

平成30年度 林業成長産業化総合対策補助金等
(平成30年度木材産業・木造建築活性化対策のうち非住宅分野を中心とした
無垢構造材等利用拡大事業のうち CLT 等新たな
木質建築部材利用促進・定着事業)

難燃薬剤処理 LVL を被覆材とした

2 時間耐火柱開発

実績報告書

平成31年3月

一般社団法人全国 LVL 協会

1. はじめに

2000年の建築基準法改正から2005年に耐火建築物としての都市木造が登場以降、木質系耐火部材の大臣認定取得により、数多くの都市木造が実現されてきた。都市木造実現から10年以上が経過し、一般被覆型、鋼材内蔵型、燃えどまり型の木質系耐火部材は、初期の認定仕様から実物件の現場での課題を反映して、防耐火性能だけでなく、施工性、意匠性を考慮した改良がすすめられている。

LVLを用いた木質系耐火部材では、基礎的な研究開発として単板への薬剤含侵処理による準不燃材料の実現に成功しており、この技術を応用した木質系耐火部材の開発を行ってきた。また、これからの木質系耐火部材開発においては、既存の技術との違いを明確にした開発目標が重要なため、本研究では、既存の木質系耐火建築に用いられてきた部材の特徴・課題を踏まえ、以下の特徴をもつ木質系耐火部材を目指すものとしている。

- ・木質系材料のみの構成による耐火部材

既存の木質系耐火部材は、せっこうボードなどの無機材料を被覆層として用い、その上に、仕上げ材として木質材料を付加することが多い。しかし、木造建築では、無機材料や鋼材を用いない木質系耐火部材が期待されている。

木質系材料による被覆は、被覆層の厚みによっては将来的に、火災後の鉛直荷重支持以外の構造機能を付加することが可能である。

- ・現場施工による新設・交換可能な燃えしろ・燃えどまり層

被覆材が仕上げ材を兼ねるため、施工時の養生に手間がかかるほか、施工時の損傷、汚れに対して修復が困難であった。また、火災後の建物の修復においても交換可能な耐火被覆となる。

- ・鉄骨造の耐火被覆として使用可能な木質系被覆材

内部の木材の耐火性能を満足できるのであれば、ほぼ同一の仕様で鉄骨造の耐火被覆材としても使用が可能である。

- ・仕上げ材として特徴のある耐火部材

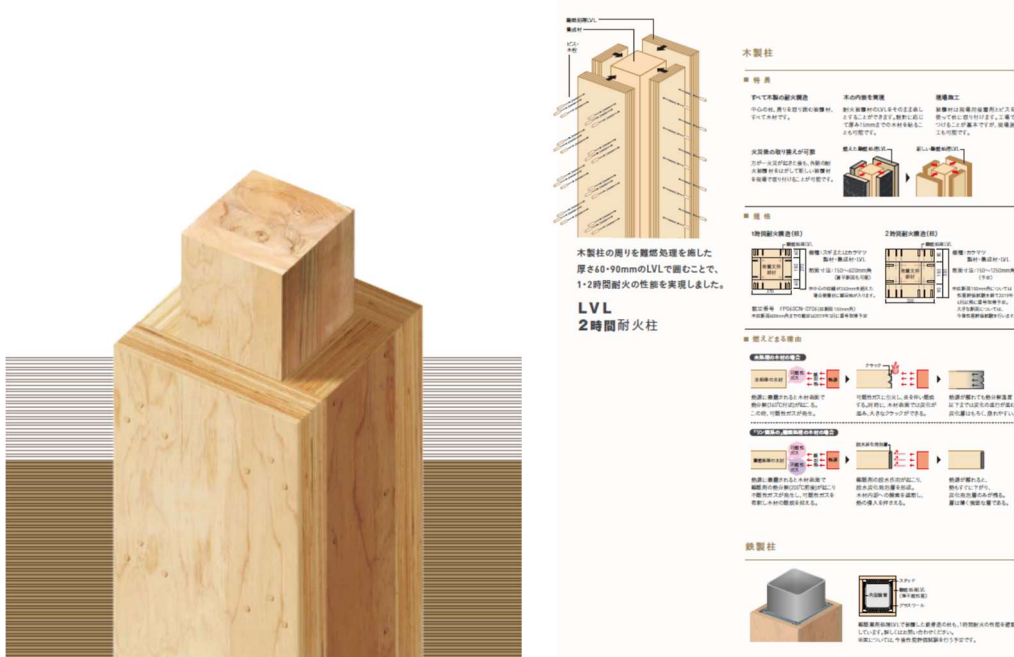
LVLは、通常の板目面を仕上げ面とするだけでなく、製造によって生まれる特徴的な積層面を仕上げ面とすることができる。積層面を仕上げ面とする内装材としては、準不燃材料として既に実用化されており多くの建築で用いられるようになっている。

本研究では、木造の柱、梁の線材が中心であるが、被覆材の基本性能、部材の断面構成による弱点になりやすい箇所が整理されれば、今後さまざまな部位への適用も可能である。特に、柱・梁の線材と壁・床の面材の両方が実現可能なLVLでは、面材への適用も期待される。現在は、燃えしろ設計を用いてLVLの壁をあらわしで用いる準耐火建築にとどまるが、今後、LVLの特徴的な意匠性を生かした耐火建築物の実現につながることを期待している。

2. 開発した耐火部材

2. 1. 検討した耐火構造の仕様について

本事業では、2時間耐火構造（柱）の大臣認定取得を目標として、仕様を検討した。図 2.1 に検討した耐火柱のイメージを、表 2.1 に検討した耐火構造の仕様一覧を示した。2018年7月に建築研究所の水平炉にて、4種類の仕様を2時間耐火構造の仕様を検討した。その結果、難燃薬剤処理 LVL を 90mm と無処理 30mm を組み合わせた仕様が一番候補となった。防火的な性能、施工の面から委員会で仕様を検討した結果、厚みが約 30mm の被覆材を 4 枚合わせとした仕様とした。荷重支持部材の樹種は当初スギを想定していたが、現状、非住宅案件で使用されることが多い、標準で得られる強度等級区分がスギより高いカラマツを想定することとした。9月に大阪の日本建築総合試験所の柱炉で、被覆材を 4 枚合わせ（実厚 126mm）の被覆仕様とした柱の耐火試験を行った。結果は2時間耐火構造の性能を十分に満たした結果となった。委員会で他耐火部材の仕様、必要なコストを検討した結果、3枚合わせ（実厚 95mm）の仕様での耐火性能を検討した。11月に日本建築総合試験所の柱炉で検討した結果2時間耐火構造の性能を十分に満たした。これらの仕様を委員会で総合的に判断した結果、性能評価試験（大臣認定用の試験）に臨む仕様は3枚合わせ（実厚 90mm）の仕様とした。試験は2019年1月と3月の2回、大阪の日本建築総合試験所で行った。1月に行った1体目は2時間耐火構造の性能を満たした。3月に行った2体目は、加熱を止めて全体の温度が下がる途中で試験体の一部が燃え出してしまい、2時間耐火構造の性能に届かなかった。以上の結果 95mm 以上の被覆厚みがあれば2時間耐火構造の性能を満たすことがわかった。



		2H耐火(木柱)					
1H耐火(木柱)		8/6報告	8/6仕様決定	9/27仕様決定	12/6仕様決定		
進捗	6月 カラマツ柱試験終了 7月 扁平柱資料提出 11月に国交省申請 1月 難燃メカニズム資料提出	短柱試験 @建研7月	実大試験 @GBRC吹田9月	実大試験 @GBRC吹田11月	本試験1体目/2体 @GBRC池田1/24	本試験2体目/2体 @GBRC池田3/8	
結果 ・予定	12月~2月 3月以降 認定番号取得予定	結果△ 6時間放置で終了	20時間放置して結果○ 現時点では性能評価で きかない	6時間放置して結果△ 現時点では評価できな い	結果○ 1晩放置	結果× 1晩放置	
仕様	樹種	スギ・カラマツ	カラマツ	カラマツ	カラマツ	カラマツ	
		スギ	カラマツ	カラマツ (本試験も同樹種とする)	カラマツ	カラマツ	
	荷重支持部材 (木造)	150角~600角	150角	150角	150角	左同	左同
		扁平柱可能(150×600)					
		600角(来年以降)					
被覆材 スギLVL 難燃含浸量 150kg/m3以上	60mm	A難燃60+難燃60 ×	難燃126mm	難燃95mm	難燃90mm	左同	
		90mm?	B難燃60+難燃30 ×				
			C難燃90+無30 △				
			D難燃60+無50 ×				
縦目地	無・有 無(~240角) 有(240角-600角)	無・有	有	無	無	左同	
留付具	ビス+木栓	左同(基本)	ビス+木栓 隅部 ビス本数4仕様	ビス+木栓 隅部 ビス本数2仕様	ビス+木栓 隅部 ビス本数 2本	左同	
接着剤	現場用ウレタン樹脂	左同	現場用ウレタン樹脂	左同	左同	左同	
化粧材	樹種	木材					
	厚み	0~15mm					
塗装		ほぼすべての種類	無し	無し	有り	有り	

表 2.1 検討した耐火柱の仕様一覧

2. 2 難燃薬剤の性能発揮メカニズム

被覆材のスギ LVL に含浸した、リンチツソ系の難燃薬剤（商品名：W2-50、丸菱油化工業製）は木材中において難燃性能を発揮する。性能発揮メカニズム資料を記した。本資料については、既に LVL 協会にて性能評価試験を終えた 1 時間耐火構造（柱）の大臣認定申請が国交省に受理される段階で同時に添付した資料である。

2. 2. 1 リン化合物の難燃化効果

①脱水炭化作用

特にセルロース等の水酸基を含む材料に対して効果が高く、水酸基-OH から水 H₂O を引き抜き（脱水）、材料中の酸素 O と水素 H を減少させることで炭素 C の割合が増える。これが炭化促進効果となり、この炭素を多く含む炭化層はグラファイト（黒鉛）の組成に近づくことで熱分解しにくくなる。この強固な炭化層が材料表面を覆うことで、材料内部への熱や酸素の供給を阻害するバリア層となる。

②吸熱作用

リン化合物が高温により熱分解する反応が吸熱反応であり、材料温度を低下させる。

③希釈効果

リン化合物の熱分解による生成物はアンモニア等の不燃性ガスであり、材料の熱分解生成物の可燃ガスや雰囲気中の酸素を不燃性ガスで希釈することにより燃焼を妨げる。

2. 2. 2 木材におけるリンチッソ系難燃薬剤の作用

2. 2. 2. 1 未処理木材と難燃処理木材の炭化進行の概要

(1)未処理木材の炭化

未処理木材の表面が加熱を受ける場合の模式図を図 2.1 に示した。

- A：熱源に曝されることにより、木材表面で熱分解（260℃付近）が起こる。
- B：木材の熱分解により可燃ガスが発生し、そのガスに引火することにより炎を伴い燃焼する。木材表面では炭化が進み、ひび割れが生じる。
- C：熱源が離れても熱分解温度以下になるまで炭化が進行し、可燃ガスによる燃焼や赤熱が残る。ひび割れ部の炭化深く、炭化層は脆い。

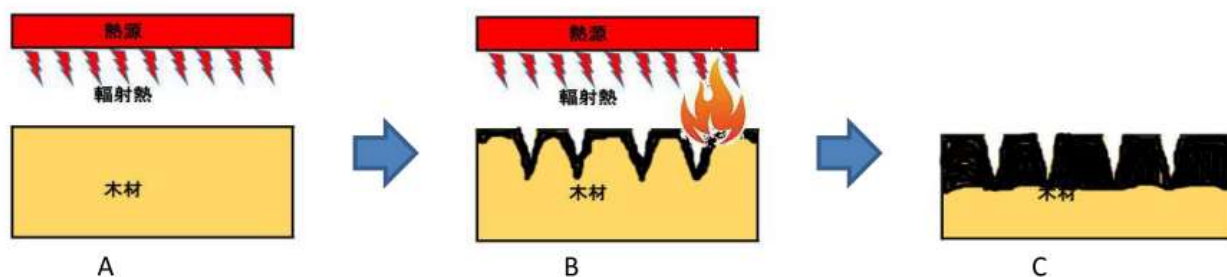


図 2.1 未処理木材の表面が加熱を受ける場合の模式図

(1)難燃処理木材の炭化

難燃処理木材の表面が加熱を受ける場合の模式図を図 2.2 に示す。

- D：熱源に曝されることにより、木材表面で難燃剤の熱分解（200℃付近）が起こる。
- E：難燃剤の脱水作用により、脱水炭化発泡層が形成される。通常の炭化層に比べて硬質な脱水炭化発泡層により木材内部への酸素の供給を遮断し、熱の侵入を抑える。木材より発生する可燃性ガスを、難燃剤の熱分解により発生する不燃性ガスが希釈することにより、燃焼を抑制する。
- F：熱源が離れると温度も下がり、脱水炭化発泡層が残る。脱水炭化発泡層は未処理木材の炭化層に比べて薄く強固な層である。

