

木材で耐火被覆した鋼管柱の耐火性能

T-WOOD® TAIKA の開発

馬場 重彰*¹・加藤 圭*²・梅森 浩*³

Keywords : glued laminated timber, steel column, fire resistance performance, buckling, fire-resistance test under load

集成材, 鋼管柱, 耐火性能, 座屈, 載荷加熱試験

1. はじめに

低炭素社会の実現, 国内林業の活性化および健全な森林の育成のために国産木材の利用が促進されており, 木材を建築構造物に利用することで, 木材の需要拡大に大きく貢献できる。また, 「脱炭素社会の実現に資するための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が改正され, 公共建築物に加え民間の一般建築物にも本法律の対象が拡大されたことにより, 木材の更なる利用拡大が期待される。

このような背景の中, 木材を建築構造物に利用する技術として, 鋼材と木材を組み合わせる部材が開発されている。「耐火構造」部材を中心として, 鉄骨部材に木材を被覆する工法^{例えば, 1)}, 薬剤含浸処理した単板積層材(LVL)を被覆材に使用する工法²⁾, コンクリート充填鋼管構造柱の熱容量を活用して木材により耐火被覆をする工法³⁾などが開発されている。

筆者らは鋼管柱に木材を利用する技術として, ①木材による座屈補剛効果を備えたハイブリッド鋼管柱(以降, ハイブリッド鋼管柱), ②木材による簡易施工可能な準耐火構造鋼管柱(以降, 準耐火鋼管柱)を開発した。

ハイブリッド鋼管柱は, 角形鋼管の外周に耐火被覆(けい酸カルシウム板), 更にその外周に集成材を設置する断面形状である。集成材には常温時における座屈補剛効果を期待しており, 鋼管柱の長期許容荷重を増大する事ができる。火災時には燃え代層として鋼管温度の上昇を抑制する役割もある。ハイブリッド鋼管柱の耐火性能を文献 4) で報告しているが, 今回, 鋼管サイズのバリエーションを増やすために試験を実施した。

また, 準耐火鋼管柱は, 木材に接着剤等を使用せずに木板をビスのみで簡易に施工できる工法である。

本法では, ハイブリッド鋼管柱および準耐火鋼管柱の載荷加熱実験結果を記述する。

2. ハイブリッド鋼管柱の耐火性能

2.1 試験計画

2.1.1 試験体

ハイブリッド鋼管柱の試験体一覧を表-1 に示す。試験変数は細長比であり(41.9~119), 試験体数は4体である。

試験体の断面形状を図-1 に示す。試験体断面は, 軸部に□75mm×6mm, □125mm×6mm, □200mm×6mm, □200mm×12mmの角形鋼管(長さ3300mm)を使用し, その4周に厚さ20mmのけい酸カルシウム板, 更にその外周を集成材(厚さ57.5mm)で覆っている。集成材の樹種はスギ(E65-F225)を用い, 4枚の木板はレゾルシノール樹脂系接着剤で二次接着して一体化した。試験時の木材の含水率は10.1%, けい酸カルシウム板は3.8%であった。鋼材温度測定のため, 熱電対を設置した。1断面につき8箇所, 試験体高さ方向には, □75×6では1断面, □125×6では2断面, □200では3断面に設置した。

2.1.2 載荷加熱・計測方法

載荷加熱試験では, 試験体の柱頭および柱脚に球座を設置し, 所定の荷重を載荷後, ISO834の標準加熱曲線に準拠した加熱を1時間実施した。加熱終了後, 木材の炎の消失が確認できるまで載荷を継続した。

試験体の集成材の樹種はスギであるが, ヒノキ(E95-

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室
* 2 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室
* 3 設計本部 先端デザイン部

F270)の曲げ剛性を採用した鋼管の細長比から算出した長期許容応力度に断面積を乗じて、載荷荷重を算出した⁴⁾。□75×6試験体および□200×6試験体での細長比と許容応力度の関係を図-2～図-3に示す。□75×6試験体では、鋼管単独の細長比は119.9，集成材の座屈補剛効果を考慮したハイブリッド鋼管柱の細長比は42.7，長期許容応力度は187N/mm²であるので、鋼管単独の長期許容応力度の2.84倍となる。また、□200×6試験体では、鋼管単独に対するハイブリッド鋼管柱の比率は1.09であり、鋼管サイズの小さい方が、座屈補剛効果の大きい事が分かる。

