

T-eConcrete®/Carbon-Recycle を用いたコンクリート平板の 連続生産による品質安定性の検証

阿武 稔也*¹・加藤 優志*¹・山本 佳城*¹・黒岩 秀介*²・大原 信成*³・辻 慎太郎*⁴

Keywords : environmentally friendly concrete, concrete panel, calcium carbonate
環境配慮コンクリート, コンクリート平板, 炭酸カルシウム

1. はじめに

カーボンニュートラルに対する関心の高まりから、コンクリート製造時の CO₂ 排出量削減を目的として、セメントを産業副産物の混和材で置換した低炭素型のコンクリートが開発されている¹⁾など。コンクリートの材料起因の CO₂ 排出量の約 9 割はセメントの製造に起因する²⁾ことから、セメントの代わりに産業副産物である高炉スラグ微粉末等を使用することで CO₂ 排出量を削減することができる。

当社では、産業副産物である高炉スラグ微粉末を使用した環境配慮コンクリート T-eConcrete を開発している³⁾。T-eConcrete は CO₂ 削減率ごとに複数のラインナップを用意している。このうち“セメント・ゼロ型”は、ポルトランドセメントを使用せず、高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を用いて硬化させる。従来のコンクリートに対する CO₂ 削減率は約 80%である。

“Carbon-Recycle”はセメント・ゼロ型の調合をベースに、CO₂ を吸収して製造された炭酸カルシウムを添加して製造する。これにより、使用材料に由来する CO₂ 排出量をマイナスにすることができる。

著者らのグループではこれまで、セメント・ゼロ型および Carbon-Recycle の建築物への適用の事例について、非構造部材として間仕切り壁、門扉、縦ルーバーおよび擬石平板、構造部材として、人道橋基礎への適用について報告している^{4),5)}。今後、建築物へのさらなる適用が進めば、建物建設時の CO₂ 排出量削減に大きく貢献できる技術であると考えられる。

これまでの適用事例は、いずれもプレキャストコンクリート（以下、PCa）部材として製造しているが、製造量が少量であったことから、製造日の合計としては数日程度のものがほとんどであった。今回、Carbon-Recycle を用いたコンクリート平板を長期間にわたって製造する機会があり、フレッシュコンクリートや圧縮強度などの品質安定性に関するデータを取得したので、その結果を報告する。コンクリート平板の製造は PCa 工場において全 57 回、7 か月間（4~10 月）にわたって行った。PCa 工場で長期間にわたる製造データを拡充することは、環境配慮コンクリートの特性を把握するうえで重要であると考えられ、調査設計や品質管理に反映することで、より合理的で品質の安定した製造につながるものと考えられる。

2. コンクリート平板の概要

コンクリート平板の寸法は①300×300×50mm、②300×100×50mm とし、①9,878 枚、②521 枚の製造を行った。コンクリート平板は打設時に型枠面となる面を仕上げ面とした。製造したコンクリート平板を写真-1 に示す。

3. 使用材料および調査

コンクリート平板の製造に用いたコンクリートの使用材料を表-1 に、使用した炭酸カルシウム粉末の物性を表-2 に示す。Carbon-Recycle は JIS A 6206 に規定され

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 RC研究室

* 2 技術センター 都市基盤技術研究部

* 3 西日本営業本部

* 4 建築本部 建築管理部

る高炉スラグ微粉末 4000 に複数種の粉体で構成されるカルシウム系刺激材を添加することで硬化するものである。また、CO₂ を吸収して製造された炭酸カルシウム粉末を用いることで、材料起因の CO₂ 排出量の削減を図っている⁶⁾。

コンクリートの標準調合を表-3 に示す。コンクリートの調合は、炭酸カルシウム粉末を除く材料は月ごとの材料成績表、炭酸カルシウム粉末は PCa 工場への納入ごとの分析値による密度に基づき修正した。水粉体比 (W/P) は、事前の試し練りで後述する曲げ強度の目標値 4N/mm² が得られることを確認し、27.1%とした。カーボンリサイクル・コンクリートは粉体量が多く、粘性が高くなる傾向にあるため、スランプフローで管理した。スランプフローの管理値は事前の試し練りで材料分離や骨材の沈降が生じないことを確認し、55.0 ±7.5cm とした。