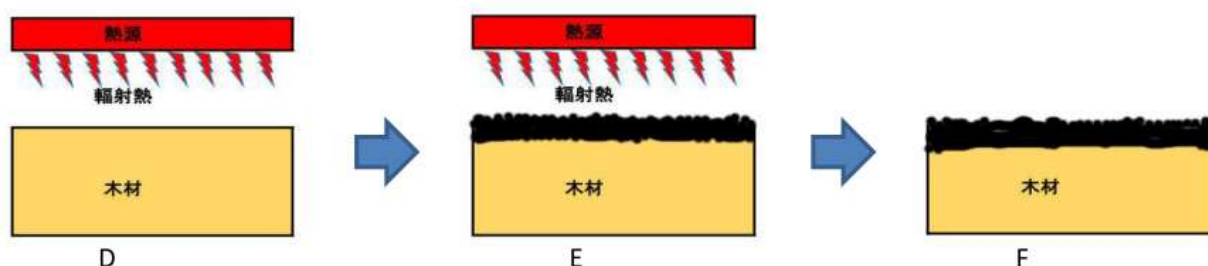


図 2.2 難燃処理木材の表面が加熱を受ける場合の模式図

2. 2. 3 説明資料

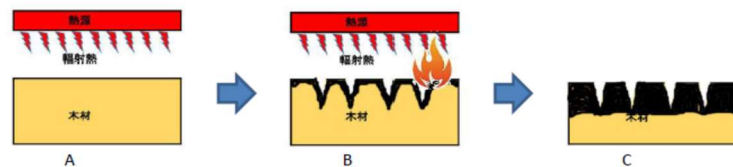
下に性能発揮メカニズムの説明資料を記載した。

木材用難燃剤の作用

丸菱油化工業(株)

1

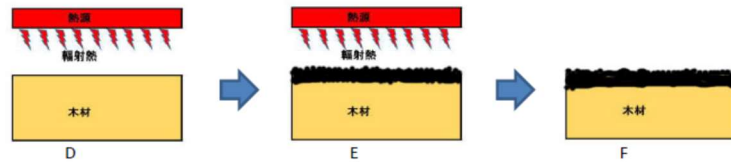
未処理木材の炭化の概要



- A: 熱源に暴露されることにより、木材表面で熱分解(260°C付近)が起こる。
- B: 熱分解により、可燃性ガスが発生し、そのガスに引火し、炎を伴い燃焼する。
(引火しなかった場合でも、自身の発火温度に達すると発火してしまう。)
同時に、木材表面では炭化が進み、大きなクラックも見えるようになる。
- C: 熱源が離れても、熱分解温度以下になるまでは炭化の進行が進む。
着火が残る場合もあり、赤熱部分が残る場合もある。
クラックが入った分、炭化は深く進んでいる。炭化層はもろく、崩れやすい。

2

難燃処理木材の炭化の概要



D: 熱源に暴露される事により、木材表面で難燃剤の熱分解(200°C前後)が起こる。

E: 同時に難燃剤の脱水炭化作用が起こり、脱水炭化発泡層の形成がなされる。炭化発泡層の効果により、木材内部への酸素の供給を遮断し、熱の侵入を押さえる。

また、木材より発生する可燃性のガスを、難燃剤の熱分解により発生する不燃性のガスで希釈し、一般的に見られる木材の燃焼を抑制する。

F: 熱源が離れると、熱もすぐには下がり、炭化層のみが残る。

未処理木材の炭化層よりも、薄い層である。また、炭化層は、強固な層である。

3

リン化合物の難燃化効果

リン化合物が材料を難燃化する効果としては、一般的に①②③が挙げられる。

①脱水炭化作用

特にセルロース等の水酸基を含む材料に対して効果が高い。
水酸基-OHから水H₂Oを引き抜き(脱水)、材料中の酸素Oと水素Hを減少させることで炭素Cの割合が増える。これが炭化促進効果となる。

②吸熱作用

リン化合物自身が高温により熱分解する反応が吸熱反応となっており、材料温度を低下させる効果。

③希釈効果

難燃剤がリン・窒素系化合物の場合、リン化合物の熱分解による生成物がアンモニア等の不燃性ガスであり、材料の熱分解生成物の低分子量の可燃性ガスや雰囲気中の酸素を不燃性ガスで希釈することにより燃焼を妨げる。

1時間耐火試験の様な高温と長時間の試験では、材料に与えられる熱量に対して②③の効果は限定的であり、主に効果を示すのは①の脱水炭化作用と考えられる。

4

脱水炭化作用のメカニズム

脱水炭化作用は一般に分子内脱水と呼ばれる化学反応による作用である。

・難燃剤を使用していない木材の場合

加熱により木材の温度が260°Cを超えると炭化を開始し、熱分解により低分子量の生成物が可燃性ガスとなって燃焼することで、さらに木材が加熱されるサイクルが継続する。

・リン・窒素系難燃剤で処理された木材の場合

未処理木材よりも低温の200°C付近で、リン酸の作用によりセルロースの脱水反応が生じる。

リン酸は高温によりメタリン酸→ポリメタリン酸となるが、どの状態のリン酸であっても脱水反応を生じさせる作用がある。

脱水反応により水酸基-OHから水H₂Oを引き抜き(脱水)、材料中の酸素Oと水素Hを減少させることで炭素Cの割合が増える。この炭素を多く含む炭化層はグラファイト(黒鉛)の組成に近づくことで、熱分解しにくい状態となる。

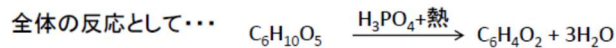
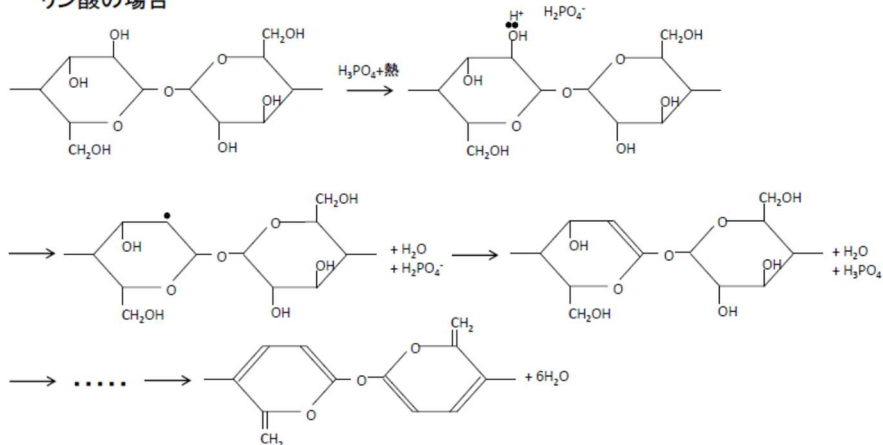
この強固な炭化層が材料表面を覆うことで、材料内部への熱や酸素の供給を阻害するバリア層として作用している。

さらに窒素成分が熱分解によりアンモニア等の不燃性ガスとなり、熔融したリン酸を発泡させ、炭化したセルロースを含む炭化発泡層が断熱層として作用する。

5

脱水炭化作用のメカニズム

リン酸の場合



6

燃え止まり効果のメカニズム

- ・リン・窒素系難燃剤で処理された木材が長時間加熱され続ける場合

難燃剤で処理された木材が加熱されると、初期の挙動として前述の様に脱水炭化作用と炭化発泡層の形成によって燃焼が抑制される。

その後も高温環境下に長時間置かれたとしても、炭化層はグラファイト状のために熱分解反応や酸化反応の速度は遅く、再燃が抑制されている。

炭化層内部の木材は熱伝導しにくく、長時間の加熱によりゆっくりと内部温度は上昇する。木材内部に徐々に熱が伝わることで木材内部に残った未反応の難燃剤が加熱されると窒素成分の不活性ガスを発生させ、リン成分が表面に出ることで再燃が抑制される。

7

耐火に必要な難燃剤の量

脱水炭化作用に対してリン酸は反応によって消費されないのだが、耐火試験においては外部からの加熱による昇温速度に対抗して、脱水炭化反応の速度が必要となる。そのためには、多量の難燃剤を使用することが有効であり、耐火試験に必要となる難燃剤の量は試験を積み重ねることで、決定しているのが現状である。



平成29年12月1日実施
大断面1時間耐火柱の試験

試験後の被覆材(難燃処理LVL)

8

3 被覆材の製造

被覆材として採用した難燃薬剤処理 LVL は、平成 28 年度に開発した 1 時間耐火構造の柱の被覆材と同じ仕様とした。具体的には、厚 30mm のスギ LVL に減圧加圧法により難燃薬剤を含浸した。難燃薬剤は丸菱油工業製のりん・窒素系 W2-50 とした。含浸量は製品作成時に 150kg/m³ 以上に管理することを前提として、試験体用には 138kg/m³～149kg/m³ とした。含浸・乾燥した 30mm 厚の LVL を複数枚重ね、レゾルシノール樹脂で 2 次接着した。

7 月に建研で行った短柱試験体に使用した被覆材は、平成 29 年度に大断面柱の認定を全国 LVL 協会で取得した際に製作した被覆材の一部を使用した。含浸量は 138kg/m³～149kg/m³ である。9 月および 11 月に日総試で実大予備試験の試験体に使用した被覆材は、8 月に広島県福山市の宏栄産業の注入釜を使用して含浸、乾燥した。3. 1. に内容を記載した。1 月および 3 月に日総試で行った性能評価試験の試験体に使用した被覆材は、10 月に宏栄産業で含浸した。3. 2. に記載した。30mm 厚の難燃薬剤処理 LVL を 2 次接着する工程は大阪府堺市の株式会社オーシカの大阪工場で行った。接着剤はレゾルシノール樹脂を用い、温度 20℃で圧縮圧 1.0MPa、24 時間以上とした。解圧後、厚みは削らずに長さや幅の寸法を荷重支持部材の柱断面寸法に合わせてカットし、試験体製作を行う東亜理科に搬入した。

3. 1 予備試験用の含浸

3. 1. 1 試験体と含浸条件

含浸のための減圧加圧を行った注入釜の最大加圧圧力が 1.0MPa と今まで使用していた注入釜より性能がよいこともあり、様々な圧力条件で 150kg/m³ 以上の含浸量が達成できるかどうかの検討も行った。含浸は 2018 年 8 月 1 日から 3 日にかけて行った。

材料：スギ B 種構造用 LVL

厚 30 (実寸 30.5~31.0mm) ×幅 400×長 3200 30 枚

8/1 (水) 重量・寸法測定 (全数)

含浸条件① 前減圧 50torr 4h 加圧 1.0MPa 4h 後減圧 300torr 0.5h
10 枚

8/2 (木) 含浸条件② 前減圧 50torr 1h 加圧 1.0MPa 1h 後減圧 300torr 0.5h
9 枚

8/3 (金) 含浸条件③ 前減圧 42.5torr 1h 加圧 1.0MPa 1h 後減圧 300torr 0.5h
11 枚

乾燥は 8/3 から 8/16 の 14 日間行った。乾燥条件は乾球温度 50℃、湿球温度 35℃で 24 時間、その後乾球温度 65℃、湿球温度 35℃で 13 日間とした。写真 3.1.1 から 3.1.8 まで含浸・乾燥の写真を示した。