なお、□75×6試験体でのハイブリッド鋼管柱の長期許容応力度は、鋼管単独の短期許容応力度を超えているため、ハイブリッド鋼管柱(□75×6)の長期許容応力度は、鋼管単独柱の短期許容応力度を上限とした。

表-1 HB 鋼管柱の試験体一覧

Table 1 List of specimens (HB column specimens)

試験体名	鋼管柱					ハイブリッド柱		
	外形 [mm]	鋼管厚 [mm]	材質	細長比	長期許容 応力度 [N/mm ²]	細長比	長期許容 応力度 [N/mm ²]	長期許容 応力度の割増率
□75×6	75	6	STK490	119.0	65.9	42.7	98.9	1.50
□125×6	125	6	STKR400	68.5	119.8	35.9	145.2	1.21
□200×6	200	6	STKR400	41.9	141.3	27.1	150.1	1.06
□200×12	200	12	STKR490	43.5	185.8	32.5	198.9	1.07

2.2 実験結果

2.2.1 温度・軸方向変位結果

炉内温度結果を図-4に示す。加熱1時間後では集成材は脱落しなかった。加熱開始後、約90分後から炭化した集成材が炉内で燃焼したため、炉内温度は上昇した。炉内の温度上昇は、□75試験体より集成材量の多い□200試験体で大きくなった。また、全試験体とも、加熱開始後240分計測後に除荷した。

鋼管表面の最高温度結果を図-5に示す。板厚6mmの試験体では、加熱後60分頃から100℃の温度停滞が発生し、加熱後100分頃より再び温度上昇した。また、□200×6試験体の鋼管最高温度は□75×6および□125×6試験体より高くなった。これは、上述の炉内温度の影響のためである。板厚が12mmの□200×12試験体では、100℃の停滞が明瞭には現れなかった。最高温度は、□200×6試験体がもっとも高く、□200×12試験体が最も低い結果となった。鋼管温度は、加熱開始後200分～210分にピークに達し、その後は下がった。

軸方向変位結果を図-6に示す。鋼管柱は膨張(伸び)

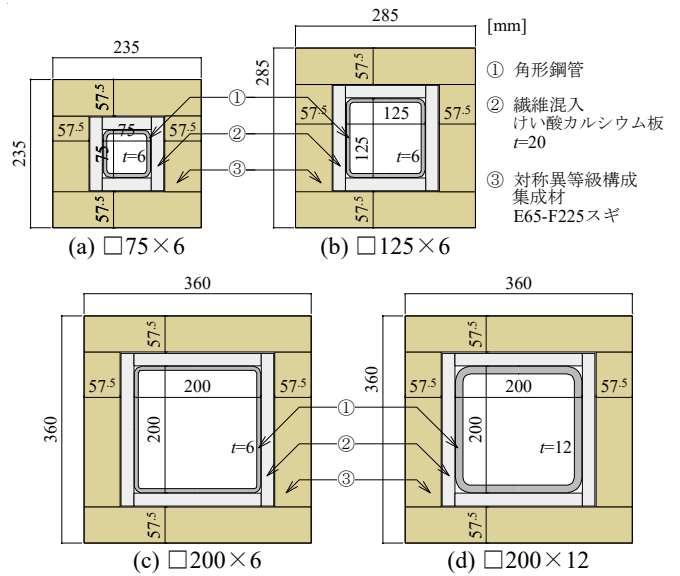


図-1 ハイブリッド鋼管柱試験体の断面形状

Fig.1 Cross section of specimens (hybrid column specimens)

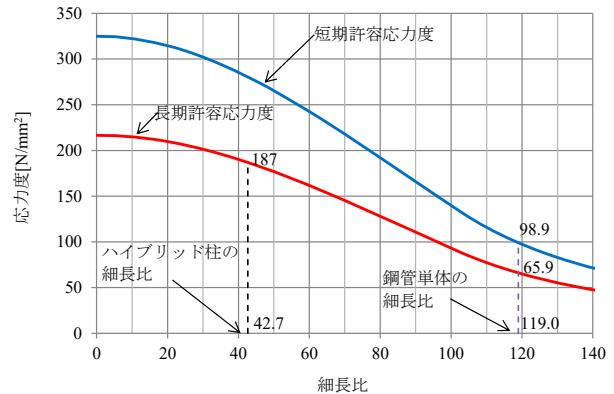


図-2 許容応力度と細長比の関係 (□75×6試験体)

