

セメントを使用しない環境配慮型吹付ロックウールの開発

環境配慮型吹付ロックウールで耐火被覆された鋼材の耐火性能に関する検証

清野 晶^{*1}・馬場 重彰^{*1}・倉本 真介^{*2}

Keywords : fire protection, sprayed rockwool, environmental consideration, blust-furnance slag, fire resistance

耐火被覆, 吹付ロックウール, 環境配慮, 高炉スラグ微粉末, 耐火性能

1. はじめに

鉄骨造建物の二酸化炭素量排出低減技術の開発を目的として、耐火被覆のシェアが大きい吹付ロックウール（以下、吹付RW）に着目した。吹付RWはポルトランドセメントとロックウールから構成されている。このポルトランドセメントの製造に起因する二酸化炭素排出量の削減を目的に、ポルトランドセメントを全く使用せず、産業副産物である高炉スラグでセメントを置換した粉体¹⁾（以下、セメント・ゼロ材）を用いる環境配慮型吹付RWを開発した。セメント・ゼロ材の使用材料は、高炉スラグ微粉末およびカルシウム系刺激材²⁾である。セメント・ゼロ材を使用する事で、ポルトランドセメントに比べて、材料製造時に発生する二酸化炭素排出量が約80%低減可能となる。本報では、前述のセメント・ゼロ材を使用した環境配慮型吹付RWで被覆した鉄骨部材の耐火性能を検討した結果を報告する。

2. 鉄骨梁の荷重加熱試験

2.1 試験計画

2.1.1 試験体

試験体一覧を表-1に示す。試験体は、崩壊まで加熱するケース1（No.1～No.3）、加熱1時間後に加熱を終了するケース2（No.4-5）に大別される。

ケース1の試験体数は3体とした。試験変数は、ロックウールとセメント・ゼロ材の重量比および環境配慮型吹付RWの被覆厚さとした。ロックウールとセメント・ゼロ材の重量比は、60%と40%、40%と60%の2

種類とした。No.1～2試験体の被覆厚さは25mm、No.3試験体では20mmとした。セメントスラリーは、No.1

表-1 梁試験体一覧
Table 1 List of beam specimen

Case	試験体名	加熱時間	鋼材寸法 [mm]	重量比[%]		スラリー 濃度[%]	かさ密度 [g/cm ³]	吹付RW 被覆厚さ [mm]	吹付RW 含水率 [%]
				ロック ウール	セメント ・ゼロ材				
ケース1	No.1	崩壊まで 加熱	H-400× 200×8×13	60	40	33.3	0.29	25	2.0
	No.2						0.40		4.3
	No.3			40	60	42.9	0.43	20	3.0
ケース2	No.4	一時間 加熱	H-396× 199×7×11	60	40	33.3	0.28	25	2.0
	No.5			60	40				

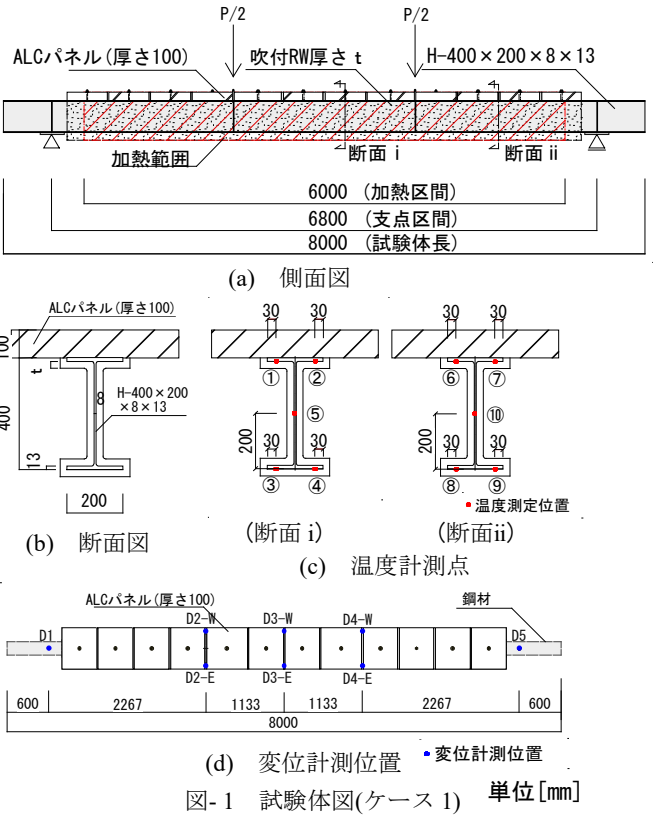


Fig.1 Configuration of beam specimen (Case1)