写真 3.1.1 含浸前の LVL 重量寸法測定



写真 3.1.2 難燃薬剤原液の投入



写真 3.1.3 薬剤と水の攪拌

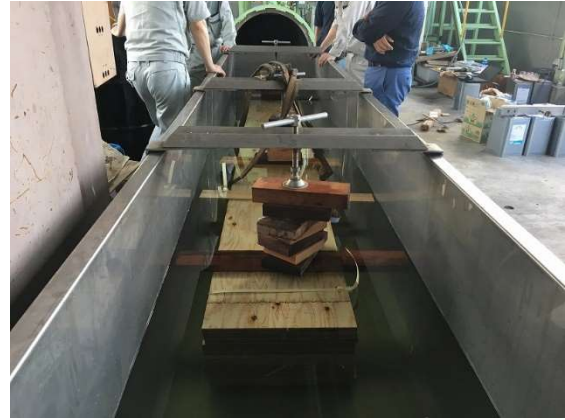


写真 3.1.4 LVL の固定

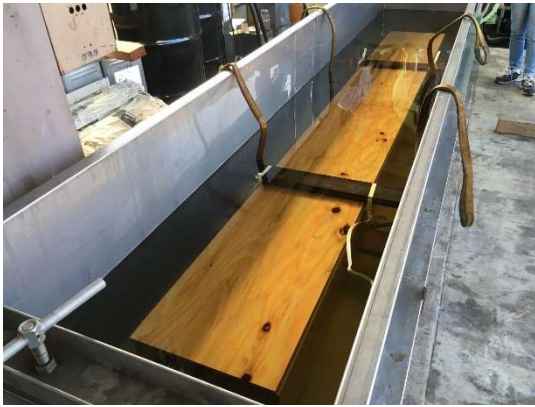


写真 3.1.5 解圧直後の LVL



写真 3.1.6 LVL っり上げ



写真 3.1.7 栈積みした LVL



写真 3.1.8 乾燥窯に設置した LVL

3. 1. 2 結果

表 3.1.1 前減圧 50.0torr 4h、加圧 1MPa 4h、後減圧 300torr 0.5h 条件での含浸結果

No.	長さ mm	幅 mm	厚 mm	注入前 重量 kg	体積 m ³	密度 kg/m ³	注入後 重量 kg	注入した 薬剤重量 kg/m ³	計算上の 薬剤固形分 重量kg/m ³	注入前含水率 11%と仮定 全乾重量kg/m ³	乾燥後 重量 kg	含水率 %
400-1	3200	400	31.44	18.20	0.0402	452	46.68	707.7	141.5	22.09	25.14	13.79
400-2	3200	400	31.22	18.64	0.0400	466	47.10	712.2	142.4	22.48	25.34	12.70
400-3	3200	400	31.34	18.94	0.0401	472	47.60	714.4	142.9	22.80	25.70	12.74
400-4	3200	400	31.32	17.68	0.0401	441	47.22	736.8	147.4	21.84	24.60	12.66
400-5	3200	400	31.11	18.50	0.0398	465	47.66	732.3	146.5	22.50	25.44	13.07
400-6	3200	400	31.15	18.96	0.0399	476	47.40	713.3	142.7	22.77	25.86	13.58
400-7	3200	400	31.17	18.40	0.0399	461	47.62	732.4	146.5	22.42	25.22	12.49
400-8	3200	400	31.22	18.16	0.0400	454	46.96	720.7	144.1	22.12	25.02	13.11
400-9	3200	400	31.21	18.16	0.0399	455	46.82	717.4	143.5	22.09	25.20	14.07
平均値			31.24	18.40	0.0400	460	47.23	720.8	144.2	22.35	25.28	13.13
最大値			31.44	18.96	0.0402	476	47.66	736.8	147.4	22.80	25.86	14.07
最小値			31.11	17.68	0.0398	441	46.68	707.7	141.5	21.84	24.60	12.49
標準偏差			0.105	0.410	0.0001	10.8	0.36	10.47	2.09	0.33	0.37	0.56
変動係数 %			0.34	2.23	0.34	2.35	0.77	1.45	1.45	1.47	1.47	4.25

表 3.1.2 前減圧 50.0torr 1h、加圧 1MPa 1h、後減圧 300torr 0.5h 条件での含浸結果

No.	長さ mm	幅 mm	厚 mm	注入前 重量 kg	体積 m ³	密度 kg/m ³	注入後 重量 kg	注入した 薬剤重量 kg/m ³	計算上の 薬剤固形分 重量kg/m ³	注入前含水率 11%と仮定 全乾重量kg/m ³	乾燥後 重量 kg	含水率 %
400-11	3200	400	31.23	18.32	0.0400	458	47.16	721.5	144.3	22.27	24.70	10.90
400-12	3200	400	31.38	18.30	0.0402	456	47.06	716.0	143.2	22.24	24.64	10.80
400-13	3200	400	31.39	18.04	0.0402	449	46.18	700.4	140.1	21.88	24.08	10.05
400-14	3200	400	31.17	18.34	0.0399	460	46.30	700.8	140.2	22.11	24.30	9.88
400-15	3200	400	31.24	18.86	0.0400	472	46.62	694.2	138.8	22.54	24.64	9.30
400-16	3200	400	31.32	18.08	0.0401	451	46.42	706.9	141.4	21.96	24.56	11.86
400-17	3200	400	31.29	18.48	0.0401	461	46.42	697.6	139.5	22.24	24.78	11.44
400-18	3200	400	31.37	18.96	0.0402	472	47.16	702.3	140.5	22.72	25.28	11.26
400-19	3200	400	31.29	17.68	0.0401	441	46.86	728.6	145.7	21.76	24.18	11.10
400-20	3200	400	31.36	17.96	0.0401	447	46.50	711.0	142.2	21.89	24.52	12.02
平均値			31.30	18.30	0.0401	457	46.67	707.9	141.6	22.16	24.57	10.86
最大値			31.39	18.96	0.0402	472	47.16	728.6	145.7	22.72	25.28	12.02
最小値			31.17	17.68	0.0399	441	46.18	694.2	138.8	21.76	24.08	9.30
標準偏差			0.074	0.394	0.0001	10.1	0.37	11.15	2.23	0.31	0.34	0.88
変動係数 %			0.24	2.15	0.24	2.20	0.78	1.58	1.58	1.38	1.39	8.09

表 3.1.3 前減圧 42.5torr 1h、加圧 1MPa 1h、後減圧 300torr 0.5h 条件での含浸結果

No.	長さ mm	幅 mm	厚 mm	注入前 重量 kg	体積 m ³	密度 kg/m ³	注入後 重量 kg	注入した 薬剤重量 kg/m ³	計算上の 薬剤固形分 重量kg/m ³	注入前含水率 11%と仮定 全乾重量kg/m ³	乾燥後 重量 kg	含水率 %
400-21	3200	400	31.06	18.62	0.0398	468	46.44	699.8	140.0	22.34	25.14	12.54
400-22	3200	400	31.20	18.38	0.0399	460	46.96	715.6	143.1	22.27	25.08	12.59
400-23	3200	400	31.24	18.60	0.0400	465	46.92	708.2	141.6	22.42	25.22	12.49
400-24	3200	400	31.38	18.00	0.0402	448	45.80	692.1	138.4	21.78	24.66	13.24
400-25	3200	400	31.28	18.86	0.0400	471	47.00	702.8	140.6	22.62	25.44	12.47
400-26	3200	400	31.22	18.96	0.0400	474	46.78	696.2	139.2	22.65	25.42	12.25
400-27	3200	400	31.45	18.32	0.0403	455	48.06	738.8	147.8	22.45	25.66	14.29
400-28	3200	400	31.37	18.00	0.0402	448	47.02	722.7	144.5	22.02	24.88	12.99
400-29	3200	400	31.21	17.86	0.0399	447	46.26	710.9	142.2	21.77	24.62	13.09
400-30	3200	400	31.33	18.50	0.0401	461	46.80	705.7	141.1	22.33	24.70	10.63
平均値			31.27	18.41	0.0400	460	46.80	709.3	141.9	22.26	25.08	12.66
最大値			31.45	18.96	0.0403	474	48.06	738.8	147.8	22.65	25.66	14.29
最小値			31.06	17.86	0.0398	447	45.80	692.1	138.4	21.77	24.62	10.63
標準偏差			0.113	0.371	0.0001	10.0	0.59	13.77	2.75	0.31	0.36	0.92
変動係数 %			0.36	2.02	0.36	2.17	1.26	1.94	1.94	1.41	1.44	7.28

表 3.1.4 注入・乾燥による寸法変化

	No.	長さmm	幅mm	厚-1	厚-2	厚-3	厚-4	厚-5	厚-6	厚平均
注入前	400-1	3200.0	400.0	31.44	31.37	31.19	31.24	31.15	31.51	31.32
注入後		3204.0	400.5	32.75	32.27	32.26	32.16	32.11	32.45	32.33
注入後-注入前差		4.0	0.5	1.31	0.90	1.07	0.92	0.96	0.94	1.02
	No.	長さmm	幅mm	厚-1	厚-2	厚-3	厚-4	厚-5	厚-6	厚平均
注入後	400-1	3204.0	400.5	32.75	32.27	32.26	32.16	32.11	32.45	32.33
乾燥後		3201.5	400.0	32.07	31.15	31.98	31.90	31.74	32.02	31.81
乾燥後-注入後差		-2.5	-0.5	-0.68	-1.12	-0.28	-0.26	-0.37	-0.43	-0.52
	No.	長さmm	幅mm	厚-1	厚-2	厚-3	厚-4	厚-5	厚-6	厚平均
注入前	400-1	3200.0	400.0	31.44	31.37	31.19	31.24	31.15	31.51	31.32
乾燥後		3201.5	400.0	32.07	31.15	31.98	31.90	31.74	32.02	31.81
乾燥後-注入前差		1.5	0.0	0.63	-0.22	0.79	0.66	0.59	0.51	0.49

3. 1. 3 考察

表 3.1.1 の前減圧 50.0torr 4h、加圧 1MPa 4h、後減圧 300torr 0.5h 条件での注入結果から、計算上の薬剤固形分重量は 9 体中 8 体が 142kg/m³ を超えており、注入量の変動が少ない結果となった。また、表 3.1.2 の前減圧 50.0torr 1h、加圧 1MPa 1h、後減圧 300torr 0.5h 条件での注入結果、および表 3.1.3 の前減圧 42.5torr 1h、加圧 1MPa 1h、後減圧 300torr 0.5h 条件での注入結果から、前減圧、加圧時間を 1 時間、前減圧 50.0torr から 42.5torr に変更した場合でも、注入量のバラツキが大きく、142kg/m³ を下回っている試験体もあった。

前減圧、加圧時間を 1 時間にした場合、試験体の 6 割程度が薬剤固形分重量 142kg/m³ を超えることができなかった。このため、少なくとも前減圧、加圧時間 1 時間の条件では、良好な注入ができないことが分かった。乾球温度 50℃、湿球温度 35℃で 24 時間、乾球温度 65℃、湿球温度 35℃で 240 時間乾燥した結果、注入前含水率を 11.0%と仮定すると、乾燥後の推定含水率は 9.3%から 14.3%であった。

また、表 3.1.4 のとおり、前減圧 50.0torr 4h、加圧 1MPa 4h、後減圧 300torr 0.5h 条件では、注入前に比べて注入後は、長さで 4mm、幅で 0.5mm、厚さで 1mm 膨張した。注入後と乾燥後を比較すると、乾燥後が長さで 2.5mm、幅で 0.5mm、厚さで 0.5mm 収縮、注入前と乾燥後を比較すると、乾燥後が長さで 1.5mm、厚さで 0.5mm 膨張する（幅は同じ）ことが分かった。

次に行う大臣認定試験用の含浸で採用する減圧加圧スケジュールは、条件①を採用することとした。

3. 2 性能評価試験用の含浸

性能評価試験用の含浸を広島県の宏栄産業で行った。性能評価元の日本建築総合試験所の立ち合いのもと行った。含浸は2018年10月23日から25日であった。

3. 2. 1 試験体と含浸条件

試験体に用いたスギ LVL は含浸前の厚みを 29.5mm とした。3. 1 で製作した被覆材は含浸乾燥後の厚みが 32mm 程度と大きくなり、3枚あわせまた4枚合わせにした時に公称厚みより大きな厚みになった。2次接着して合わせた時の厚みが図面寸法に近い数値に近づけるためである。JAS での表示寸法の範囲内におさまる寸法である。

材料：スギ B種構造用 LVL

厚 30×幅 170×長 3200 32枚

厚 30×幅 410×長 3200 32枚 計 64枚

含浸条件：前減圧 42.5torr 4h 加圧 1.0MPa 4h 後減圧 300torr 0.5h

乾燥条件：

10/23 (火) 重量・寸法・節・含水率 測定 (全数) 含浸 1回目 24枚

10/24 (水) 1回目の含浸後重量測定、含浸 2回目 24枚、
2回目の含浸後重量測定、含浸 3回目 24枚

10/25 (木) 3回目の含浸後重量測定、乾燥機に材料投入

乾燥は10/25から11/19の24日間行った。乾燥条件は乾球温度 50℃、湿球温度 35℃で24時間、その後乾球温度 65℃、湿球温度 35℃で23日間とした。写真 3.1.1 から 3.1.8 まで含浸・乾燥の写真を示した。