4. 製造工程および製造時の試験項目

4.1 製造の概要

コンクリート平板の製造は PCa 工場で 4 月～10 月に行った。1 日の製造枚数は約 200 枚とし、全 57 回の製造を行った。コンクリート平板の主な製造・施工工程を写真-2 に示す。また、PCa 工場での試験項目を表-4 に示す。

4.2 練混ぜ・打込み・蒸気養生

コンクリートの練混ぜは、PCa 工場の実機ミキサ（二軸強制練りミキサ、公称容積 1.67m³）を用いた。粉体量が多いため、練混ぜはモルタル先行練りとした。練り混ぜたコンクリートは打込み日ごとに、スランプフロー、空気量、コンクリート温度および塩化物含有量の検査を行い、目標の性状が得られたことを確認し、型枠に打ち込んだ。打込みの際には、バイブレータを用い、入念に締固めを行った。打込み後、打込み面の



写真-1 製造したコンクリート平板

Photo.1 Concrete panel made of T-eConcrete/Carbon-Recycle

表-1 使用材料

Table 1 Materials

記号	種類	密度*
W	水（地下水）	1.00
粉体	BFS 高炉スラグ微粉末 4000	2.91
	CC 炭酸カルシウム粉末	表-2 に記載
P	St カルシウム系刺激材 ⁶⁾	2.63
S	細骨材（石灰砕砂）	2.68
G	粗骨材 2005（石灰砕石）	2.69
SP	高性能 AE 減水剤 標準型 (I種) (ポリカルボン酸エーテル系)	—
AE	AE 剤 (I種) (アルキルエーテル系陰イオン 界面活性剤)	—

*初回製造時の材料成績書に記載された密度を記載

表-2 炭酸カルシウム粉末の物性の例

Table 2 Physical properties of calcium carbonate

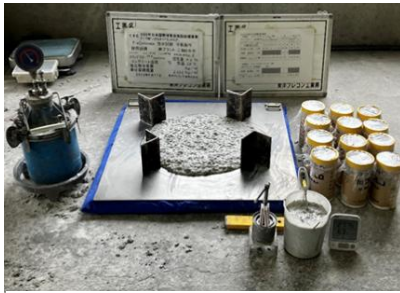
密度	[g/cm ³]	2.66
比表面積	[cm ² /g]	3160
湿分	[%]	0.1
化 学 成 分	CaCO ₃	99.1
	MgO	0.32
	SO ₃	0.32
	Al ₂ O ₃	0.09

表-3 カーボンリサイクルコンクリートの調合

Table 3 Mix propotion of Carbon-Recycle concrete

W/P [%]	s/a [%]	スランプフロー [cm]	空気量 [%]	単位量[kg/m ³]						SP* [P×%]	AE*
				W	BFS	CC	St	S	G		
27.1	42.0	55.0±7.5	4.5±1.5	175	294	291	62	616	854	0.90	0.06

*混和剤添加量は代表的な値を記載、製造ごとに適宜調整



(1)フレッシュコンクリートの性状試験



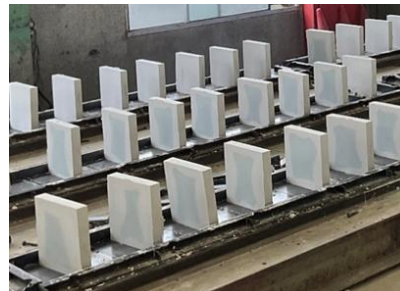
(2)打込み状況



(3)パイプレートによる締固め



(4)蒸気養生の状況



(5)脱型



(6)湿潤養生

写真-2 コンクリート平板の製造状況

Photo.2 Manufacturing process of concrete panel

こて押えを行ったのち、打込み面の乾燥および蒸気養生中の水滴の滴下を防止する目的で打込み面に密着するようにビニルフィルムを被せ、さらに型枠全体にシートをかけて養生した。平均気温が 18°C を下回ると予想される日は蒸気養生（前置き 2h 以上、温度上昇勾配 15°C/h 以下、最高温度 55°C 、最高温度継続時間 4h、温度下降勾配 15°C/h 以下）を行なった。

