

T-eConcrete®/Carbon-Recycle を用いたプレキャストカーテンウォール部材の耐火検証

馬場 重彰*¹・清野 晶*¹・加藤 優志*²・大和矢 麻起*³

Keywords : fire resistance, curtain wall, ground granulated blast-furnace slag, calcium carbonate, CO₂ emissions
耐火性能, カーテンウォール, 高炉スラグ微粉末, 炭酸カルシウム, CO₂ 排出量

1. はじめに

コンクリート製造時の二酸化炭素(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コンクリートが開発されている。従来のセメントを使用したコンクリートの材料製造に起因するCO₂ 排出量は約260～300kg/m³であり、その約90%はセメントの製造に起因する。そのため、セメントの使用量を低減することでCO₂ 排出量を削減することが可能となる。

当社は、材料製造に起因するCO₂ の排出量を削減する環境配慮コンクリートT-eConcrete®を開発している¹⁾。セメント・ゼロ型（以下、CZ）は、ポルトランドセメント（JIS R 5210）を使用せず、高炉スラグ微粉末にカルシウム系刺激材を添加することで硬化させたコンクリートである。Carbon-Recycleは、CZ をベースにした調合にCO₂ を吸収して製造された炭酸カルシウム粉末を添加するものであり、大量のCO₂ の吸収・固定が可能で「カーボンネガティブ」を達成したコンクリートである。CZ およびCarbon-Recycle については、これまでも二次製品等の非構造部材に適用した実績があり²⁾、今後も適用範囲を拡げることで、CO₂ 排出量削減に大きく貢献できる。

そこで、CO₂ 排出量の削減に向けて、Carbon-Recycleのプレキャストカーテンウォール（以下、PCaCW）への適用を目指し、PCaCWに求められる要求性能のうち、耐火性能を把握するためにPCaCWの加熱試験を実施した。本報では、PCaCWの加熱試験結果の概要を記述する。

2. PCa カーテンウォール加熱試験計画

2.1 試験体

試験体一覧を表-1 に示す。試験変数は試験体の加熱面および PCa 板幅であり、試験体数は各加熱面に対して3体、合計6体である。PCa 板を支持しているファスナー側の加熱を“屋内側加熱”，ファスナー側が非加熱の場合を“屋外側加熱”と称する。

試験体形状例を図-1～図-2 に示す。No.1 および No.3 試験体の PCa 板形状は、幅 1630mm×高さ約 2660mm および幅 1630mm×高さ 400mm、No.2 および No.4 試験体では、高さ約 2500mm で幅 2860mm および 400mm とした。全試験体とも PCa 板厚は 150mm である。No.1 および No.3 試験体では、PCa 板を組み合わせて縦目地および横目地を再現し、目地幅は 35mm とした。PCa 板の反り量が大きくなるように加熱炉の上側に大きい PCa 板を設置し、横目地の耐火性能を検討する事とした。四周の鋼材に鉄骨梁を設置し、その梁に PCa 板をファ

表-1 試験体一覧
Table 1 List of specimens

試験体名	加熱側	PCa板寸法			加熱試験時の コンクリート特性	
		左側PCa板 幅×高 [mm]	右側PCa板 幅×高 [mm]	PCa板 厚さ [mm]	含水率 [%]	圧縮強度 [N/mm ²]
No.1-1	屋外側 (1時間 加熱)	1630×2660	1630×2660	150	3.9	49.8
No.1-2		1630×400	1630×400			50.9
No.2		2860×2500	400×2500		4.9	51.3
No.3-1	屋内側 (1時間 加熱)	1630×2660	1630×2660	150	4.9	37.9
No.3-2		1630×400	1630×400			46.9
No.4		2860×2500	400×2500		4.9	51.4

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 木・鋼研究室
* 2 技術センター 都市基盤技術研究部 RC研究室
* 3 建築本部 技術部

スナール金物にて留め付けた。また、PCa 板幅が大きくなると、支持部から跳ね出した PCa 板の反り量が大きくなり、縦目地の耐火性能に影響を及ぼす懸念があるため、No.2 および No.4 試験体では PCa 幅を大きくし、縦目地のみを再現した。

No.3 試験体では、ファスナー金物は、自重および面外・面内方向の力を支持する形状とした。PCa 板の自重は、プレート組み合わせによって製作した金物（自重受け鋼材）に M24 ボルトを置くことで支持した。面外・面内受け金物は L アングルを使用し、M16 ボルトで留め付けた。金物にはけい酸カルシウム板（厚さ 20mm）で被覆した。No.1 試験体ではファスナーは加熱されないため、自重および面外・面内受けを兼ねた L アングルに M20 ボルトにて PCa 板を支持した。全試験体とも縦目地は突き付けとしてレインバリア (EPDM ガasket) およびウインドバリア（シリコン系ガasket）を設置した。No.1 および No.3 試験体の PCa 板横目地には水返しのためのコンクリート立ち上がりがあり、水返し部にウインドバリアを設置した。