写真 3.2.1 含浸前の LVL



写真 3.2.2 重量寸法測定



写真 3.2.3 LVL を薬剤水槽に投入



写真 3.2.4 釜を閉めて減圧開始



写真 3.2.5 解圧直後の LVL

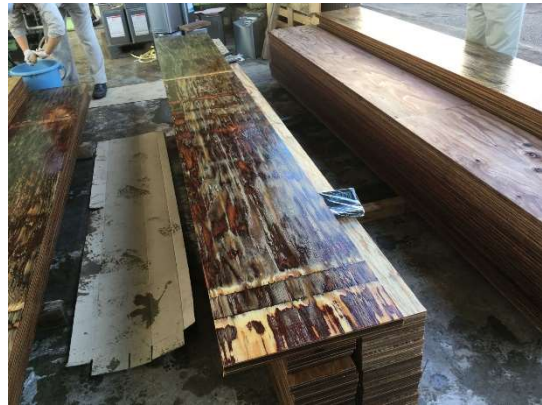


写真 3.2.6 含浸直後重量測定



写真 3.2.7 栈積みした LVL



写真 3.2.8 乾燥窯に設置した LVL

3. 2. 2 結果

表 3.2.1 と表 3.2.2 に含浸結果を示した。

表 3.2.1 幅 170mm の含浸結果

No.	長さ mm	幅 mm	厚 mm	注入前 重量 kg	体積 m ³	密度 kg/m ³	注入後 重量 kg	注入した 薬剤重量 kg/m ³	計算上の 薬剤固形分 重量kg/m ³	モコ表示 平均含水率 %
170-01	3200	170	29.30	7.36	0.0159	462	18.83	719.6	143.9	11.8
170-02	3200	170	29.33	7.31	0.0160	458	18.16	680.0	136.0	11.7
170-03	3200	170	29.32	7.48	0.0160	469	18.26	676.0	135.2	12.5
170-04	3200	170	29.27	7.71	0.0159	484	18.53	679.1	135.8	13.7
170-05	3200	170	29.33	7.53	0.0160	472	18.32	676.0	135.2	12.0
170-06	3200	170	29.40	7.77	0.0160	486	18.52	672.3	134.5	13.2
170-07	3200	170	29.51	7.68	0.0161	478	18.69	686.0	137.2	11.3
170-08	3200	170	29.36	7.50	0.0160	469	18.81	708.6	141.7	11.3
170-09	3200	170	29.25	7.45	0.0159	468	19.12	733.8	146.8	11.7
170-10	3200	170	29.30	7.46	0.0159	468	18.28	678.7	135.7	11.7
170-11	3200	170	29.43	7.47	0.0160	467	18.75	704.7	140.9	11.2
170-12	3200	170	29.43	7.56	0.0160	472	18.34	672.8	134.6	12.7
170-13	3200	170	29.41	7.58	0.0160	474	18.81	702.0	140.4	12.2
170-14	3200	170	29.46	7.44	0.0160	464	19.15	730.8	146.2	12.8
170-15	3200	170	29.40	7.33	0.0160	458	19.22	743.2	148.6	10.8
170-16	3200	170	29.57	7.82	0.0161	486	18.98	694.0	138.8	13.0
170-17	3200	170	29.27	7.00	0.0159	440	18.72	735.8	147.2	11.3
170-18	3200	170	29.43	7.34	0.0160	459	18.40	690.4	138.1	11.2
170-19	3200	170	29.31	7.21	0.0159	452	18.47	705.9	141.2	10.7
170-20	3200	170	29.42	7.48	0.0160	467	19.12	727.0	145.4	13.5
170-21	3200	170	29.30	7.32	0.0159	459	18.75	717.0	143.4	11.8
170-22	3200	170	29.45	7.85	0.0160	490	18.98	695.1	139.0	12.2
170-23	3200	170	29.50	7.79	0.0160	485	18.66	677.2	135.4	11.5
170-24	3200	170	29.44	7.39	0.0160	461	18.82	714.1	142.8	12.2
170-25	3200	170	29.41	7.37	0.0160	461	18.82	715.8	143.2	12.2
170-26	3200	170	29.40	7.25	0.0160	453	18.58	708.9	141.8	11.2
170-27	3200	170	29.39	7.09	0.0160	443	18.80	732.7	146.5	11.2
170-28	3200	170	29.43	7.35	0.0160	459	19.13	735.9	147.2	10.8
170-29	3200	170	29.40	7.30	0.0160	456	19.00	731.9	146.4	10.5
170-30	3200	170	29.54	8.01	0.0161	499	19.07	688.0	137.6	13.3
170-31	3200	170	29.44	7.62	0.0160	476	19.49	741.3	148.3	11.8
170-32	3200	170	29.40	7.52	0.0160	470	19.40	742.8	148.6	12.5
平均値			29.39	7.48	0.0160	468	18.78	706.8	141.4	11.9
最大値			29.57	8.01	0.0161	499	19.49	743.2	148.6	13.7
最小値			29.25	7.00	0.0159	440	18.16	672.3	134.5	10.5
標準偏差			0.079	0.223	0.0000	13.3	0.34	23.89	4.78	0.85
変動係数 %			0.27	2.98	0.27	2.84	1.80	3.38	3.38	7.12

表 3.2.2 幅 410mm の含浸結果

No.	長さ mm	幅 mm	厚 mm	注入前 重量 kg	体積 m ³	密度 kg/m ³	注入後 重量 kg	注入した 薬剤重量 kg/m ³	計算上の 薬剤固形分 重量kg/m ³	モコ表示 平均含水率 %
410-01	3200	410	29.37	18.47	0.0385	479	45.53	702.1	140.4	12.5
410-02	3200	410	29.44	18.01	0.0386	466	44.75	692.2	138.4	10.8
410-03	3200	410	29.34	18.55	0.0385	482	44.62	677.3	135.5	12.2
410-04	3200	410	29.62	19.22	0.0389	495	44.68	655.1	131.0	12.3
410-05	3200	410	29.48	19.01	0.0387	491	44.76	665.7	133.1	12.8
410-06	3200	410	29.45	18.54	0.0386	480	45.28	691.9	138.4	11.5
410-07	3200	410	29.40	18.57	0.0386	481	45.10	687.8	137.6	13.0
410-08	3200	410	29.60	18.34	0.0388	472	45.53	700.1	140.0	12.5
410-09	3200	410	29.55	17.79	0.0388	459	45.18	706.5	141.3	12.3
410-10	3200	410	29.72	18.43	0.0390	473	44.85	677.5	135.5	11.5
410-11	3200	410	29.43	18.81	0.0386	487	44.50	665.4	133.1	12.2
410-12	3200	410	29.43	18.76	0.0386	486	44.63	670.0	134.0	12.7
410-13	3200	410	29.41	18.12	0.0386	469	44.55	685.0	137.0	12.8
410-14	3200	410	29.46	17.97	0.0387	465	45.30	707.3	141.5	12.5
410-15	3200	410	29.40	17.81	0.0386	462	45.02	705.4	141.1	11.3
410-16	3200	410	29.57	18.01	0.0388	464	43.99	669.7	133.9	12.0
410-17	3200	410	29.27	17.88	0.0384	466	43.80	675.0	135.0	10.2
410-18	3200	410	29.43	17.38	0.0386	450	43.76	683.2	136.6	10.7
410-19	3200	410	29.31	17.16	0.0385	446	44.09	700.3	140.1	11.0
410-20	3200	410	29.42	16.96	0.0386	439	44.47	712.6	142.5	10.2
410-21	3200	410	29.30	17.68	0.0384	460	45.09	713.0	142.6	10.8
410-22	3200	410	29.45	18.37	0.0386	475	44.81	684.4	136.9	13.0
410-23	3200	410	29.50	18.07	0.0387	467	45.73	714.5	142.9	12.8
410-24	3200	410	29.44	17.95	0.0386	465	45.83	721.7	144.3	12.5
410-25	3200	410	29.41	17.94	0.0386	465	45.92	725.3	145.1	11.5
410-26	3200	410	29.40	17.79	0.0386	461	45.57	720.1	144.0	11.0
410-27	3200	410	29.39	17.92	0.0386	465	44.75	695.8	139.2	11.7
410-28	3200	410	29.43	17.95	0.0386	465	44.81	695.8	139.2	11.8
410-29	3200	410	29.40	17.55	0.0386	455	44.61	701.4	140.3	11.7
410-30	3200	410	29.54	18.07	0.0388	466	45.80	715.6	143.1	13.2
410-31	3200	410	29.44	18.03	0.0386	467	46.18	729.0	145.8	12.3
410-32	3200	410	29.40	17.88	0.0386	464	45.10	705.6	141.1	11.3
平均値			29.44	18.09	0.0386	468	44.96	695.4	139.1	11.9
最大値			29.72	19.22	0.0390	495	46.18	729.0	145.8	13.2
最小値			29.27	16.96	0.0384	439	43.76	655.1	131.0	10.2
標準偏差			0.094	0.498	0.0001	12.4	0.61	19.30	3.86	0.84
変動係数 %			0.32	2.75	0.32	2.65	1.36	2.77	2.77	7.06

3. 2. 3 考察

注入前の材料検査では、密度は幅 170mm、幅 410mm とも基準値の範囲に含まれていた。溶解・攪拌後の薬剤比重は 1.120 であり基準値範囲内であった。薬剤注入量については、表 1 の幅 170mm では、平均値が 141.4kg/m³ 最小値が、134.5 kg/m³、最大値が 148.6 kg/m³ であった。表 2 の幅 410mm では、平均値が 139.1kg/m³ 最小値が、131.0kg/m³、最大値が 145.8 kg/m³ であった。製造フローの含浸量下限値を下げることを前提として、3 回に及ぶ注入処理を再注入なしで終了した。140kg/m³ 以上、150kg/m³ 未満の試験体を本番仕様の被覆材として採用することにした。

4. 耐火性能の検討

4. 1 仕様を決めるための短柱無載荷試験

4. 1. 1 試験体

平成 29 年度に LVL 協会にて性能評価試験に合格した 1 時間耐火構造の柱の仕様を踏まえ、荷重支持柱の断面寸法 210mm 角～1250mm 角を想定した 2 時間耐火構造の仕様を検討した。平成 30 年 7 月 9 日～10 日に埼玉県東亜理科で試験体を製作、養生期間は 2 週間とした。IS0834 に規定する標準加熱曲線に準拠して加熱を行った。

日時：平成 30 年 7 月 23 日（月）

場所：国立研究開発法人建築研究所（つくば市） 防耐火実験棟 水平炉

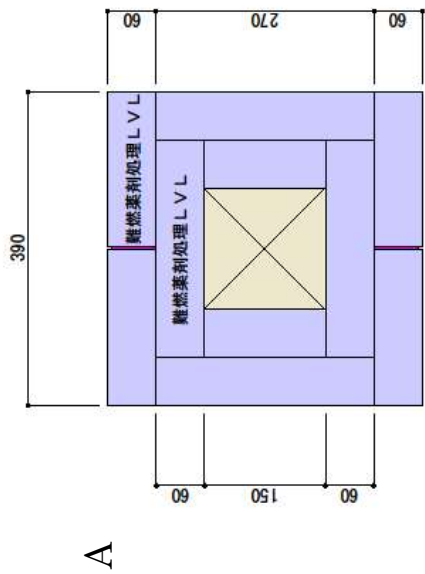
着火時間：9 時 10 分

加熱終了時間：11 時 10 分（2 時間加熱）

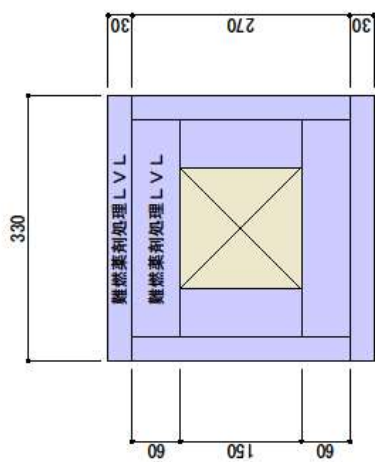
脱炉時間：17 時 10 分（6 時間放冷）

試験体仕様は 4 仕様とし、図 4.1.1 に示した。被覆材の供給体制を容易することを目的として、被覆材を 1 時間耐火構造の仕様と同一とした。具体的には難燃薬剤処理 LVL は厚み 30mm、薬剤注入量 150kg/m³以上とし、2 枚または 3 枚をレゾルシノール樹脂で 2 次接着した。共通仕様として、荷重支持部材は国産カラマツ集成材 E95-F300（同一等級構成）、150mm 角、面取りとした。認定を受ける試験での荷重支持部材の樹種は試験時点でスギを想定していた。