4.3 脱型後の養生および強度試験

脱型の判定には製品同一養生供試体を用い、事前の試し練りで脱型に問題がないことを確認し、脱型時所要強度は 12N/mm^2 とした。脱型は原則材齢 2 日としたが、PCa 工場の休日や製造スケジュールに応じて、脱型時所要強度を確認したうえで材齢 1~5 日とした。脱型後は材齢 7 日以上での湿潤養生を行うため、パレットに積載しビニルフィルムで全体を覆い、PCa 工場屋内で保管した。材齢 7 日以降は、PCa 工場の屋外ヤードで保管した。コンクリートの圧縮強度は 24N/mm^2 と設定し、これを出荷日所要強度として、材齢 14 日の製品同一養生供試体により管理した。また、養生温度や乾燥の影響を受けない条件で、製造日ごとのコンクリート強度の安定性を評価する目的で、材齢 28 日の標準養生供試体の圧縮強度試験を行った。製造したコンクリート平板は 1 回/月の頻度で曲げ強度試験を行い、製品としての強度を確認した。コンクリート平板の曲げ強度は JIS A 5371 プレキャスト無筋コンクリート製品 附属書 B 舗装・境界ブロック類に規定される 4N/mm^2 を目

表-4 試験項目

Table 4 Measurement items

項目		頻度	試験方法
スランプフロー		1 回/日	JIS A 1150
空気量		1 回/日	JIS A 1128
コンクリート温度		1 回/日	JIS A 1156
塩化物含有量		1 回/日	JASS 5 T-502 に準じて、塩化物測定器（モール法）で測定
圧縮強度	部材同一養生(脱型)	1 回/日	JIS A 1108
	部材同一養生(出荷)	1 回/日	
	標準養生	1 回/日	
コンクリート平板の曲げ強度		1 回/月	JIS A 5371 附属書 B

