸透抵抗性	抵抗性は指針案と同等
塩分浸透抵抗性	一般のコンクリートと同様に水分の浸透は平方根に比例し、室内試験により速度係数を算出可能
乾燥収縮	抵抗性は一般のコンクリートより優れる
断熱温度上昇	指針案と同様に塩化物の侵入が停滞する
	抵抗性は一般のコンクリートより優れる
	指針案と同様に示方書予測式で推定可能
	指針案と同等

5. おわりに

本稿では、カーボンリサイクル・コンクリートの力学特性や耐久性について、土木学会で指針が示されている「混和材を大量に使用したコンクリート」と比較して報告した。表-4 に本稿で示したカーボンリサイクル・コンクリートの特徴を示す。ポルトランドセメントの使用を“ゼロ”とし、高炉スラグ微粉末を主な結合材とする環境配慮コンクリートに、さらに CCU-CaCO₃ を大量に添加したカーボンリサイクル・コンクリートの各種力学特性や耐久性は、混和材を大量に使用したコンクリートの性能と比較して遜色ないものであり、指針案を準用できる可能性が高いことが分かった。

また本稿では異なる 2 種類の CCU-CaCO₃ を扱ったが、CCU-CaCO₃ の違いによる顕著なコンクリートの品質差は確認されなかった。CCU-CaCO₃ についても適切な規格や規準類を整備することが有用なコンクリートを製造するうえで重要であり、筆者らも GI 基金事業等を通して種々の CCU-CaCO₃ に関する検討を進めている^{4,5)}。今後はカーボンリサイクル・コンクリートの品質を確保するために適切な CCU-CaCO₃ についても精査していく必要がある。

参考文献

- 1) 石田哲也, 渡辺博志, 小林孝一, 大脇英司: 土木学会「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」の概要, コンクリート工学, 57 巻, 7 号, pp.475-480, 2019
- 2) 土木学会コンクリート委員会:「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」, 土木学会, コンクリートライブラリー152, 2018
- 3) 大脇英司, 岡本礼子, 松元淳一, 渡邊悟士: 混和材を大量に使用したコンクリートと実装, コンクリート工学, Vol.57, No.1, pp.71-74, 2019.1
- 4) 梅津真見子, 宮原茂禎, 畑 明仁, 小西正芳: 磨石膏ボードを原料とした合成炭酸カルシウムを添加したコンクリートの基本的品質, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, 2024
- 5) 近藤祥太, 松元淳一, 宮原茂禎, 小西正芳: 磨石膏 から合成した炭酸カルシウムを添加したコンクリート製品の製造と耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, 2024
- 6) 荻野正貴, 大脇英司: 炭酸カルシウムを利用したカーボンリサイクル・コンクリートの基本性状について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, 2023
- 7) 大脇英司, 加藤優志, 宮原茂禎: カーボンリサイクル・コンクリート「T-eConcrete®/Carbon-Recycle」の社会実装の進展-カーボンネガティブを実現したコンクリートの現状と種々の特徴, 建設機械施工, Vol.76, No.4, 2024.4
- 8) コンクリート工学協会: JCI 規準集 1977-2002 年度, pp.465-467, 2004
- 9) 大友健, 府川徹, 安藤公一, 柳栄治, 廣島明男, 宮澤伸吾: 収縮を抑制した高炉セメント B 種を用いた低発熱コンクリートの特性と実構造物への適用- CO₂ 排出量削減に寄与できる高炉セメントコンクリートの高性能化-, 大成建設技術研究所報, Vol.38, 2005
- 10) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書, 設計編, 土木学会, pp.38-41 および p.44, 2018
- 11) 平本真也, 大塚勇介, 植村幸一郎, 檀康弘: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの水分浸透性に関する評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 1, 2019
- 12) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書, 設計編, 土木学会, pp.107-108, 2018