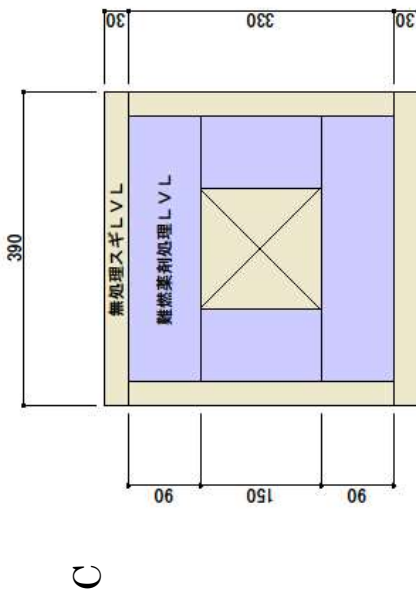
① 最強



B



③ 無処理スギLVLで②を補強



④ 1時間耐火仕様を無処理カラマツLVLで補強

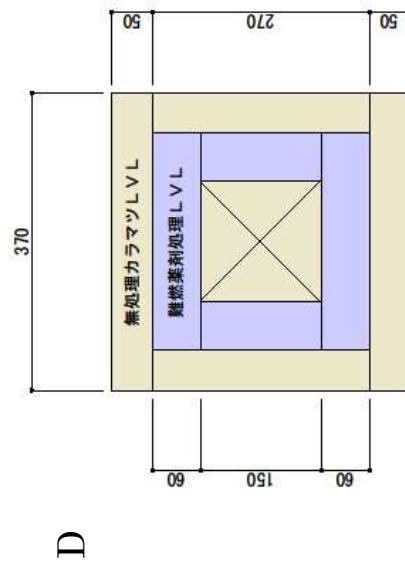


図 4.1.1 試験体仕様

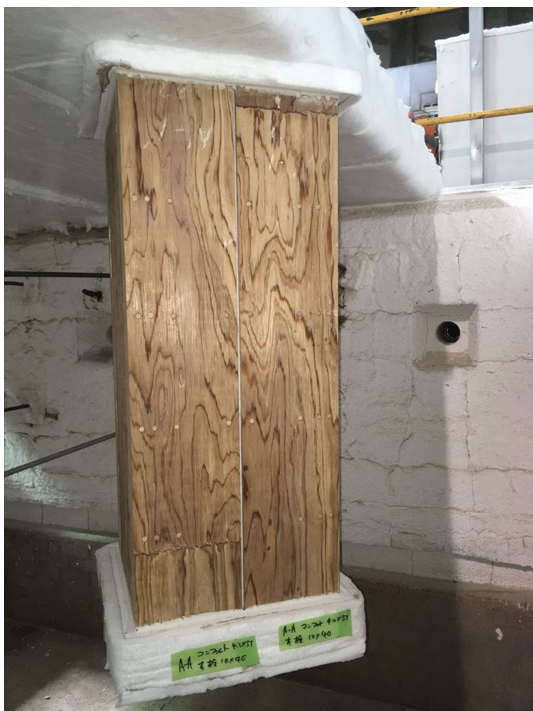


写真 4.1.1 A-A' 面



写真 4.1.2 A-B' 面



写真 4.1.3 B-A' 面



写真 4.1.4 B-B' 面



写真 4.1.5 C-A' 面



写真 4.1.6 C-B' 面



写真 4.1.7 D-A 面



写真 4.1.8 D-B 面

4. 1. 2 結果

4. 1. 2. 1 試験体 A

試験体 A の内部温度を図 4. 1. 2 に、試験後の写真を写真 4. 1. 9 から写真 4. 1. 11 に示した。

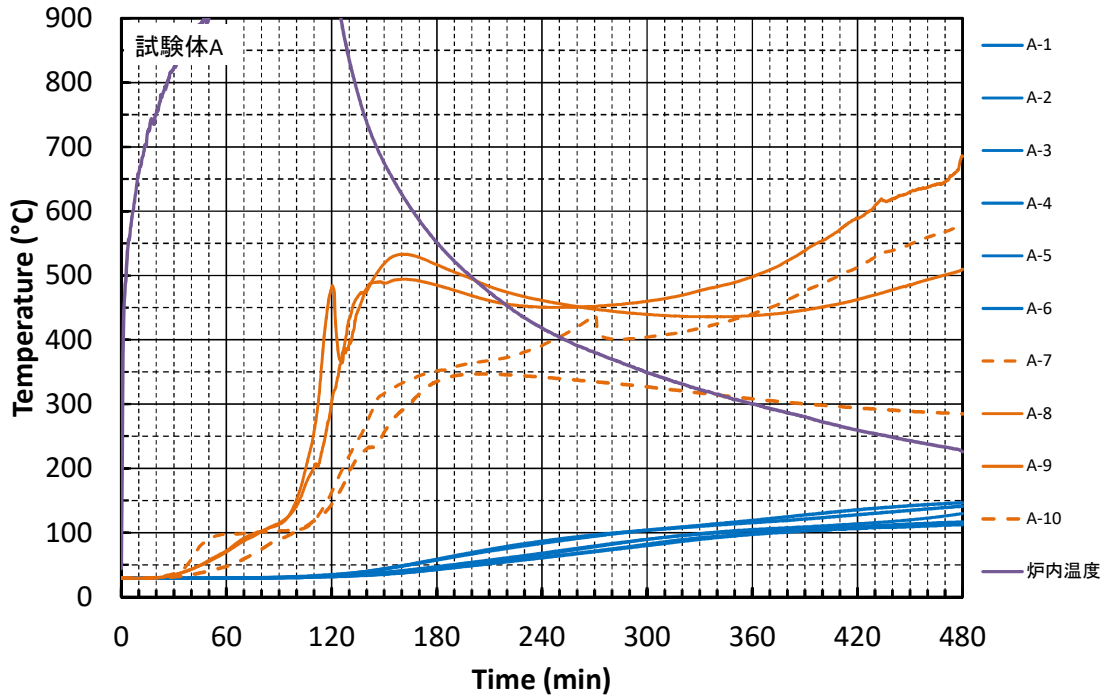


図 4. 1. 2 試験体 A の温度測定結果



写真 4. 1. 9 試験体 A の赤熱 (A' 面)



写真 4. 1. 10 試験体 A の断面



写真 4. 1. 11 試験体 A の断面

厚み 60mm の難燃薬剤処理 LVL2 枚張りの最も安全側だと予想した使用で、4 面ともビス+木栓及び接着剤で留め付けた。荷重支持部材に設置した熱電対 6 点全ての測定温度は 480 分で 150℃以下であった。

脱炉後の様子を確認したら縦目地を設けてあった A' 面の熱電対 8 番部分が赤熱していた（写真 3-1）。最外層の被覆材が一部脱落していたが、脱落した部分の赤熱は特に見られなかったことから脱落による火の浸透ではないと思われる。恐らく試験体の炭化・変形により発生した隙間から火が入り、そのまま熱溜りになったと思われる。これは、一昨年の大断面の 1 時間耐火柱試験で目地塞ぎ材を使用したとき、赤熱により不合格になったことから類推できる。

荷重支持部材の断面を切ってみても、厚み 30mm の 1 層目の被覆材が殆ど残っていた部分もあるくらいだが、最外層の赤熱が自然に収まるかどうかは不明である。

因みに最外層の被覆材の脱落においては、長さ 40mm の木栓を使用しているため、被覆材同士に実際留め付け材のビスがかかっているのは 20mm しかない。そのため、2 時間耐火試験ではビスのかかっていない部分が脱落しやすかったのではないかと考えられる。

4. 1. 2. 2 試験体 B

試験体 B の内部温度を図 4. 1. 3 に、試験後の写真を写真 4. 1. 12 から写真 4. 1. 14 に示した。

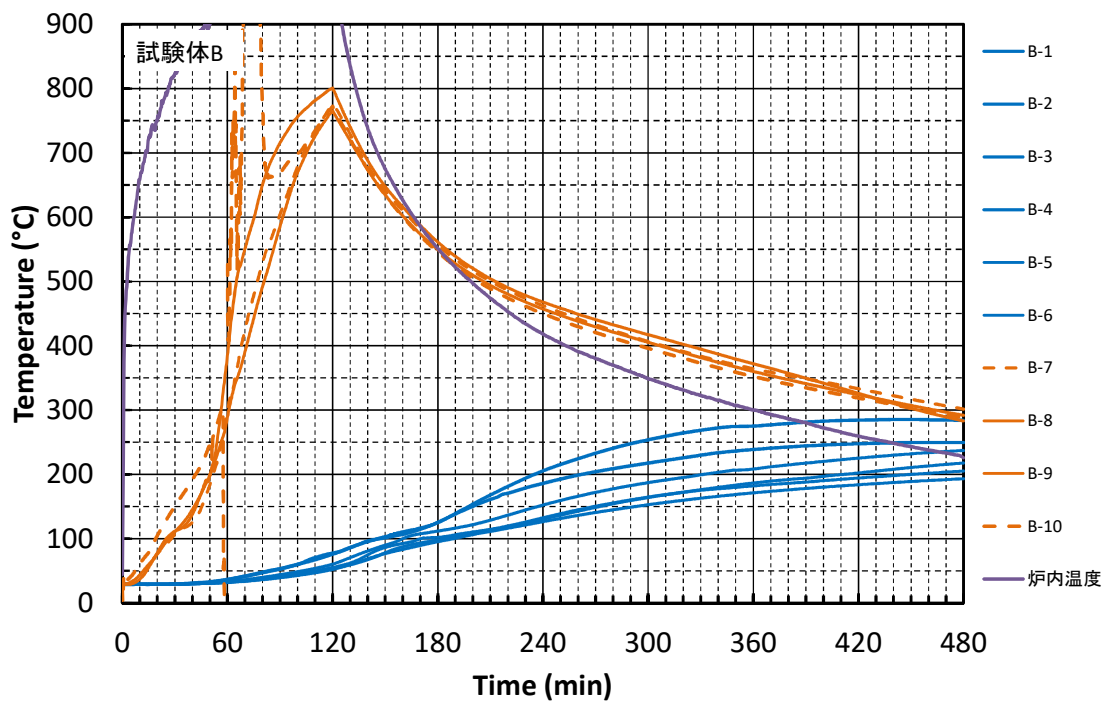


図 4. 1. 3 試験体 B の温度測定



写真 4. 1. 12 試験体 B の北側 (B、A' 面)



写真 4.1.13 試験体 B の断面



写真 4.1.14 試験体 B の断面

4. 1. 2. 3 試験体 C

試験体 C の内部温度を図 4. 1. 4 に、試験後の写真を写真 4. 1. 15 から写真 4. 1. 17 に示した。

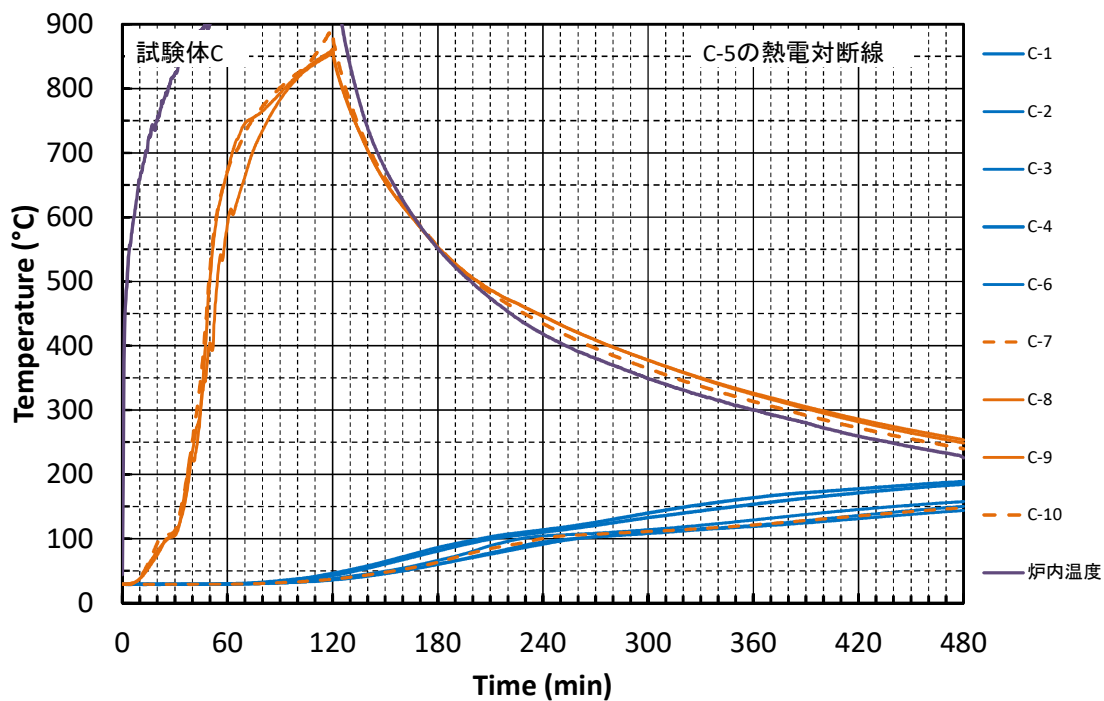


図 4. 1. 4 試験体 C の温度測定



写真 4. 1. 15 試験体 C の北側 (B、A' 面)