標とした。コンクリート平板の曲げ強度の試験材齢は材齢 28 日または 91 日とした。

5. 試験結果

5.1 フレッシュコンクリートの性状

化学混和剤の添加量を図-1 に、スランプフローの試験結果を図-2 に、空気量の試験結果を図-3 に示す。すべての製造日で、スランプフローおよび空気量が管理

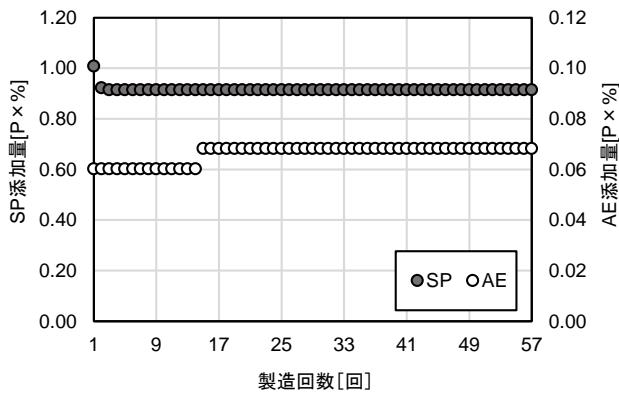


図-1 化学混和剤の添加量
Fig.1 Amount of admixture added

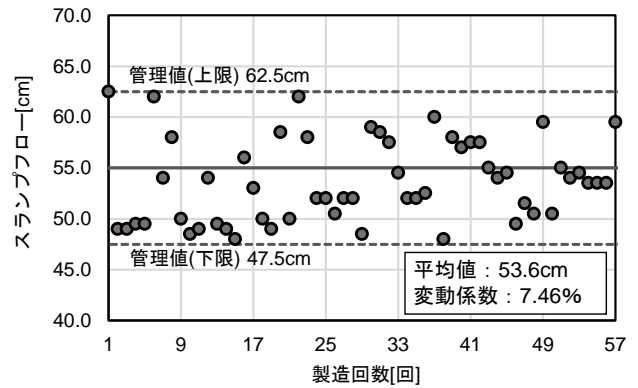


図-2 スランプフロー
Fig.2 Slump flow

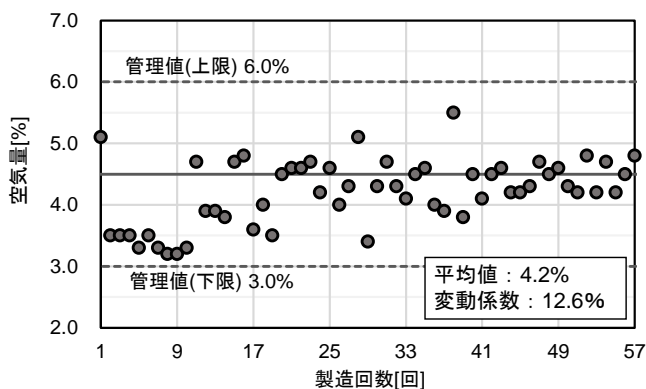


図-3 空気量
Fig.3 Air content

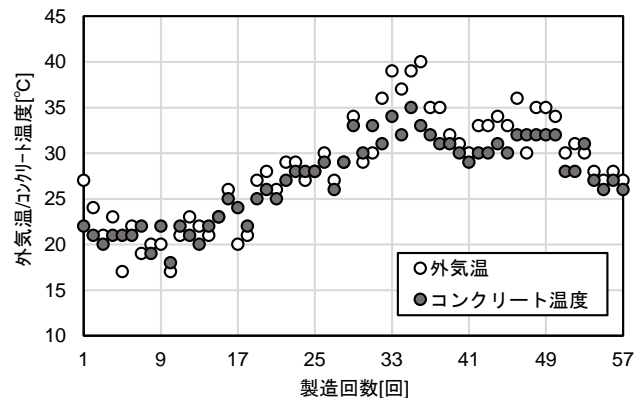


図-4 外気温およびコンクリート温度
Fig.4 Outdoor air temperature and temperature of concrete

値を満足することを確認した。スランプフローは目標値 55.0cm に対し、平均値 53.6cm(変動係数 7.46%)であった。本検討では SP の添加量はほぼ一定で、夏期の高湿環境下であっても、所定のスランプフローを得るために必要な SP の添加量が増加することはなかった。空気量は目標値 4.5%に対し、平均値 4.2% (変動係数 12.6%) となった。空気量は 2～10 回目の製造時に管理値の下限に近い値が連続したため、15 回目の製造以降、AE の添加量を調整した。調整後の 15～57 回目限定すれば、平均値 4.4%、変動係数 9.16%となり、混和剤添加量の調整により、空気量の変動を抑制できた。以上のように、フレッシュコンクリートの性状にはややばらつきがみられたが、製品の製造や後述する圧縮強度に影響するものではなかった。

製造日ごとの外気温とコンクリート温度の推移を図-4 に示す。PCa 工場での製造は 4～10 月に実施しており、季節の推移に応じて、コンクリート温度は 18～35℃の間で変動した。夏期にはコンクリート温度が 35℃付近になる場合もあったが、フレッシュコンクリートの性状や後述する強度発現性におよぼす影響は小さかった。

表-5 使用粉体の塩化物イオン量

Table 5 Chloride ion content

種類	単位量 [kg/m ³]	塩化物イオン量 [%]	塩化物量 [kg/m ³]
高炉スラグ微粉末	294	0.008 ^{※1}	0.0235
炭酸カルシウム粉末	291	0.002 ^{※2}	0.0058
カルシウム系刺激材	62	0.008 ^{※3}	0.0049
合計			0.0343

※1:製造期間中の試験成績表に記載された値の最大値

※2:電位差滴定法による実測値

※3:構成材料ごとの塩化物イオン量を※1 または※2 により求め、構成比による加重平均によって算出

コンクリートの塩化物量は 0.01～0.04kg/m³ で推移し、すべての製造日で管理値の 0.30kg/m³ を大きく下回った。ここで、使用した粉体の塩化物イオン量を表-5 に示す。今回のカーボンリサイクル・コンクリートに使用した粉体に由来する塩化物量は、0.03kg/m³ 程度であり、コンクリートの塩化物量が管理値の 0.30kg/m³ を超える可能性は極めて小さいと考えられる。