PCa 板は縦筋および横筋とも D10 (SD295A) ダブル、ピッチは縦筋で 150 mm、横筋で 200 mm とした。コンクリート表面と縦筋とのかぶり厚さは 30mm とした。

使用材料・調査を表-2 に示す。今回使用した Carbon-Recycle は、従来のコンクリートに対する CO₂ 削減率は約 120% であり、48.1kg/m³ の CO₂ を固定化する事が可能である。水粉体比は 30.3%、Carbon-Recycle 用の粉体には、炭酸カルシウム粉末に加えて、高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した。硬質砂岩砕砂、硬質砂岩砕石を用い、PP 量を外割で 1kg/m³ 混入した。目標の流動性、空気量を得るために、高性能減水剤および AE 剤の添加量を調整した。

2.2 要求性能および測定項目

PCaCW の要求性能は、遮熱性（加熱面以外の面の温度が、当該面に接する可燃物が燃焼するおそれのある温度以上に上昇しないこと）および遮炎性（火熱が加えられた場合に、非加熱側に火炎を出さないこと）である。具体的には、遮熱性の可否判定は、「試験体の裏面温度上昇が、平均で 140K 以下、最高で 180K 以下であること」である³⁾。

試験では、試験体を壁炉にセットし、試験体の片面から加熱を実施した。炉内温度は、ISO834 に記述されている標準加熱曲線（1 時間加熱）とし、加熱終了後も炉内温度、試験体温度および面外変位を計測した。

No.1-1 および No.1-2 試験体では、PCa 板で 8 箇所、目地部で 8 箇所、計 16 箇所ですら温度を測定した。

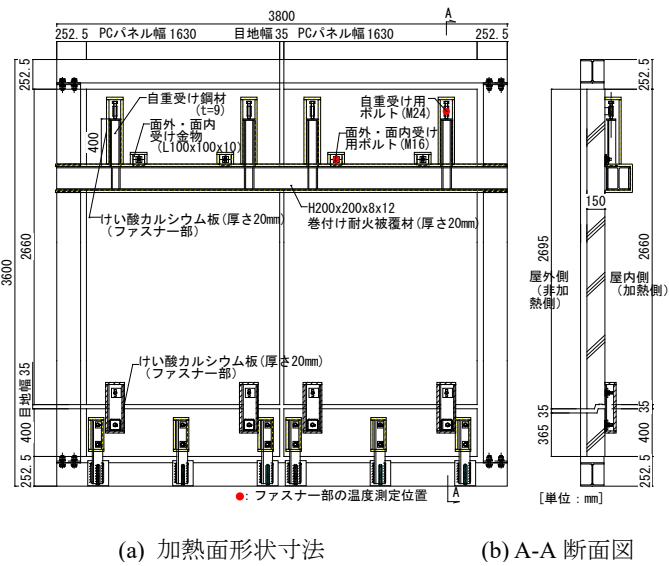


図-1 No.3-1 および No. 3-2 試験体の形状寸法
Fig.1 Configuration of No.3-1 and No.3-2 specimens