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室
*2 設計本部 設計品質部

試験体で 33.3%, No.2~3 試験体では 42.9%とした。実験時の環境配慮型吹付 RW の含水率は、2.0~4.3%であった。試験体図を図-1(a) - (b)に示す。試験体は、H-400×200×8×13(L=8000mm), 鋼種は SN490 とした。支持スパンは 6800mm, 加熱区間は 6000mm とした。

ケース 2 の試験体数は、同一条件で 2 体とした。ケース 2 では、環境配慮型吹付 RW が、放冷時に亀裂や脱落を生じないかを確認する事が目的である。鉄骨梁は H-396×199×7×11(L=6000mm), 鋼種は SM490 材, 支持スパンは 5100mm とした。

2.1.2 荷重加熱・計測方法

ケース 1 のセットアップ状況を図-2 に示す。試験体は単純支持とし、荷重位置は、支持区間の 3 等分線上とした。梁試験体には、鉄骨梁の下フランジに長期許容応力度が生ずるように荷重 P を載荷した。ケース 1 では 215kN, ケース 2 では 251kN とした。

ケース 1 の荷重加熱試験では、ISO834 の標準加熱曲線に準拠して実施し、ISO に示されている限界たわみ(289mm), あるいは、限界たわみ速度(12.84mm/分)に到達する、もしくは荷重支持能力を喪失するまで加熱を継続した。

ケース 2 では、1 時間で加熱を終了し、所定荷重を載荷したまま 3 時間放冷を実施した。

熱電対設置位置を図 1(c)に、変位計測位置を図 1(d)に示す。温度計測断面は、ピンローラー支点より 1225mm(断面ii)と 3400mm(断面i)離れた位置とした。各断面における温度計測点の数は、上下フランジで 4 点、ウェブで 1 点、計 5 点とした。変位計測点は、試験体の支点と荷重位置、梁中央の 5 か所、計 8 点とした。

2.2 荷重加熱試験結果

2.2.1 実験後の試験体状況

No.1 および No.4 の荷重加熱実験後の試験体状況を写真-1(a)~(b)に示す。No.1~No.3 では崩壊時まで、No.4 および No.5 では 1 時間加熱後の放冷 3 時間まで、環境配慮型吹付 RW の亀裂や脱落は生じなかった。

崩壊した No.1~No.3 試験体から環境配慮型吹付 RW を取り除いた。一例として、実験後の鋼材状況(No.1)を写真-1(c)に示す。試験体中央や荷重直下の鋼材に局部座屈は確認できなかった。試験後の鉄骨梁の状況および試験体のたわみ状況などを考慮すると、No.1~No.3 試験体は何れも曲げ崩壊したと考えられる。

2.2.2 温度履歴

No.1~No.3 試験体の鋼材最高温度(加熱後 72 分および崩壊時)ならびに崩壊時間を表-2 に示す。ここでは、試験体が荷重荷重の 90%を支持できなくなった時点

を崩壊時間とした。加熱後 72 分時点では、No.2<No.1<No.3 の順に鋼材温度が高くなり、No.3 の鋼材温度は 570℃, No.2 の鋼材温度は 420℃であった。被覆厚さを変化させた No.2 と No.3 の温度差は 150℃, ロックウールとセメント・ゼロ材の重量比を変化させた No.1 と No.2 の温度差は 32℃であった。セメント・ゼロ材量を多くするより、被覆厚さを増加させる方が鋼材温度は低くなる結果であった。崩壊時の鋼材最高温度は約 625~640℃であった。図-3 に全試験体での鋼材最高温