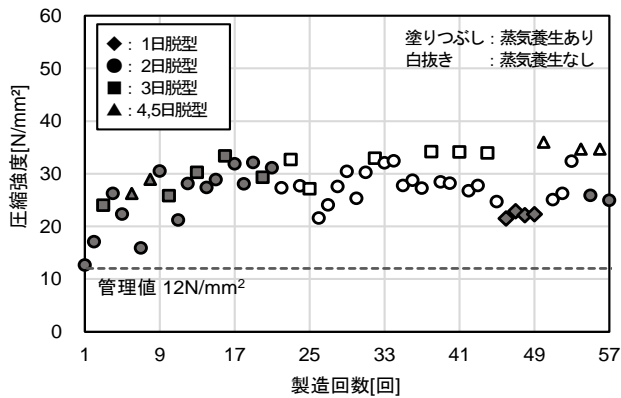


図-4 脱型強度

Fig.4 Compressive strength for demolding

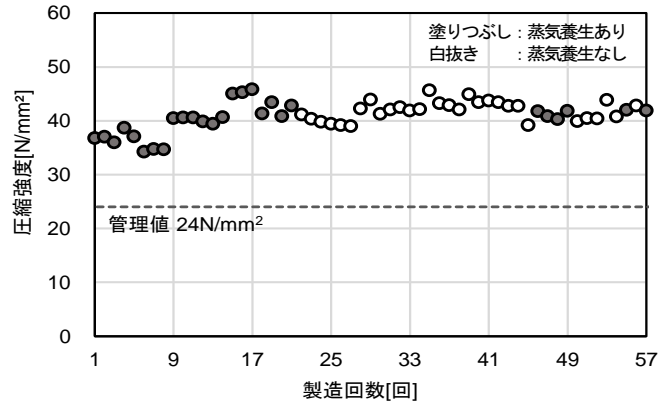


図-5 出荷強度

Fig.5 Compressive strength for shipping

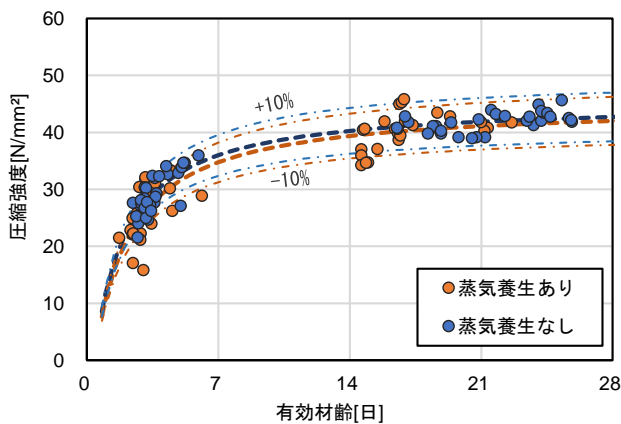


図-6 有効材齢と圧縮強度の関係

Fig.6 Relationship between compressive strength and effective material age

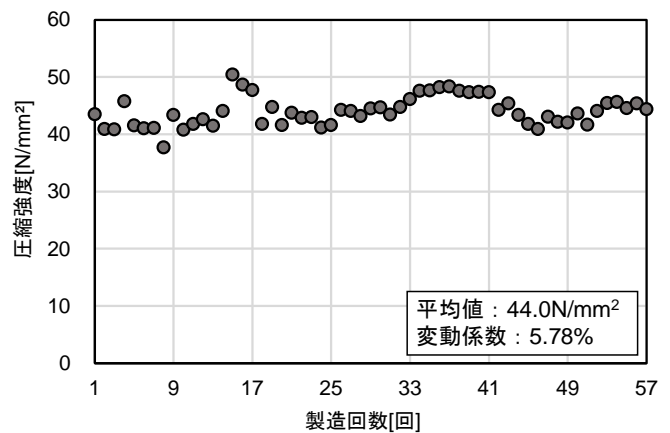


図-7 標準養生供試体の圧縮強度

Fig.7 Compressive strength of standard curing specimen

5.2 圧縮強度

脱型強度の試験結果を図-4 に示す。脱型強度は、初回製造時が最も小さく、15 回目頃まで次第に増大する傾向となった。本試験で使用した Carbon-Recycle は、高炉スラグ微粉末を主要な結合材とし、高炉スラグ微粉末を混和材として使用する場合と同様に⁷⁾、材齢初期での強度発現性がやや緩慢で、養生温度の影響を受けやすい。そのため、初回～15 回目までの製造期間は 4～5 月にあたり、気温が上昇するにつれて、脱型強度が増大したものと考えられる。本検討の製造期間では、夏期は蒸気養生を必要とせず、それ以外の期間では、蒸気養生を行うことで、概ね 2 日以内に脱型時所要強度を確保することができた。