Fig.2 Buckling curve of specimens (□75×6 specimen)

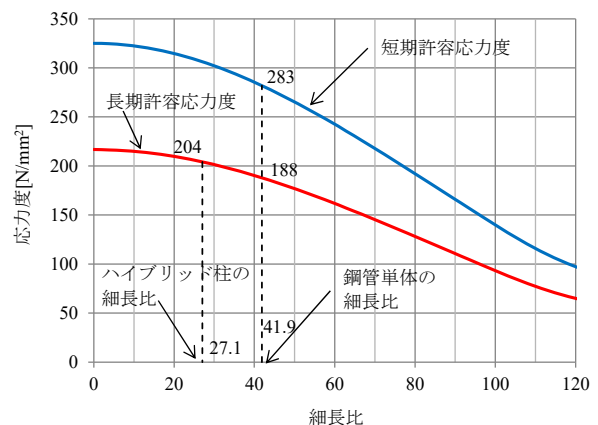


図-3 許容応力度と細長比の関係 (□200×6試験体)

Fig.3 Buckling curve of specimens (□200×6 specimen)

を示し、鋼管温度とほぼ同様の傾向を示した。板厚6mmの試験体では、加熱後60分頃から伸び量が停滞し、100分頃から再び伸びを示した。軸方向変位も、加熱開始後200分～210分にピークに達し、その後、収縮に転じた。

実験前後の□200×6 試験体の状況を写真-1 に示す。加熱 100 分頃より集成材が脱落し、試験体の柱脚で燃焼していた。燃え尽きによる消炎を確認した上で載荷荷重を除荷し、実験を終了した。実験後の試験体は、集成材は全て脱落し、けい酸カルシウム板が露出していた。けい酸カルシウム板で、耐火性能に影響を及ぼすような目地開きなどは確認されなかった。これらの状況は、全試験体で同じ状況であった。



(a) 実験前 (b) 実験後

写真-1 実験前・後の試験体 (□200×6 試験体)
Photo.1 HB column specimen (□200×6 specimen)

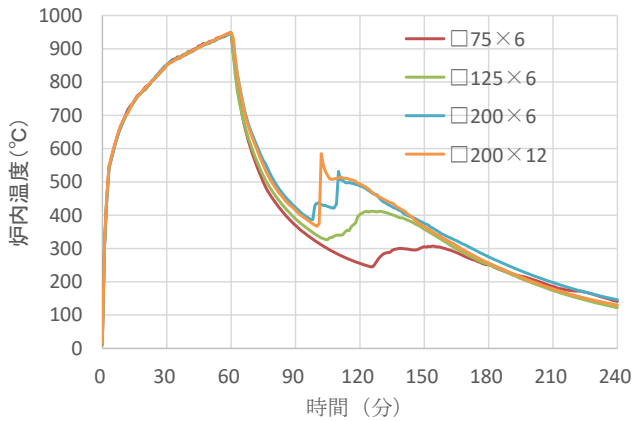


図-4 炉内温度結果

Fig.4 Furnace temperatures of specimens (hybrid columns)

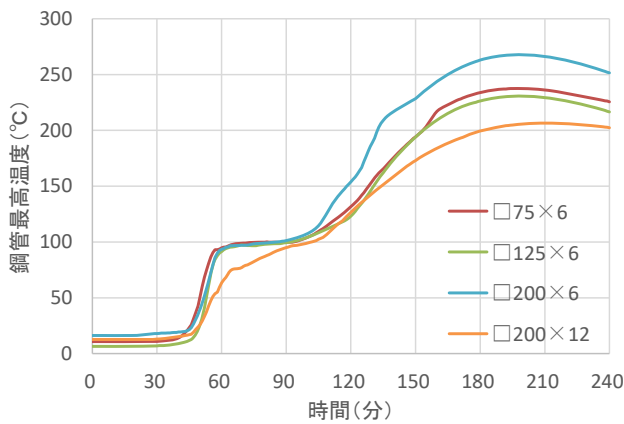


図-5 鋼管温度結果

Fig.5 Steel pipe temperatures of specimens (hybrid columns)