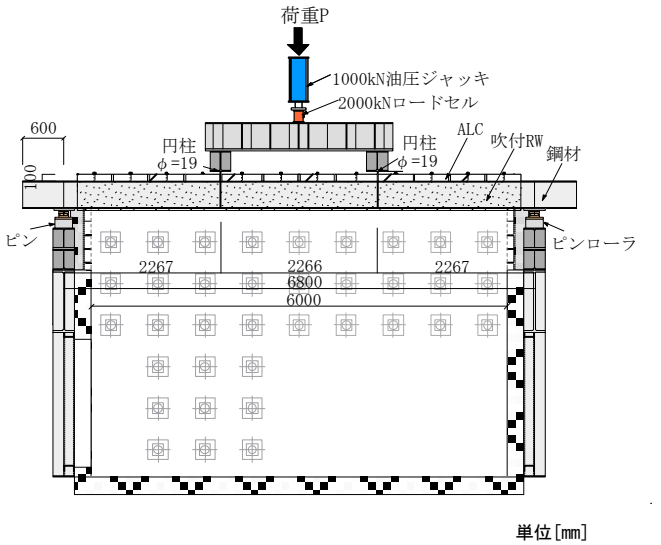


図-2 セットアップ状況(ケース 1)
Fig.2 Test setup of beam specimen(Case1)



(a) 試験後(No.1)



(b) 試験後(No.4) (c) 鋼材の様子(No.1)

写真-1 試験後(No.1, No.4)
Photo.1 Specimen after test (No.1, No.4)

表-2 鋼材温度及び崩壊時間
Table 2 Temperature of steel and collapsed time

試験体名	鋼管温度[°C] (72分時点)	鋼管温度[°C] (崩壊時)	崩壊時間[分]
No.1	452	625	92
No.2	420	640	99
No.3	570	632	77

度の比較を示す。No.4 と No.5 の最高温度は、約 500℃ と約 450℃で約 50℃の違いを示したが、100℃以降での鋼材温度上昇に有意な差はなく、再現性が確認された。No.1 と No.4 の鋼梁温度結果を図- 4 に示す。No.1 では、72 分時点において、上フランジの温度(1,2,6,7)は約 250℃、下フランジとウェブ温度(3,4,5,8,9,10)は約 430℃であった。鋼材寸法が異なるため No.1 と No.4 を直接比較する事は出来ないが、上フランジはほぼ同じ温度、下フランジは No.4 の方が温度は高く、加熱後 60 分では約 100℃高い結果であった。同図中の計算値とは、吹付 RW の熱特性に鋼構造耐火設計指針³⁾を参照した計算結果である。No.1 で計算値と実験結果を比較すると、実験結果の方が低く、加熱後 60 分では約 60℃低い結果であった。No.4 では、加熱後 60 分で約 450℃、最高温度は 480℃(加熱後 66 分)であった。No.4 の計算結果は、加熱後 60 分までは、実験結果を良く評価できていた。

2.2.3 たわみ挙動

No.1～No.3 の 72 分時点、崩壊時のたわみおよび崩壊時間を表- 3 に示す。72 分時点のたわみは、No.3 で 142mm, No.1 と No.2 は 66～69mm であった。No.3 では、No.1 と No.2 の約 2 倍のたわみ量であった。

全計測結果の一例として No.1 の変位と時間の関係を図- 5 に、変位分布を図- 6 に示す。図- 5 では、加熱開始時点を 0 とし、加熱炉へのたわみをプラスとして表示している。梁中央で計測した D3 のたわみが最も大きく、崩壊時(加熱開始 92 分後)では 234mm であった。加熱開始 82～92 分にかけて、著しくたわみが増加した。この時の鋼材の下フランジ温度は約 500℃であった。たわみ速度も同様に加熱開始 80 分以降にて急激に勾配が上昇し、85 分到達時点で限界たわみ速度(12.84mm/min)に到達した。また、加熱開始 40～60 分にかけてたわみ速度が 2.5 mm/min まで増加し、その後停滞する挙動を示した。図- 6 より、崩壊に至るまで、均等に载荷できていた。

No.4 の鉛直変位と時間の関係を図-7 に示した。加熱開始 60 分後の試験体中央位置での変位は約 30mm であった。加熱終了 30 分後(加熱開始 90 分後)頃に変位はピークに達し、36.1mm であった。No.4 の変位分布を図-8 に示す。試験終了まで左右均等に载荷ができており、3 時間の放冷後の試験体残留たわみは 21mm であった。たわみ速度は加熱開始直後より増大し始め、最大で 1.25mm/min であった。たわみ量と限界たわみ速度が限界値よりも小さく、試験中に荷重支持能力が低下が生じなかったことから 1 時間の耐火性能を有することが分かった。