出荷強度の試験結果を図-5 に示す。出荷強度はすべての製造回で管理値を上回っていることを確認した。出荷強度の判定は材齢 14 日で行ったが、脱型強度の結果から、早ければ材齢 2～3 日の時点、遅くとも材齢 1 週までの間に出荷日所要強度が確保できていると考えられる。製造初期で脱型強度が相対的に小さい製造期

間 9 回までの範囲を除けば、出荷強度は概ね 40～45N/mm² となり、安定した圧縮強度が得られている。

ここで、季節による環境温度の変化や蒸気養生の有無により、養生温度が異なる場合の製品同一養生供試体の強度発現性への影響の有無を確認するため、養生温度から式(1)⁸⁾を用いて有効材齢を求め、有効材齢と圧縮強度の関係を式(2)⁸⁾により最小二乗法で近似した。有効材齢と圧縮強度の関係式の算出は、蒸気養生による材齢初期の高温履歴がその後の強度発現性におよぼす影響を評価する目的で、蒸気養生を行った場合、行わなかった場合についてそれぞれ行った。有効材齢の算出に用いる環境温度は、温度センサで測定した。打設～脱型までの期間は養生シート内に、脱型～材齢 7 日までは PCa 工場屋内で湿潤養生としたため工場屋内に、材齢 7～14 日は PCa 工場の屋外ヤードで保管したため、屋外ヤードに温度センサを設置した。また、式(2)中の S_f は過去の実験結果から凝結時間 8～9 時間と想定して 0.4 日と仮定し、式(2)中の f_{c28} は後述する標準養生供試体の圧縮強度の平均値(44.0N/mm²)とした。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left\{ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} \right\} \quad (1)$$

ここで、 t_e : 有効材齢 [日]
 Δt_i : ある一定の温度が継続する期間 [日]
 $T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続する温度 [°C]

$$f_c(t) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} \cdot f_{c28} \quad (2)$$

ここで、 $f_c(t)$: 有効材齢での圧縮強度 [N/mm²]
 s : コンクリートの種類にかかわる定数 [-]
 S_f : 硬化原点のための補正項 [日]
 a, b : 定数 [-]
 f_{c28} : 材齢 28 日圧縮強度 [N/mm²]

近似の結果、蒸気養生を行った場合、 $a=1.905$ 、 $b=0.978$ で、蒸気養生を行わなかった場合、 $a=1.671$ 、 $b=0.970$ で最も精度よく近似された。得られた近似曲線を図-6 に示す。有効材齢と圧縮強度の関係は、蒸気養生の有無によって明確な差は見られず、同様な強度発現性が確認された。蒸気養生により、材齢初期の強度発現を促した場合、ポルトランドセメントを用いた一般的なコンクリートでは、長期的な強度発現は停滞することが知られており⁹⁾、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでも同様の報告¹⁰⁾があるが、本検討での蒸気養生の条件であれば、蒸気養生を行ったとしても、実材齢 14 日までに強度発現の停滞は見られなかった。また、図-6 には強度試験結果のばらつきを評価するため、算出した近似式の $\pm 10\%$ の曲線を併記した。蒸気養生を行わない場合、おおむね近似式の $\pm 10\%$ の範囲にあるものの、蒸気養生行った場合では $\pm 10\%$ の範囲外のデータが散見され、比較的ばらつきが大きい結果となった。蒸気養生を行った場合の強度発現性において、有効材齢による評価の妥当性については、さらなる検討の余地がある。

標準養生供試体の圧縮強度試験の結果を図-7 に示す。平均値は 44.0N/mm²、変動係数は 5.78% (標準偏差 2.54N/mm²) であり、安定した品質のコンクリートが製造されたものと判断できる。