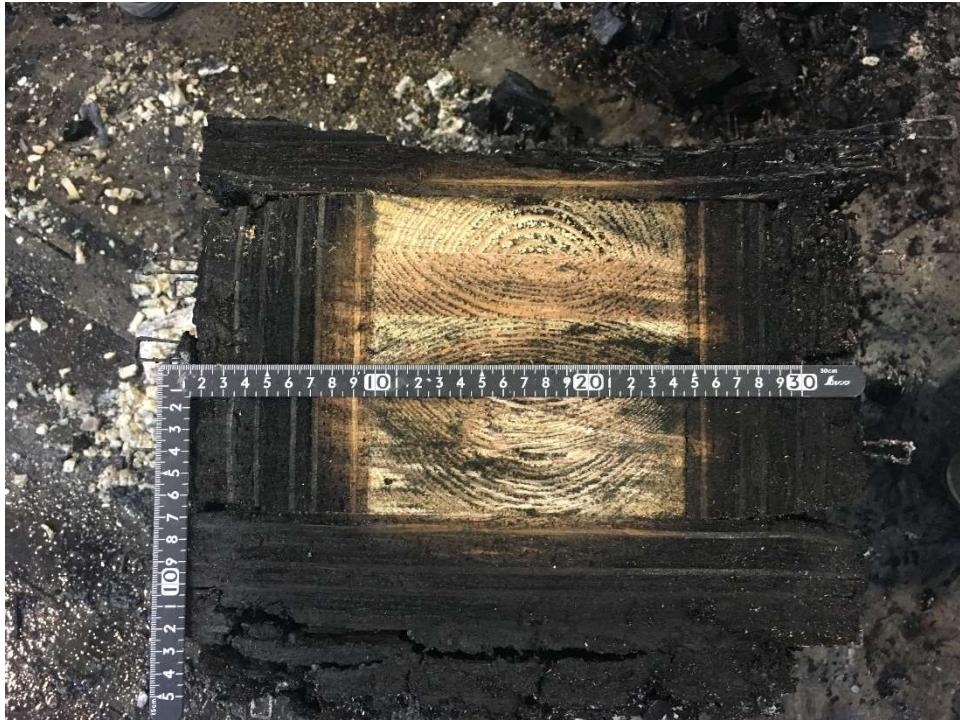


写真 4. 1. 16 試験体 C の断面



写真 4. 1. 17 試験体 C の断面

4. 1. 2. 4 試験体 D

試験体 D の内部温度を図 4. 1. 5 に、試験後の写真を写真 4. 1. 18 から写真 4. 1. 20 に示した。

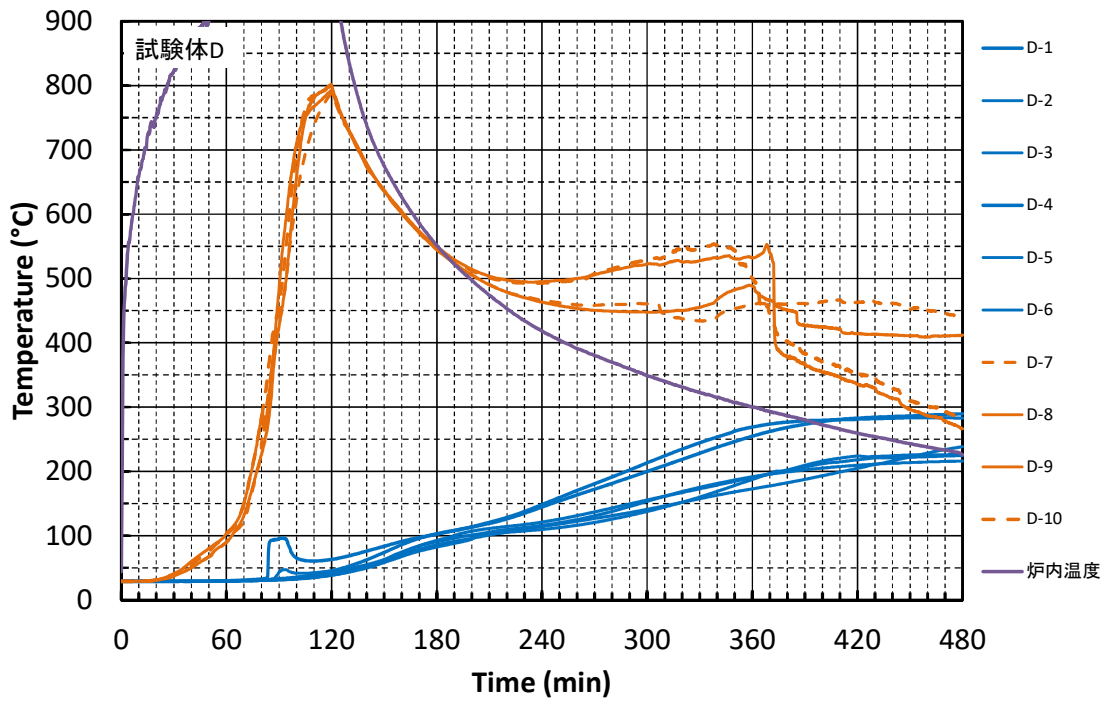


図 4. 1. 5 試験体 D の温度測定



写真 4. 1. 18 試験体 D の A 面赤熱



写真 4. 1. 19 試験体 D の断面



写真 4. 1. 20 試験体 D の荷重指示部材炭化

4. 1. 3 まとめ

今回は製作現場に、被覆材の寸法を含浸及び接着剤による膨らみを考えてジャストサイズでカットして納入した。しかし、2次接着直後から厚み方向に材の膨らみが発生したため当初の計算通りにはいかなくて1mm～2mm程度の隙間が発生したが、施工誤差範囲だと思われる。

木栓の有無による性能確認については、最外層は長さ40mmの木栓をするとその分はがれやすくなる。また、ビスによる熱橋の影響は大きく見られなかったので、最外層は木栓なしでビスを設置し、荷重支持部材に貼る1層目の被覆材には熱橋防止のため木栓をした方が良いと思われる。

4仕様の試験体の2時間耐火試験結果、荷重支持部材に設置した熱電対測定温度が全て200℃以下であり、脱炉後も炭化が見られなかった試験体Cが今後最も可能性の高い仕様だと思われる。試験体の荷重支持部材はカラマツ集成材で、全て2.5mm程度の面取り加工が施されている。そのため、1時間耐火柱と同じように荷重支持部材をスギの集成材にした場合は性能が下がる可能性がある。

4. 2 载荷予備試験

4. 2. 1 被覆材厚み 126mm

4. 1 で検討した 4 体の短柱試験の結果から被覆材の厚みが 120 mm あれば十分に 2 時間耐火性能を満たすのではないかと考え、長さ 3M の実大柱の载荷耐火試験を行った。

4. 2. 1. 1 実験概要

2 時間耐火性能を目標に製作した 4 面加熱の試験体は、一般財団法人日本建築総合試験所の柱炉を使用し、「防耐火性能・標準業務方法書」に準拠して载荷加熱試験を行った。図 4.2.1.1 に柱炉の試験装置図を示す。試験実施日は、平成 30 年 9 月 11 日であった。

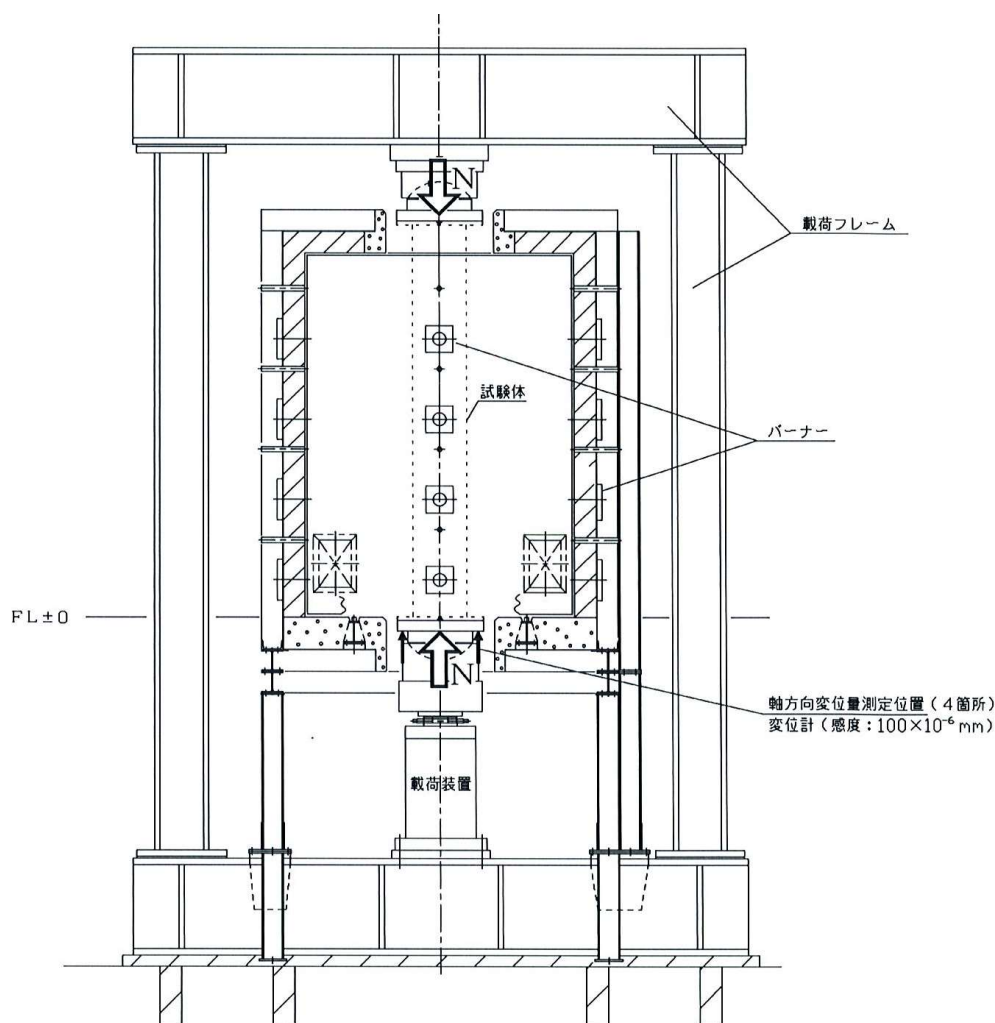


図 4.2.1.1 試験装置図

(1) 加熱方法

ISO834 に規定する標準加熱曲線に準拠した加熱を行った。軸方向変形が進み、载荷の継続が困難となった場合に試験を中止する事とした。

(2) 载荷方法

試験荷重Nは、長期許容圧縮応力度($f_c=4.687\text{N/mm}^2$)より算出した。

試験荷重 $N=4.687\text{N/mm}^2 \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ (有効断面積)=105.5kN

ただし、 $F=20.6\text{N/mm}^2$, $lk=3500\text{ mm}$ (座屈長さ)とし、 f_c を算出した。

(3) 測定項目

①試験体内部温度

②炉内温度

③軸方向収縮(変形)量

④炭化状況

試験終了後、試験体各部を切断し、加熱後の炭化深さ及び残存断面を測定した

⑤含水率

試験体に使用した構造用集成材の端部から作成されたサンプルを 105℃の絶乾状態に設定した恒温器を用いて 12 日間養生した後、重量減少を測定して、含水率を測定した。含水率は次式から求めた。

$$\text{含水率(\%)} = ((\text{絶乾前の重量} - \text{絶乾後の重量}) \div \text{絶乾後の重量}) \times 100$$

⑥その他

試験体の目視観察、写真撮影等を行った。

試験体は断面寸法 150 mm×150 mmの同一等級構成構造用集成材を構造部材とする試験体について载荷加熱試験を実施した。加熱試験体の構成部材、組立仕様などの試験体仕様の一覧を製作時の様子を表 4.2.1.1～2 と図 4.2.1.2～7、写真 4.2.1.1 に示す。

表 4.2.1.1 試験体構成材料 (寸法単位:mm)

項目	試験体の構造
荷重支持部材	<ul style="list-style-type: none">・材質 同一等級構成構造用集成材(日本農林規格に適合するもの)・樹種 カラマツ・比重 0.583 (気乾、実測値)・断面寸法 150×150
被覆材	[1]単板積層材 <ul style="list-style-type: none">・材質 りん・窒素系薬剤処理単板積層材・薬剤含浸量 140～149kg/m³・厚さ 126(厚さ 31.5 の板を積層)

表図 4.2.1.2 試験体構成材料留付材 (寸法単位:mm)

項 目	試験体の構造
被覆材 (つづき)	<p>[2]目地充填材</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アルカリアースシリケートブランケット (生体溶解性繊維) ・厚さ 6 mm以上 ・密度 128kg/m³以上 ・分類温度 1300℃以上 <p>[3]アルミ箔テープ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・幅 50 mm以上
留付材	<p>[1]被覆材留付用</p> <p>[1]-1 ねじ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 鉄鋼 ・寸法 φ5 mm×L105 mm ・留付間隔 200 以下 <p>[1]-2 ねじ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 鉄鋼 ・寸法 φ5.5 mm×L165 mm ・留付間隔 200 以下 <p>[1]-3 接着剤</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 ウレタン系樹脂接着剤 ・塗布量 300g/m² <p>[1]-3 木栓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 広葉樹 ・寸法 φ14