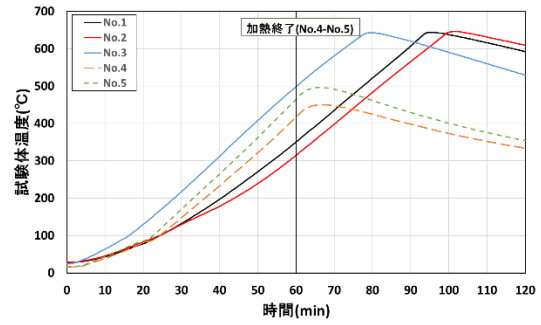


図- 3 最高温度履歴比較(No.1～No.5)

Fig.3 Comparison of maximum steel temperatures (No.1～No.5)

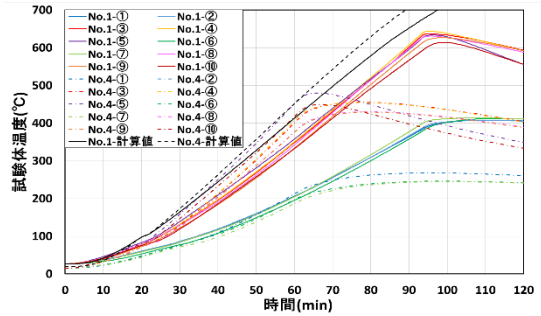


図- 4 温度履歴比較(No.1 および No.4)

Fig.4 Comparison of steel temperature (No.1, No.4)

表- 3 崩壊時間と中央位置のたわみ

Table 3 Collapsed time and center deflection

試験体名	崩壊時間 [min]	中央位置 たわみ (72分時点) [mm]	崩壊時の 中央位置 たわみ [mm]
No.1	92	69	234
No.2	99	66	221
No.3	77	142	242

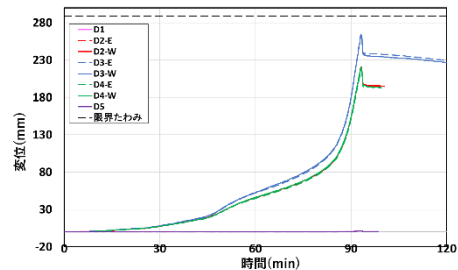


図- 5 変位-時間関係(No.1)

Fig.5 Relationship between displacement and time (No.1)

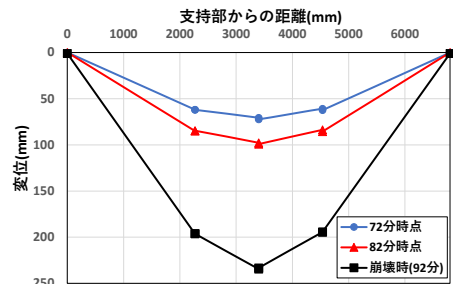


図- 6 変位分布図(No.1)

Fig.6 Displacement Distribution(No.1)

No.1～No.5 の梁中央たわみ-時間関係の比較を図-9 に示す。ここでのたわみは、東西(D3-E, D3-W)で計測した値の平均とした。セメント・ゼロ材の配合割合と被覆厚さの異なる No.1～No.3 を比較すると、No.3 がたわみの増大が最も早く、崩壊時間も 77 分と最も早かった。セメント・ゼロ材の配合のみが異なる No.1 と No.2 を比較すると、加熱開始 40 分まではほぼ同様のたわみ挙動を示したが、40 分以降は No.1 のたわみが No.2 に比べて増加し、No.1 の方が早く崩壊した。また、No.1 (被覆厚さ 25 mm) に対して吹付 RW のかさ密度を上げたとしても、被覆厚さを 20 mm にした No.3 では、崩壊時間は No.1 より短い結果となった。吹付 RW に含まれるセメント・ゼロ材の絶対量を増加させても、適切な吹付厚さが確保されないと耐火性能が十分に発揮されないということが分かった。

No.4 と No.5 は同様のたわみ挙動を示しており、同一条件化における再現性を確認することができた。セメント・ゼロ材とロックウールの重量比が同一である No.1 と No.4 を比較すると、No.1 の加熱 60 分時点におけるたわみは、No.4 の 1.6 倍であった。