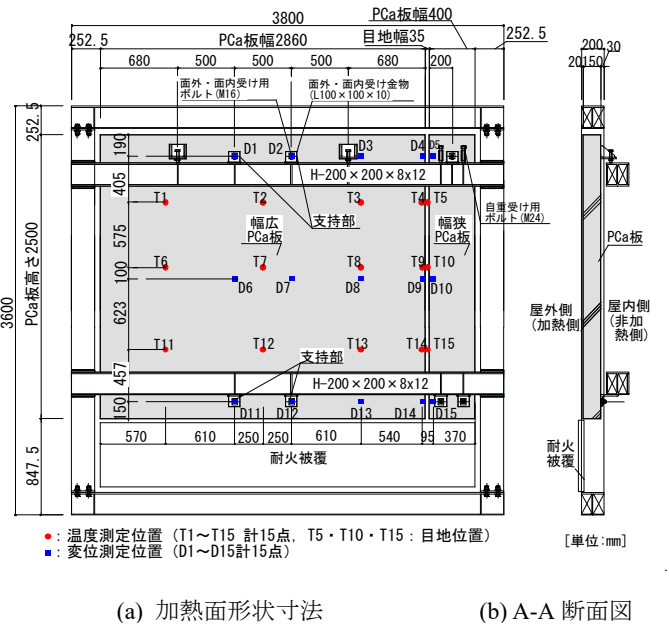


図-2 No.2 試験体の形状寸法
Fig.2 Configuration of No.2 specimen

表-2 調査表
Table 2 Mix proportions

W/P (%)	単位量[kg/m³]						添加量		PP 繊維量 [kg/m³]	CO₂ 排出量 [kg/m³]
	水 W	粉体P			骨材		Aa	Asr		
		BFS	St2	Ce	S	G	[P×%]	[kg/m³]		
30.3	175	263	55	260	622	824	3.0	3.0	1.0	-48.1

BFS: 高炉スラグ微粉末4000 (密度2.89g/cm³)
St2: カルシウム系刺激材 (密度2.63g/cm³および密度2.64g/cm³)
Cc: 炭酸カルシウム粉末 (密度2.64g/cm³)
細骨材S: 硬質砂岩砕砂 (表乾密度2.63g/cm³)
粗骨材G: 硬質砂岩砕石 (表乾密度2.65g/cm³)
Aa: 硬化促進剤 (主成分: 亜硝酸塩, 硝酸塩)
Asr: 収縮低減剤 (リグニンスルホン酸系とオキシカルボン酸系の複合体)
PP: ポリプロピレン短繊維 (密度0.91g/cm³)

No.3-1 および No.3-2 では、PCa 板で 8 箇所、目地部で 5 箇所、計 13 箇所裏面温度を測定し、ファスナー金物温度も計測した。No.2 および No.4 試験体では、PCa 板で 12 箇所、目地部で 3 箇所、計 15 箇所裏面温度を測定した。

3. 加熱試験結果

3.1 実験の試験体状況

加熱試験後の例として、No.1-1 試験体の加熱後の状況を写真-1 に示す。全試験体とも加熱面のコンクリートに爆裂現象は認められなかった。PCa 板を貫通するようなひび割れもなく、目地部からの炎の噴出も認められなかったため、遮炎性を満足した。

3.2 温度

炉内温度は全試験体でほぼ同様の結果であり、標準加熱曲線を満足できていた。

屋外側加熱試験体の裏面温度結果を図-3 に示す。No.1-1 および No.1-2 試験体の最高温度上昇は約 80K、全測定点の平均での最高温度上昇は約 75K であった。PCa 板幅を拡大した No.2 試験体では、縦目地部の温度がもっとも高く、最高温度上昇は 113K、平均での最高温度上昇は 85K であった。屋内側加熱試験体の裏面温度結果を図-4 に示す。No.3-1 および No.3-2 試験体の最高温度上昇は約 110K、全測定点の平均での最高温度上昇は 80K であった。PCa 板幅を拡大した No.4 試験体では、裏面最高温度は PCa 板で 90K、全測定点の平均での裏面最高温度は約 80K であった。以上より、全試験体において、遮熱性を満足した。

No.3-1 および No.3-2 試験体の金物温度結果を図-5 に示す。自重受け金物の最高温度は約 550℃、面外・面内受け金物の最高温度は約 300℃であった。

3.3 面外変形

各試験体の面外変形を検討するため、面外変位を測定した。ここでは、PCa 幅を拡大した No.2 試験体の面外変位結果について記述する。変位は、高さ方向に 3 箇所(上下ファスナー位置およびファスナー間の中央)、幅方向に 5 箇所(ファスナー位置 2 箇所、跳ね出し部 1 箇所、など)、計 15 点で測定した。

No.2 試験体のファスナー間中央位置での面外変位結果を図-6 に示す。同図では、加熱開始の変位をゼロとし、加熱面側へのたわみをプラスとして表示している。加熱開始と共に変位が増大して加熱 1 時間で最も大きくなり、加熱を停止した後は変位は小さくなった。幅方向では、ファスナー位置で面外変位が最も大きく、