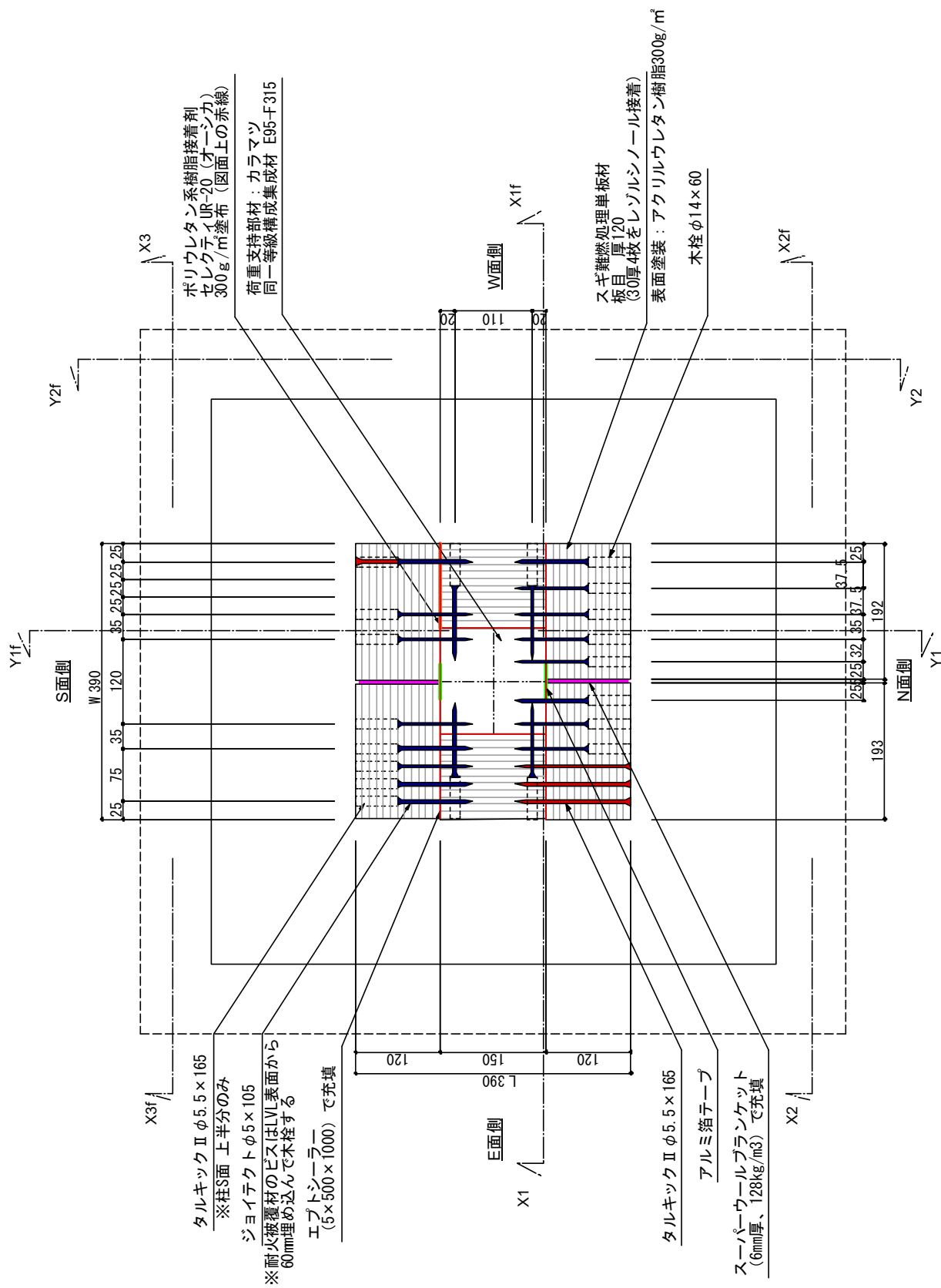


図 4.2.1.2 試験体の構造及び寸法

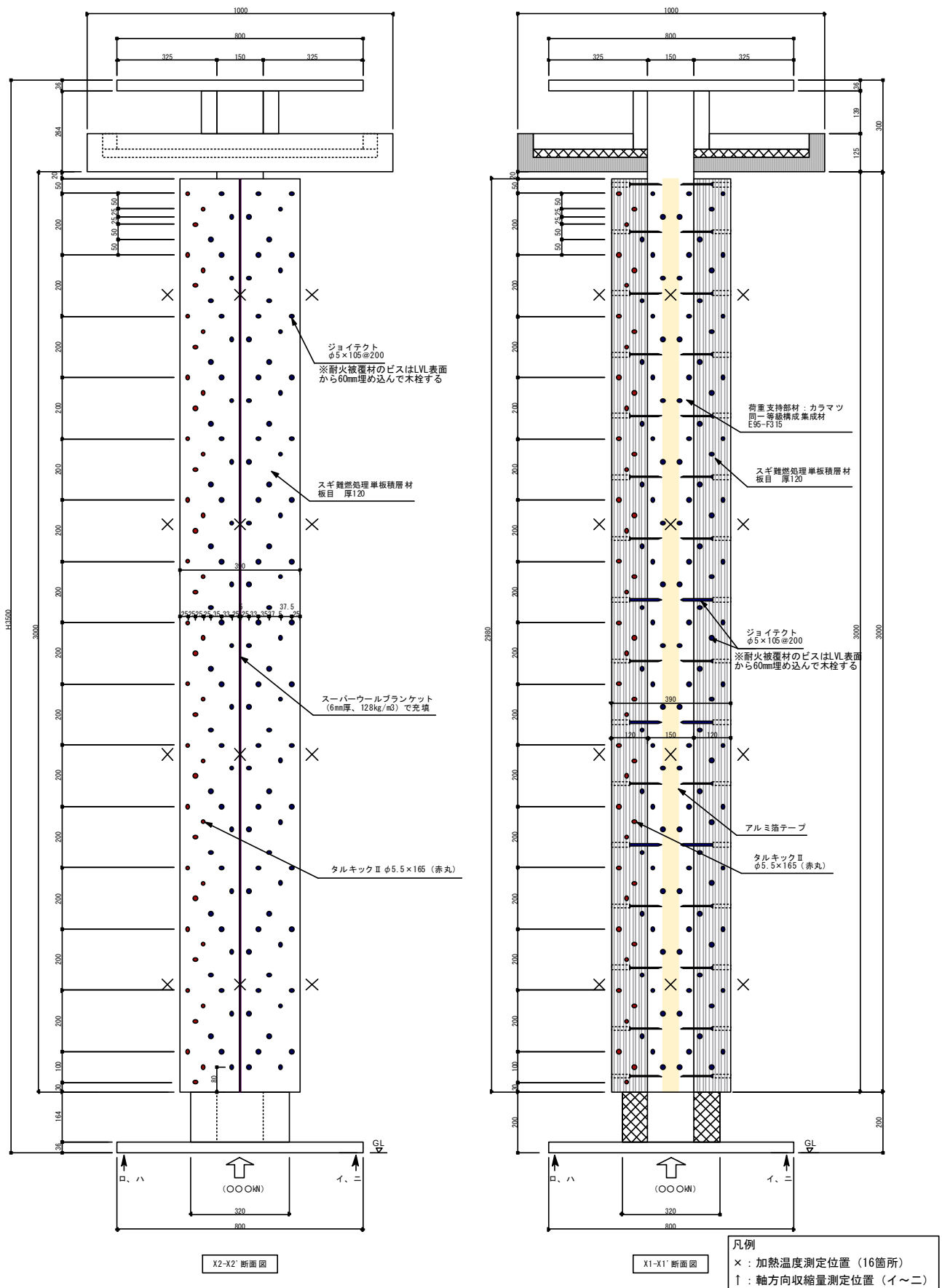


図 4.2.1.3 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (X 通り①)

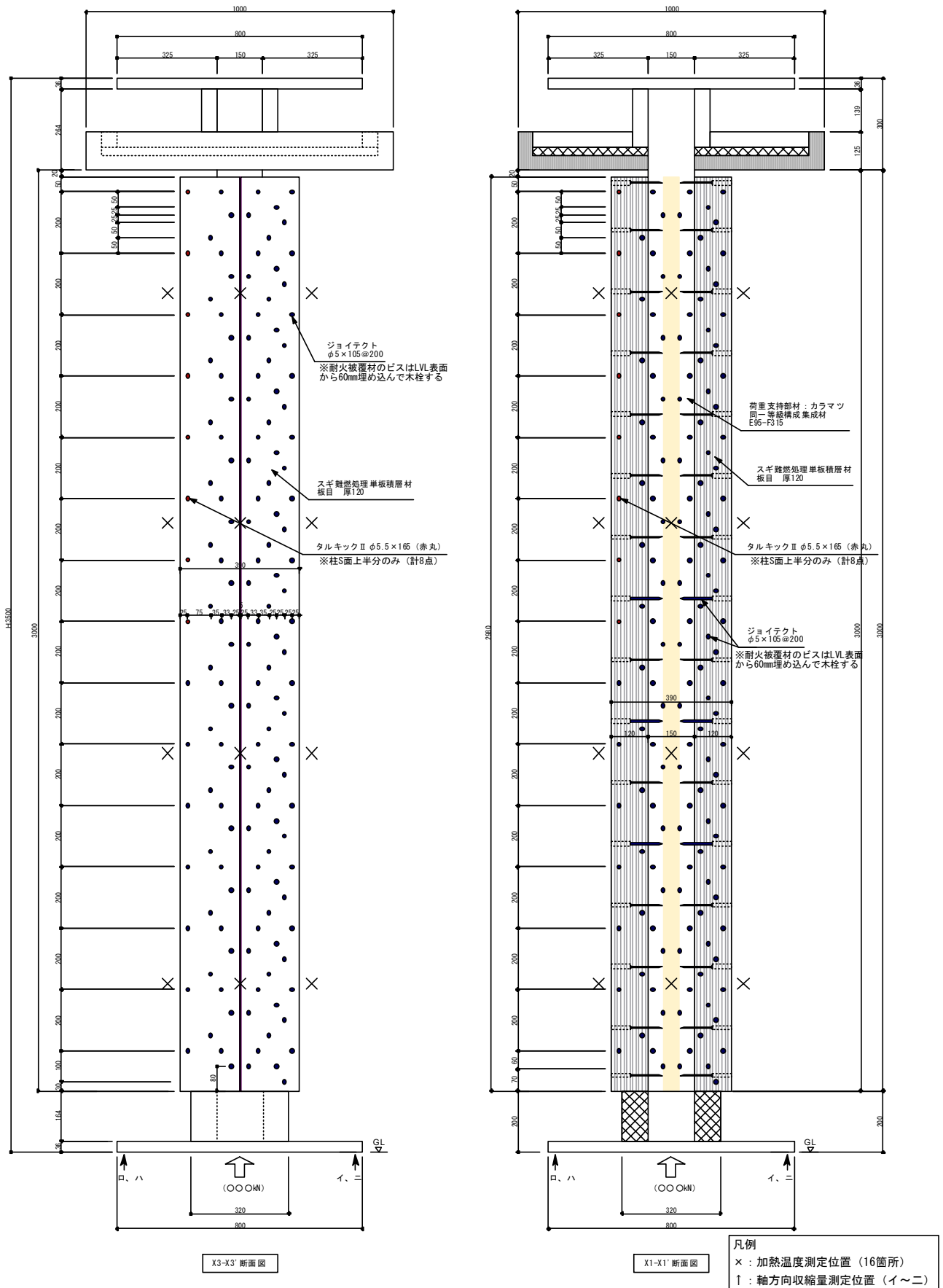


図 4.2.1.4 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (X 通り②)