No.1～No.5 のたわみ速度の比較を図-10 に示す。黒の点線は No.1～No.3 の限界たわみ速度を示し、赤の点線は No.4～No.5 の限界たわみ速度を示す。ケース 2 (No.4～No.5)での最大たわみ速度は、最大許容たわみ速度の 0.17 倍であった。崩壊まで载荷を行ったケース 1 (No.1～No.3)においても、限界たわみ速度を超えても荷重を支持していた。ケース 1 において、たわみ速度が急激に増大し始める時間は No.1 で約 90 分、No.2 で約 80 分、No.3 で約 60 分であった。その時の鋼材温度は、No.1～No.3 でほぼ同じで、約 500℃であった。

3. 鋼管柱の载荷加熱試験

3.1 試験計画

3.1.1 試験体

試験体一覧を表- 4 に示す。ケース 1 と 2 は梁試験体と同様に加熱時間で区分する。

表- 4 柱試験体一覧
Table 4 Experimental conditions of column

Case	試験体名	加熱時間	鋼材寸法 [mm]	重量比[%]		スラリー 濃度[%]	かさ密度 [g/cm ³]	吹付RW 被覆厚さ [mm]	吹付RW 含水率 [%]
				ロック ウール	セメント ・ゼロ材				
ケース 1	No.6	崩壊まで 加熱	□-300×300 ×9	60	40	33.3	0.29	25	2.0
ケース 2	No.7	一時間 加熱	□-300×300 ×9						

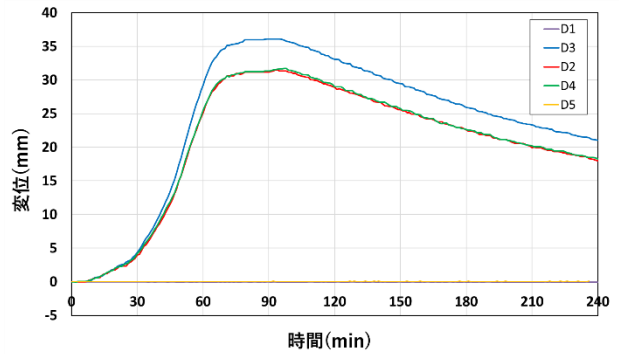


図-7 変位-時間関係(No.4)

Fig.7 Relationship between displacement and time (No.4)

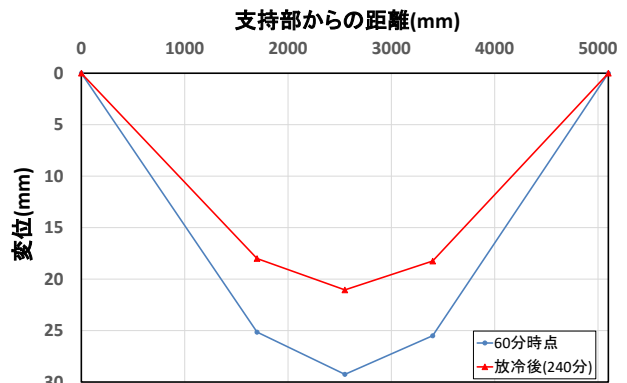


図-8 変位分布図(No.4)

Fig.8 Displacement distribution(No.4)