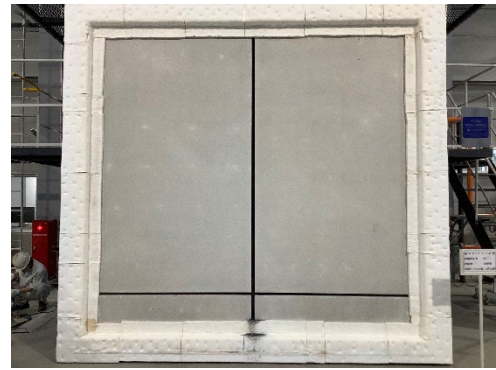


写真-1 No.1-1 試験体の加熱後の状況
Photo.1 No.1-1 specimen after fire

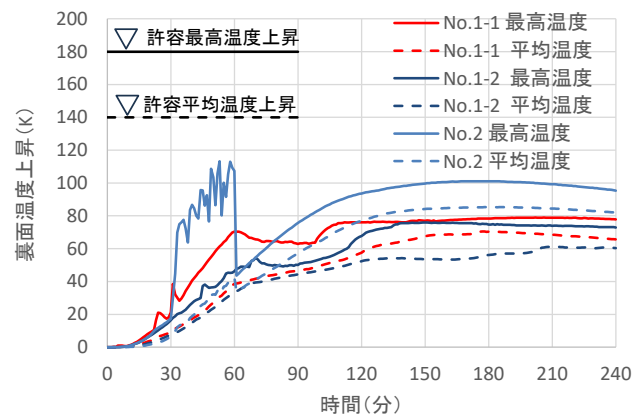


図-3 屋外側加熱試験体の裏面温度上昇
Fig.3 Temperature rise of the back surface on the outdoor-heat

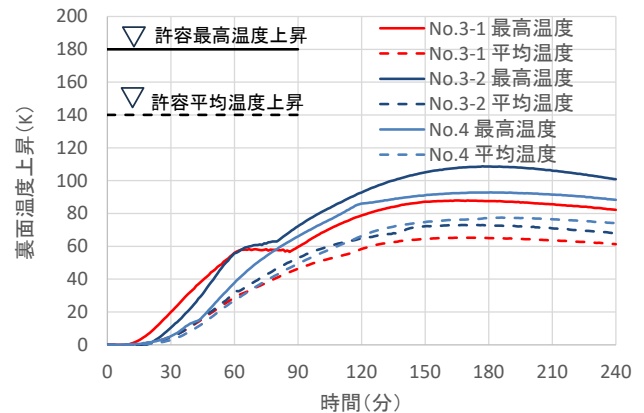


図-4 屋内側加熱試験体の裏面温度上昇
Fig.4 Temperature rise of the back surface on the indoor-heat

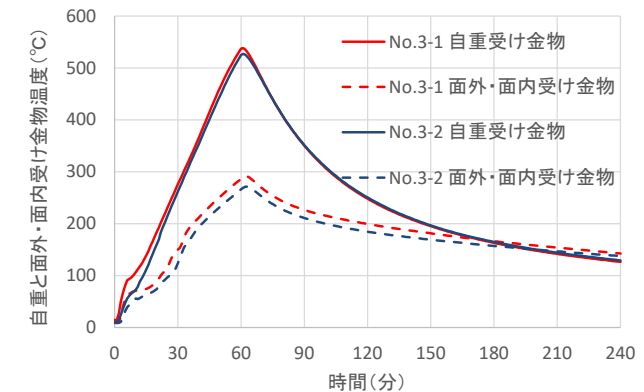


図-5 ファスナー温度結果(No.3-1 および No.3-2)
Fig.5 Fastener temperature results (No.3-1 and No.3-2)

加熱側に約 30mm(D6 および D7)であった。また、跳ね出し部(D9)の変位の最大は、非加熱側に約 10mm であった。PCa 板の高さ方向の面外変位分布を図-7、幅広 PCa 板の幅方向への面外変位分布を図-8 に示す。図-7 (a)-(b)の高さ方向の 0 地点は PCa 板の下端部、図-8(a)-(b)の幅方向の 0 地点はファスナー位置(D1,6)とする。

図-7(a)-(b)より、中央部の最大変位は加熱開始 60 分後に屋内側加熱試験体(D7)で 34.1mm 加熱側に生じた。跳ね出し部(D4,9,14)の変位は、中央部(D2,7,12)よりも非加熱面側へ大きくなった。本試験体では PCa 板の面外変位を 4 点で拘束したために、中央部(D2,7,12)と跳ね出し部(D4,9,14)で高さ方向の面外変位分布が異なり、跳ね出し部の非加熱面側への反りが、支持部からの長さが広い幅広 PCa 板でより大きく生じたと考えられる。

図-8(a)と図-8(b)を比較すると、中央部(D6-D9)よりもファスナー部(D1-D4)の方が端部の非加熱面側への変位が大きくなる傾向を示した。図-8(a)より、加熱開始 1 時間後の幅広 PCa 板と幅狭 PCa 板の跳ね出し部での反り量は幅広 PCa 板端部(D4)で-36.3mm、幅狭 PCa 板端部(D5)で-0.9mm であり、差は 35.4mm であった。図-8(b)より、ファスナー間の中央高さ位置での PCa 板のずれは 27.5mm であった。PCa 板幅を拡大して跳ね出し部の反り量が大きくなっても、耐火性能（遮熱性および遮炎性）を有することを確認した。