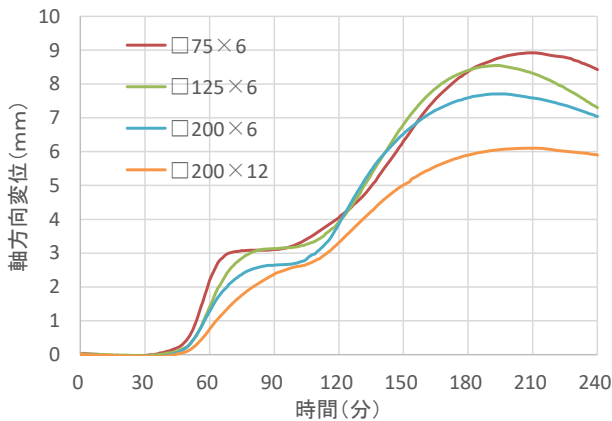


図-6 軸方向変位結果

Fig.6 Displacement results of specimens (hybrid columns)

2.2.2 ハイブリッド鋼管柱の座屈温度の検討

鋼管柱の座屈温度について検討する。試験体の崩壊時には、集成材は脱落しており座屈補剛効果は見込めない。よって、鋼管柱単独で載荷荷重に抵抗する事となる。そこで、文献 4)と同様に、接線係数理論により、座屈が生じる弾性係数または接線係数を求め、座屈破壊温度を検討した。鋼構造耐火設計指針⁵⁾に示されている応力度とひずみの関係に基づき計算した結果を表-2 に示す。座屈破壊温度は、□75×6 試験体で 416℃、□125×6 および□200 試験体では約 300℃～310℃あったが、試験体の最高温度は 207℃～268℃であった。

表-2 ハイブリッド柱の試験結果一覧

Table 2 Test results of specimens (hybrid column specimens)

試験体名	座屈が生じる弾性係数 もしくは接線係数 [N/mm ²]	接線係数理論から求めた 座屈破壊温度 [°C]	実験での最高温度 [°C]
□75×6	141,903	416	238
□125×6	69,032	309	231
□200×6	26,700	299	268
□200×12	38,134	310	207

3. 準耐火鋼管柱の耐火性能

3.1 試験計画

準耐火鋼管柱の試験体一覧を表-3 に示す。試験変数

は鋼管サイズである。鋼管サイズごとに各2体、試験体数は計4体とした。

試験体の形状寸法を図-7に示す。角形鋼管は□300×300×6 (STKR490), □650×650×16 (SN490B)とした。木板(被覆材)はスギ(E65-F225)のラミナをイソシアネート系接着剤で貼り合わせた厚さ36mmの集材材とした。厚さ12mmのプレートを鋼管柱に溶接し、そのプレートにC-60×30×10×1.6の野縁ピースを点溶接し、この野縁ピースに木板をビスで留めつけた。鋼管柱表面と木板との距離は42mmとした。また、木板同士も接着剤を使用せずにビスのみで留め付け、木板接合部(出隅部)には同じ木材樹種で裏打材を設置した。試験体の高さ方向には、木板を2分割して試験体中央に横目地を設け、横目地位置にも同じ樹種の裏打材を設置した。

試験時の木材の含水率は、□300試験体で平均6.7%, □650試験体で平均7.2%であった。鋼管柱の温度測定のため、同一断面で計8ヶ所、試験体高さ方向3断面に熱電対を設置した。温度測定断面位置は、水平目地位置(断面②)および断面②から上下に750mmずらした位置とした(上側を断面①, 下側を断面③)。

荷重加熱試験では、試験体の柱頭および柱脚に球座を設置して所定の荷重を載荷後、その荷重を保持した状態でISO834標準加熱曲線に準拠した加熱を実施した。試験体が載荷荷重を支持できなくなるまで、加熱を継続した。

3.2 実験結果

実験結果を表-4に示す。荷重支持能力を喪失した崩壊時間は48分~54分、崩壊時の最高温度は632℃~712℃であった。実験後の鋼管柱試験体を観察すると、柱頭に局部座屈を確認できた。

炉内温度結果を図-8に示す。木板の燃焼により、全試験体とも加熱開始後5分頃から標準加熱曲線より炉内温度は高いが、概ね加熱終了まで炉内温度を制御できていた。

鋼管柱試験体の断面①での平均温度結果を図-9に示す。□300試験体では加熱開始42分頃、□650試験体では加熱後38分頃から鋼管温度が急激に上昇した。これは、高温によりラミナ間の接着力が弱くなったためにラミナが脱落し、鋼管柱の表面が直接高温に曝される状況となったためである。木板(ラミナ)脱落前の鋼管温度は100℃以下であったが、木板脱落后から鋼管柱温度は急激に上昇し、550℃~600℃程度で試験体は崩壊した。□650試験体は□300試験体より木板の脱落が数分早かったため、温度上昇が早くなった。また、