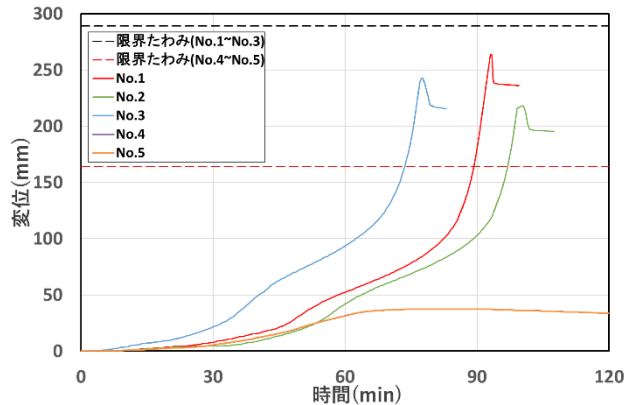


図-9 たわみ-時間関係比較

Fig.9 Comparison of deflection

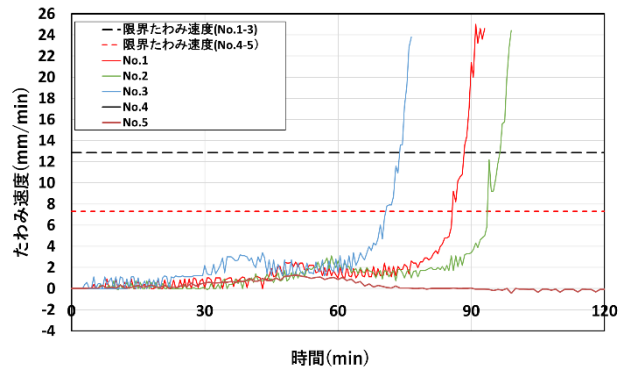


図-10 中央位置のたわみ速度比較

Fig.10 Comparison of Deflection velocity at center

ケース 1 の試験体数は 1 体とした。ロックウールとセメント・ゼロ材の重量比は、60%と 40%とした。試験体の被覆厚さは 25mm とし、セメントスラリーは 33.3% とした。実験時の環境配慮型吹付 RW の含水率は、2.0%であった。試験体形状を図-11 (a)~(c)に示す。試験体は、 \square -300 \times 300 \times 9(L=4500mm)、鋼種は STKR490 とした。

ケース 2 の試験体数は、同一条件で 2 体とした。ケース 2 では、放冷時の亀裂や脱落の有無を確認する事が目的である。試験体寸法は \square -300 \times 300 \times 9 (L=3300mm)、鋼種はSTKR490とした。ロックウールとセメント・ゼロ材の重量比はケース 1 と同様 60%と 40%とした。

3.1.2 载荷加熱・計測方法

ケース 1 のセットアップ状況を図-12 に示す。柱試験体の载荷荷重は長期許容荷重とし、ケース 1 では 1973kN、ケース 2 では 2089kN とした。ケース 1 の载荷加熱試験では、ISO834 の標準加熱曲線に準拠して実施し、ISO に示されている限界軸方向収縮量(45mm)、あるいは、限界軸方向収縮速度(13.5mm/min)に到達する、もしくは荷重支持能力を喪失するまで加熱を継続した。

ケース 2 では、1 時間で加熱を終了し、所定荷重を载荷したまま 3 時間放冷を実施した。

熱電対設置位置を図-11 (c)に示す。温度計測断面は、加熱範囲の中央として、1 断面あたり 8 点とした。変位は、試験装置上部の 4 点で計測した。

3.2 鋼管柱の载荷加熱試験結果

3.2.1 実験後の試験体状況

No.6 および No.7 の载荷加熱実験後の試験体状況を写真-2(a)~(b)に示す。No.6 では崩壊時まで、No.7 および No.8 では 1 時間加熱後の放冷 3 時間まで、環境配慮型吹付 RW の亀裂や脱落は生じなかった。写真-2(c)に、No.6 実験後の鋼材の様子を示す。ここでは試験体が载荷荷重の 90%を支持できなくなった時点を崩壊時間と定義する。No.6 試験体は加熱開始 101 分後に崩壊した。崩壊まで载荷した No.6 では、長さ方向の中央付近で局部座屈が生じた。

3.2.2 温度履歴

No.6 試験体の鋼材温度履歴を図-13 に示す。加熱後 72 分時点では、No.6 の鋼材温度は 400℃であった。崩壊時の鋼材最高温度は 597℃、崩壊時の鋼材平均温度 587℃であった。全試験体での鋼材最高温度の比較を図-14 に示す。No.7 では、加熱後 60 分で鋼管温度は、296℃、最高温度は 341℃(加熱後 87 分)であった。No.8 では、加熱後 60 分で 306℃、最高温度は 346℃(加熱後

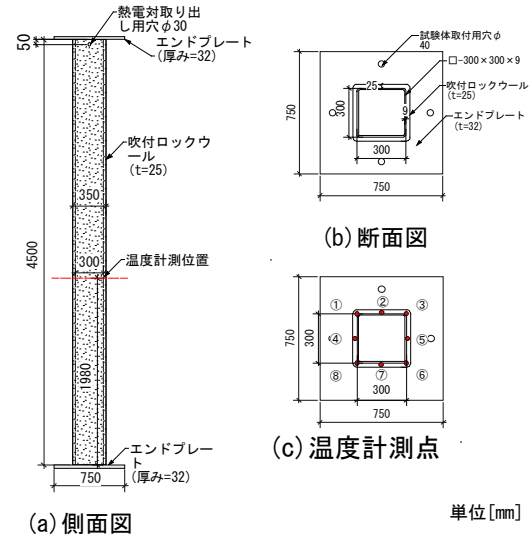


図-11 柱試験体図(ケース 1)