4. まとめ

本報では、コンクリートの材料製造時の CO₂ 排出量削減を目的とした“Carbon-Recycle”を使用した PCa カーテンウォール部材の加熱実験結果を示した。Carbon-Recycle を使用した PCa 板に爆裂や亀裂は発生せず、また、PCa 板および目地部温度はクライテリアを満足した。よって、PCa カーテンウォール部材は遮熱性および遮炎性を有することを確認した。

参考文献

- 1) 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，pp.70-75，2022.2
- 2) 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，pp.627-632，2023
- 3) （一財）建材試験センター：防耐火性能試験・評価業務方法書，2024

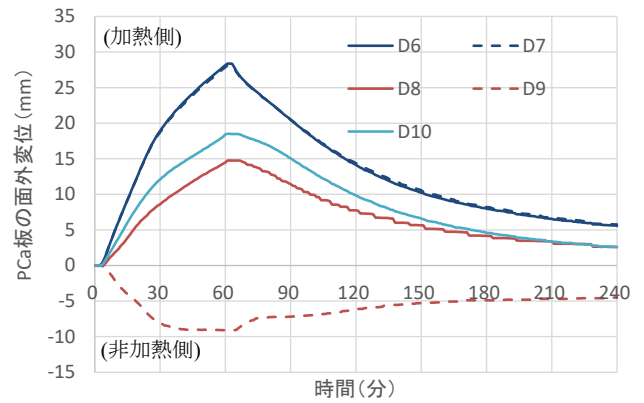


図-6 No.2 試験体の面外変位結果
Fig.6 Displacement result of No.2 specimen

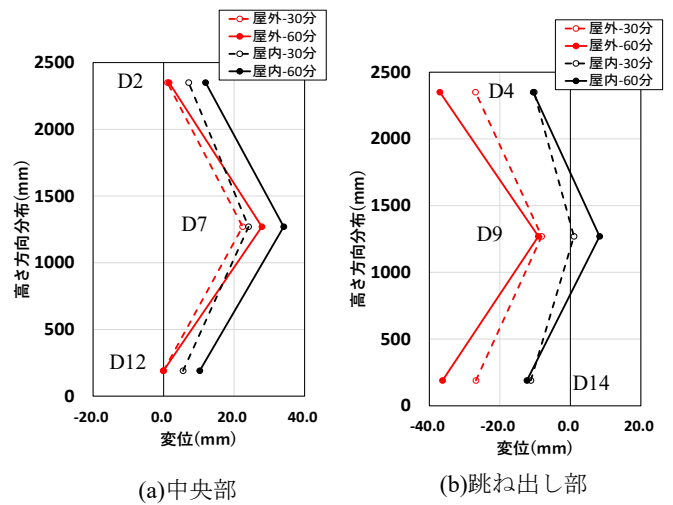


図-7 高さ方向の面外変位分布(No.2 試験体)
Fig.7 Distribution of displacement in height direction
(No.2 specimen)

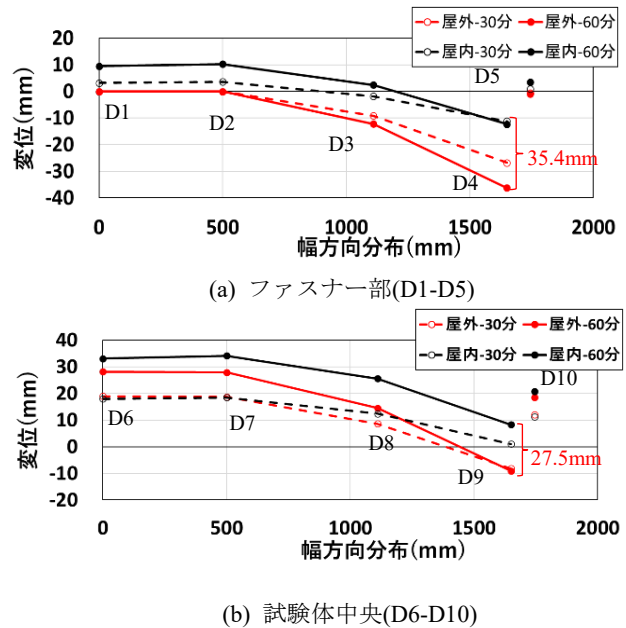


図-8 幅方向の面外変位分布(No.2 試験体)
Fig.8 Distribution of displacement in width direction
(No.2specimen)