5.3 コンクリート平板の曲げ強度

コンクリート平板の曲げ強度の試験結果を図-8 に示す。コンクリート平板の曲げ強度は目標値とした JIS A 5371 プレキャスト無筋コンクリート製品 附属書 B 舗装・境界ブロック類に規定される 4N/mm² を満たすことを確認した。

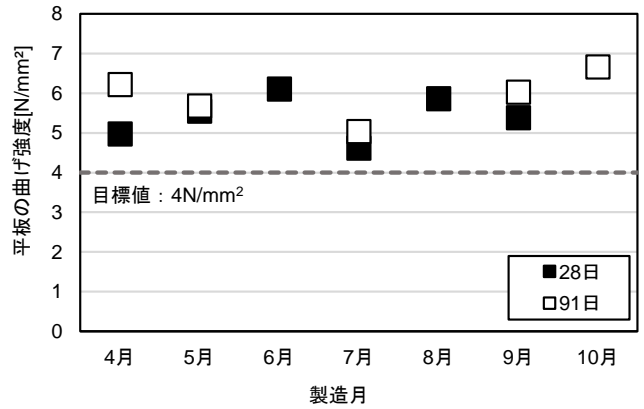


図-8 コンクリート平板の曲げ強度
 Fig.8 Flexural strength of concrete panel

6. おわりに

本稿では、T-eConcrete/Carbon-Recycle を用いたコンクリート平板の連続生産を行い、フレッシュコンクリートや圧縮強度などの品質安定性に関するデータを取得した。

- 1) スランプフロー、空気量および塩化物量はすべての製造回で管理値を満足することを確認した。
- 2) 製品同一養生供試体の圧縮強度は外気温の影響による変動が見られたが、脱型強度および出荷強度はすべての製造時に管理値を満足した。
- 3) 製品同一養生供試体の圧縮強度を養生温度から算出した有効材齢との関係で整理した。有効材齢と圧縮強度の関係は、蒸気養生の有無によらず、おおむね同様な関係式で示された。
- 4) 標準養生供試体の圧縮強度の変動係数は 5.78% となり、安定した品質のコンクリートが製造されたものと判断できる。

カーボンニュートラルへの関心の高まりから、T-eConcrete は CO₂ 排出量削減に寄与できる技術としてさらなる活用が期待される。今後も技術の普及・展開に努め、脱炭素社会の実現に貢献していく。

参考文献

- 1) 小林利充：脱炭素社会に向けた低炭素型のコンクリートに関する取組み，コンクリート工学，Vol.59，No.9，p.770-775，2021.
- 2) 山之内康一郎，諏訪一広，西本洋一：生コンクリート業界における二酸化炭素排出量の実態調査（2019 年度），日本建築学会大会学術講演梗概集，p.79-80，2024.
- 3) 大脇英司，荻野正貴：カーボンリサイクル材料を用いてカーボンネガティブを実現した T-eConcrete®/Carbon-Recycle の開発，セメント・コンクリート，No.900，

- p.70-75, 2022.
- 4) 今井和正・渡邊悟士・山本佳城・井之上太ら：CO₂排出量がマイナスとなる環境配慮コンクリートの建築物への適用（その 1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集，p.627-632, 2023.
 - 5) 加藤優志，山本佳城，一色裕二，輪湖大元，小林圭：T-eConcrete[®]/セメント・ゼロ型，Carbon-Recycle の建築物の構造部材への適用，大成建設技術センター報，第 57 号，p.12-1~7, 2024.
 - 6) 加藤優志，一色裕二，保坂正義，小林圭：セメントを使用しない環境配慮コンクリートの建築物の構造部材への適用，コンクリート工学，Vol.62，No.2，p.150-155, 2024.
 - 7) 壇康弘：高炉スラグ微粉末，コンクリート工学，Vol.52，No.5，p.387-392, 2014.
 - 8) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 2016.
 - 9) 杉山央，榊田佳寛：初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性，日本建築学会構造系論文集，Vol.64，No.515，p.23-30, 1999.
 - 10) 長尾之彦，鈴木孝治：高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの蒸気養生特性とその利用，新日鉄住金技報，Vol.399，p.127-131, 2014.