Fig.11 Configuration of column specimen(Case1)

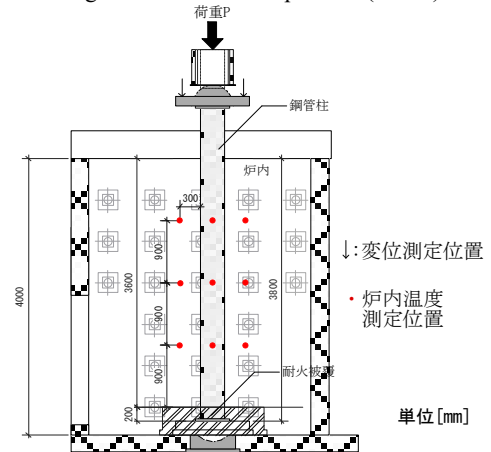
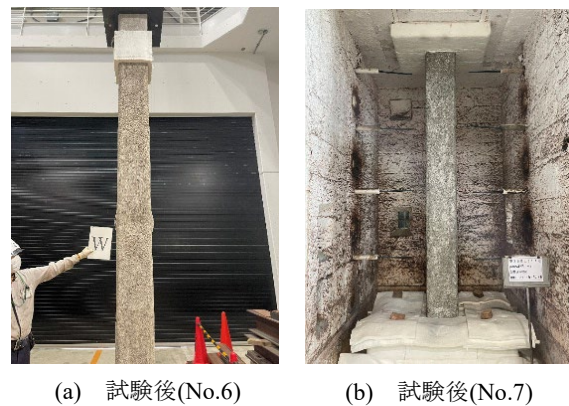


図-12 セットアップ状況(ケース 1)

Fig.12 Test setup of column specimen (Case1)



(a) 試験後(No.6)

(b) 試験後(No.7)



(c) 鋼材の様子(No.6)

写真-2 試験後(No.6, No.7)

Photo.2 Specimen after test (No.6, No.7)

参考文献

- 1) 大脇英司ら：混和材を大量に使用したコンクリートと事例，コンクリート工学，Vol.57，No.1，pp.71-74，2019.1
- 2) 吉田泰ら：セメントを使用しない環境配慮コンクリートの基礎物性に関する実験的検討（その1～その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.633-638，2023.8
- 3) 日本建築学会：鋼構造耐火設計指針，2008.3

86分)であった。No.7とNo.8の温度履歴は同様な挙動を示し、再現性を確認することができた。No.6の崩壊時温度とNo.7～8の最高温度を比較すると、No.7～8の最高温度の方が約250℃程低くなった。

3.2.3 変位履歴

No.6～No.8試験体の軸方向収縮量の履歴を図-15に示す。ここでの変位は4点で計測した変位の平均値とした。収縮を正，膨張を負の値で示す。No.6試験体では崩壊時で19.5mm，No.7～No.8試験体では最高で11.7mm軸方向に熱膨張した。崩壊まで载荷したNo.6試験体では，加熱開始90分後から収縮に転じはじめ，90分以降急速に収縮し，101分で崩壊に至った。No.7～No.8試験体は加熱終了した直後も緩やかに膨張し続け，加熱開始87分後にピークに到達した後，緩やかに収縮する傾向を示した。No.7とNo.8において試験中に荷重支持能力が低下が生じないことを確認した。

No.6～No.8試験体の軸方向収縮速度の比較を図-16に示す。No.6試験体では加熱開始90分後から収縮速度が著しく増加し始める傾向を示した。No.7～No.8試験体の軸方向収縮量は最大で0.065mmであった。限界軸変形収縮速度(9.9mm/min)以下であることから，柱試験体においても1時間の耐火性能を確認した。

4. まとめ

本報告では，環境配慮型吹付RWで被覆した鉄骨柱および梁の耐火性能に関して，2ケースの加熱条件で検討し，温度履歴およびたわみ挙動を把握した。環境配慮型吹付RWの被覆厚さを25mmとすることで，鋼管柱・鉄骨梁ともに1時間の耐火性能を有することを確認した。