表-3 準耐火鋼管柱の試験体一覧
Table 3 List of specimens (QF column specimens)

試験体名	鋼管柱					
	外形 [mm]	鋼管厚 [mm]	鋼種	細長比	長期許容 応力度 [N/mm ²]	載荷荷重 [kN]
□300-1	□300×300	6	STKR490	29.7	201.7	2,072
□300-2						
□650-1	□650×650	16	SN490B	13.7	213.4	8,378
□650-2						

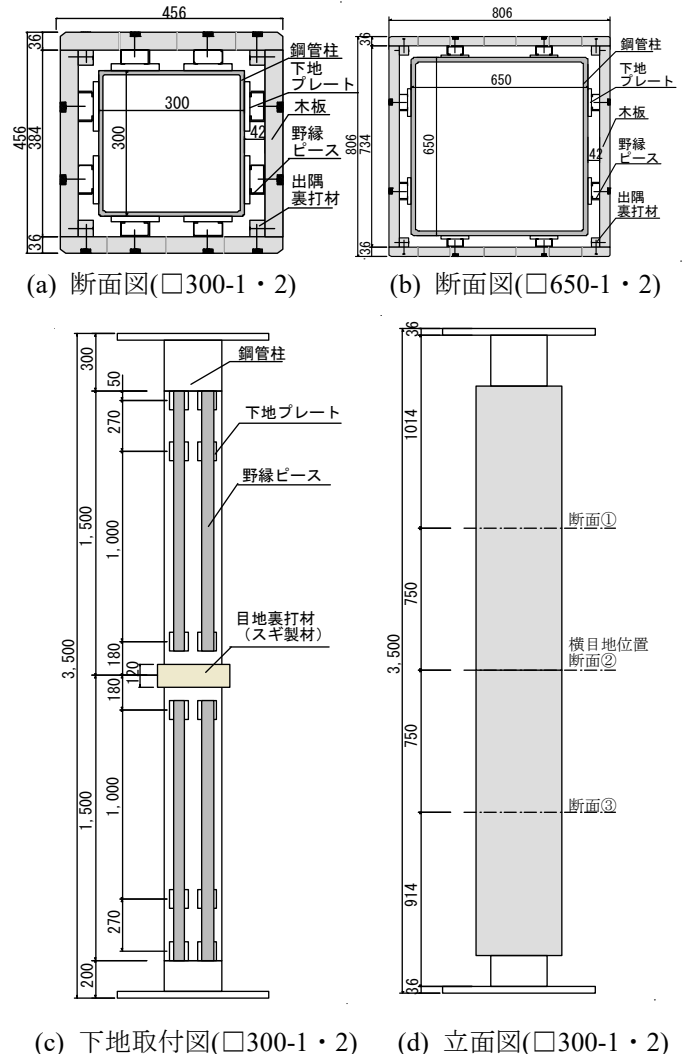


図-7 準耐火鋼管柱試験体の断面形状
Fig.7 Cross section of specimens (QF column specimens)

水平目地位置(断面②)での鋼管平均温度は223℃~316℃であり、断面①の温度より低い結果となった。

軸方向変位結果を図-10に示す。加熱開始後、試験体は熱膨張により伸び、鋼管温度と同様に、加熱開始後約40分以降に急激に熱膨張し、崩壊直前に収縮へと転じて荷重支持能力を喪失した。

実験前後の試験体(□300-1)の状況を写真-2に示す。

実験後、ほとんどの集成材は脱落しており、鋼管柱試験体の柱頭で局部座屈を生じていた。この試験体状況は全ての試験体で同様であった。



(a) 実験前の試験体 (b) 実験後の試験体

写真-2 実験前・後の試験体 (□300-1 試験体)
Photo.2 QF column specimen (□300-1 specimen)

4. まとめ

木材の利用促進を目的に、鋼管柱と木材を組み合わせる工法を開発し、耐火性能を確認した。その結果、ハイブリッド鋼管柱に関しては1時間の耐火性能を、簡易に施工した木板被覆鋼管柱では45分間の準耐火構造を有する被覆仕様を把握した。