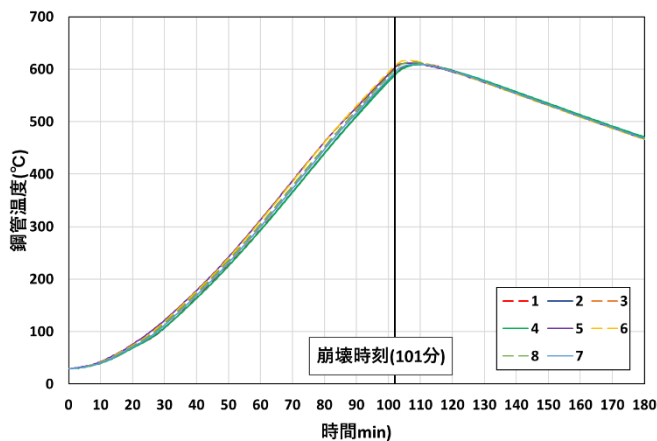


図-13 温度履歴(No.6)

Fig.13 Column temperature time (No.6)

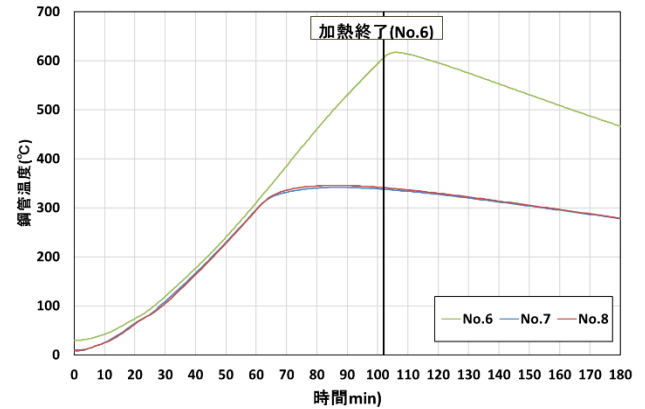


図-14 最高温度履歴比較(No.6~No.8)

Fig.14 Comparison of maximum temperatures (No.6~No.8)

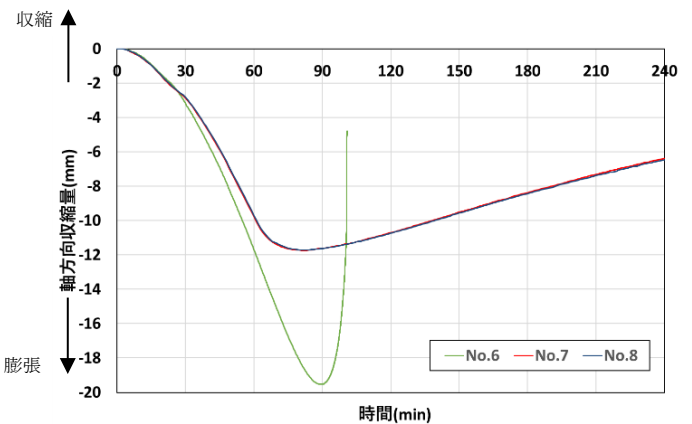


図-15 変位比較(No.6~No.8)

Fig.15 Comparison of deflection(No.6~No.8)

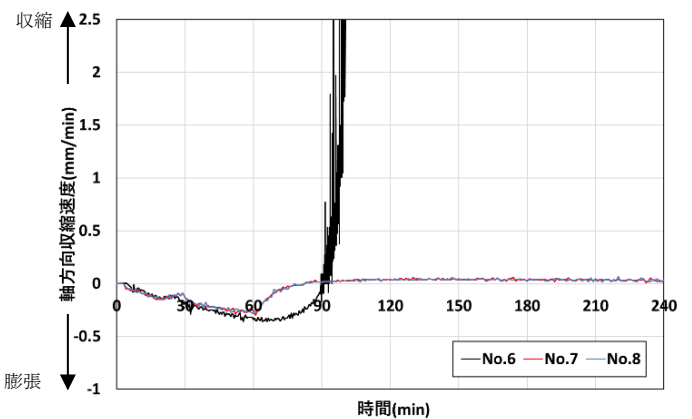


図-16 中央位置の変位速度比較

Fig.16 Comparison of deflection velocity at center (No.6~No.8)