今後、本技術を更に実建物へ実施適用するとともに、木材の更なる有効利用に対する様々な要求に応え、脱炭素社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 遊佐秀逸・増田秀昭・川合孝明・大貫寿文・上杉三郎・並木勝義：木質系構造の耐火性能に関する研究 その1 耐火構造の実験的確認方法，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2，pp.325-328，2003.9
- 2) 朴智秀・安井昇・藤田和彦・亀岡祐史・小宮祐人・李元羽・成田敏基：難燃薬剤処理 LVL を被覆材とした耐火構造柱の検討 その4 鉄骨造の耐火構造柱，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.283-284，2017.8
- 3) 蛇石貴宏・花井厚周・西村俊彦・青木慧：2時間耐火性能を有する木被覆 CFT 柱に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.211-212，2022.9
- 4) 道越真太郎・加藤雅樹・加藤圭・森田仁彦・坂口裕美・梅森浩・島村高平：角形鋼管を集成材で補剛したハイブリッド部材の耐火性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.309-310，2018.9
- 5) 日本建築学会：鋼構造耐火設計指針，2017

表-4 準耐火鋼管柱の試験結果一覧

Table 4 Test results of specimens (QF column specimens)

試験体名	崩壊時間 [分]	崩壊時の鋼管温度			
		最高温度 [°C]	断面① [°C]	断面② [°C]	断面③ [°C]
□300-1	54.83	687	581	223	160
□300-2	52.17	712	622	232	166
□650-1	49.17	676	552	278	384
□650-2	48.00	632	554	316	472

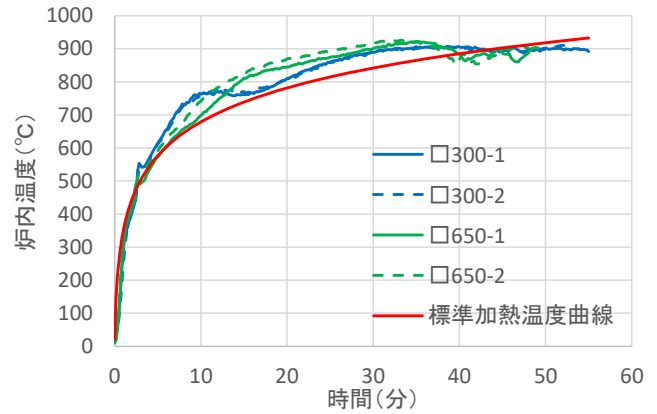


図-8 炉内温度結果

Fig.8 Furnace temperatures of specimens (QF specimens)

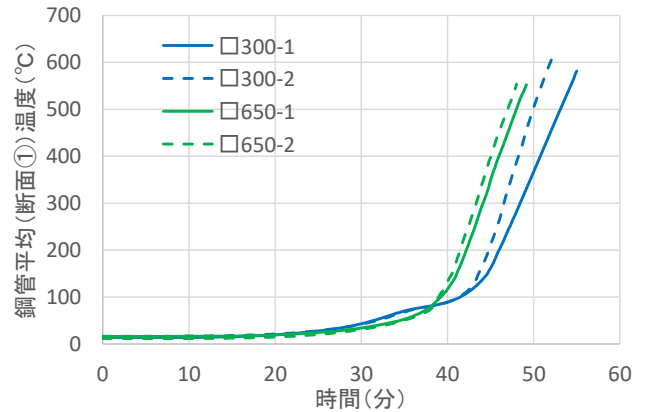


図-9 鋼管温度結果 (準耐火鋼管柱)

Fig.9 Steel pipe temperatures of specimens (QF columns)

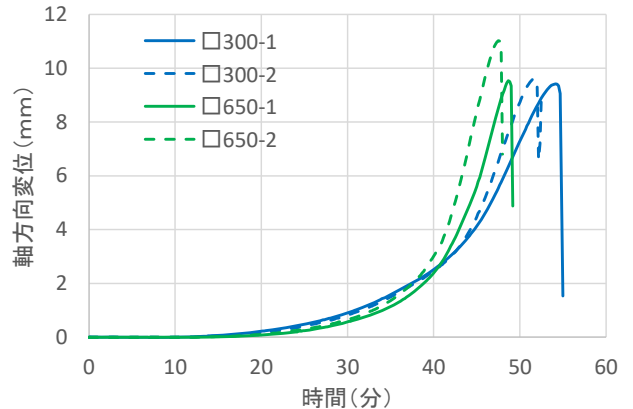


図-10 軸方向変位結果 (準耐火鋼管柱)

Fig.10 Displacement results of specimens (QF columns)