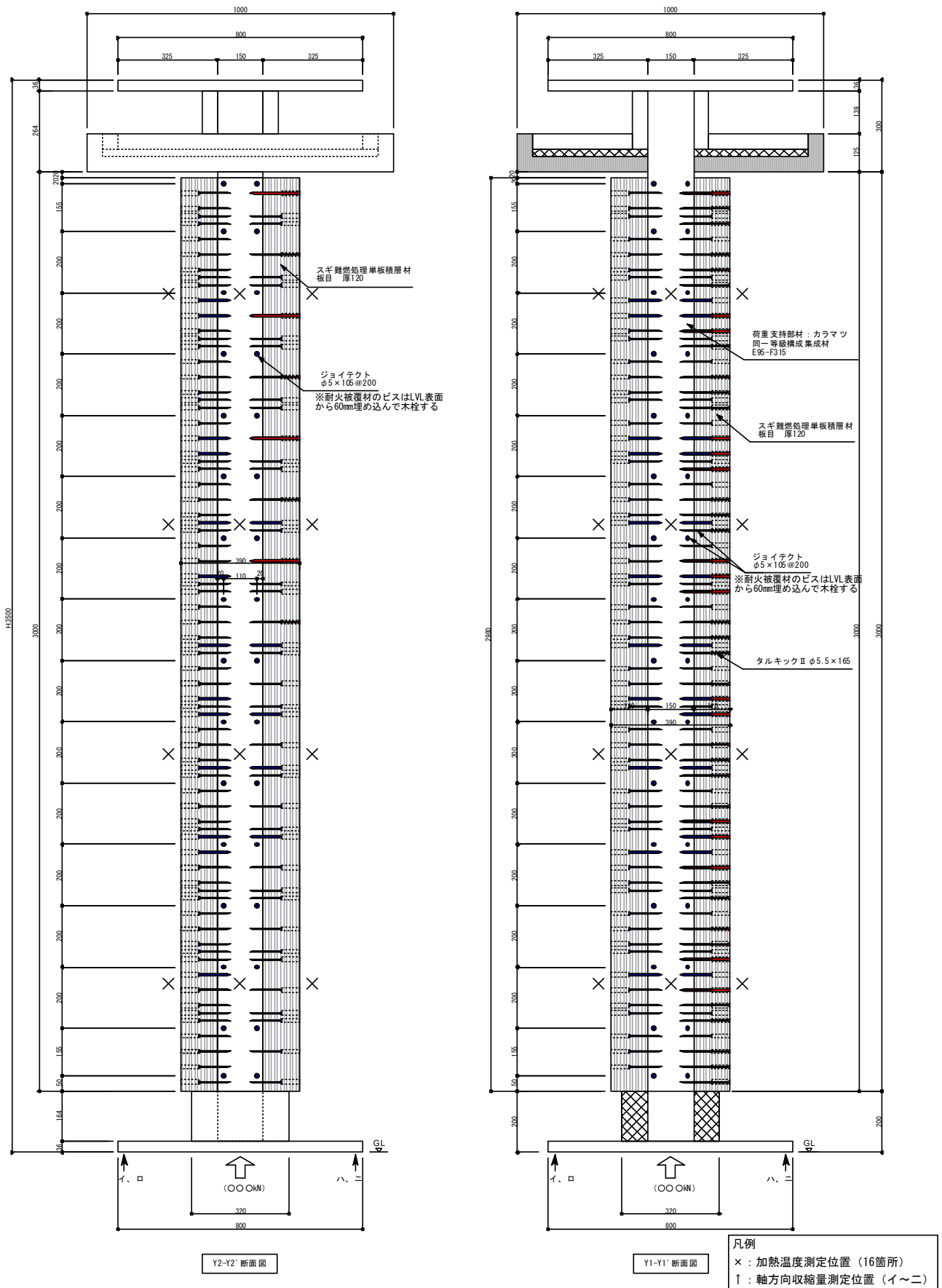


図 4.2.1.5 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (Y 通り)

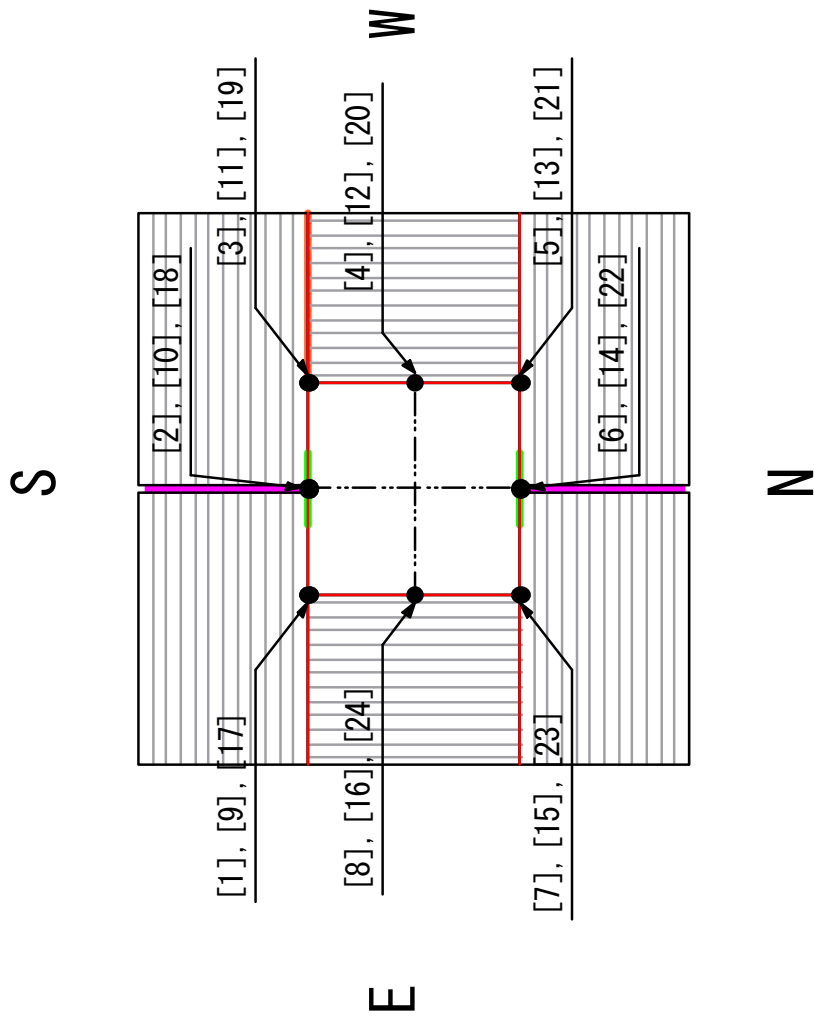


図 4.2.1.6 試験体の熱電対位置

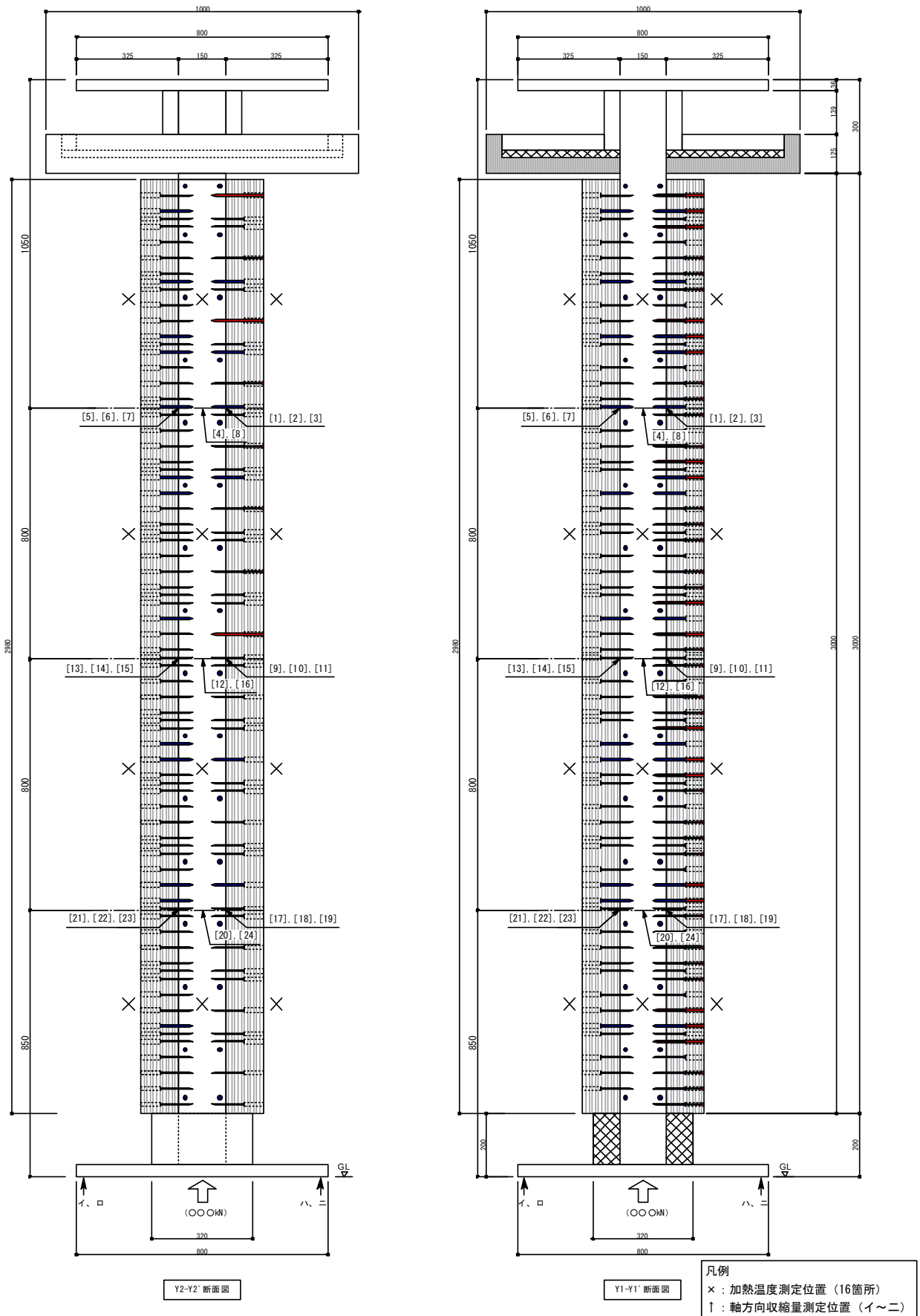


図 4.2.1.7 試験体の熱電対位置及び炭化場所



写真 4.2.1.1 製作時の様子

4. 2. 1. 2 実験結果

加熱開始後、540分で炉を開け、赤熱がないことを確認したのち再度炉を閉め、温度観測を継続した。加熱温度測定結果を図4.2.1.8、軸方向収縮量測定結果を図4.2.1.9、熱電対の内部温度曲線を図4.2.1.10に示した。炭化状況と記録写真を写真4.2.1.2～写真4.2.1.13に示す。

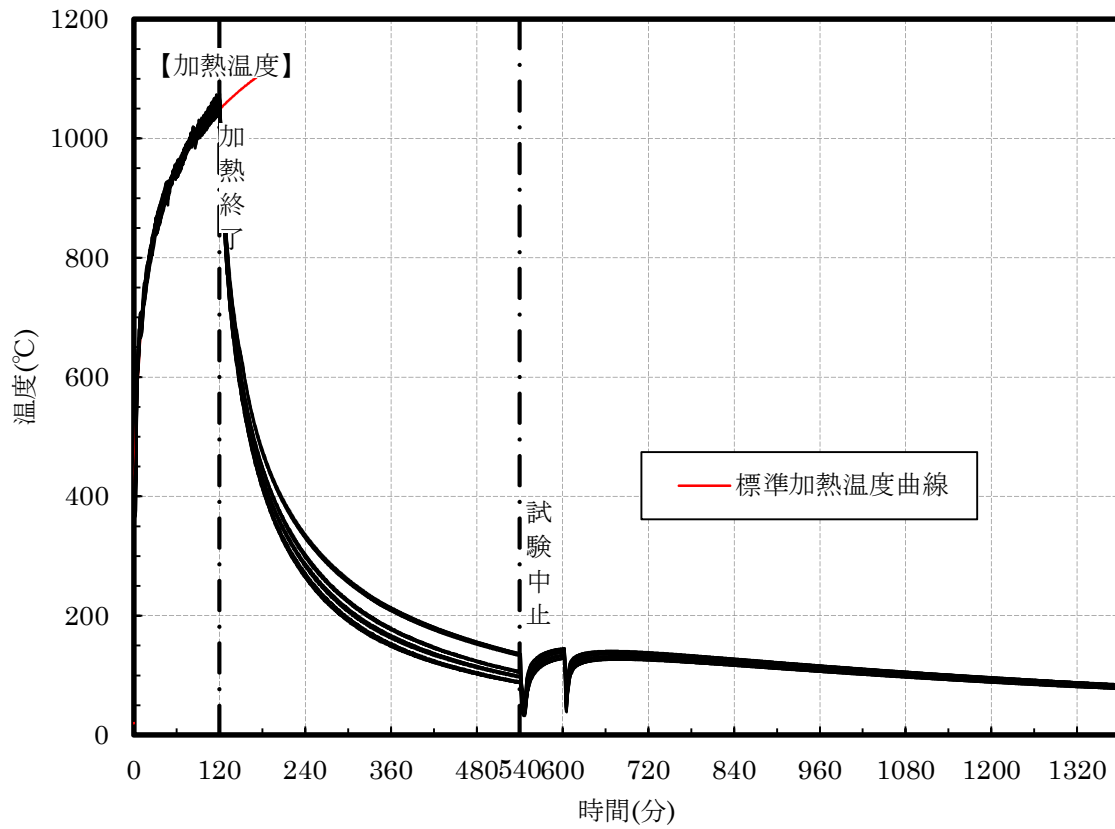


図 4.2.1.8 加熱温度測定曲線

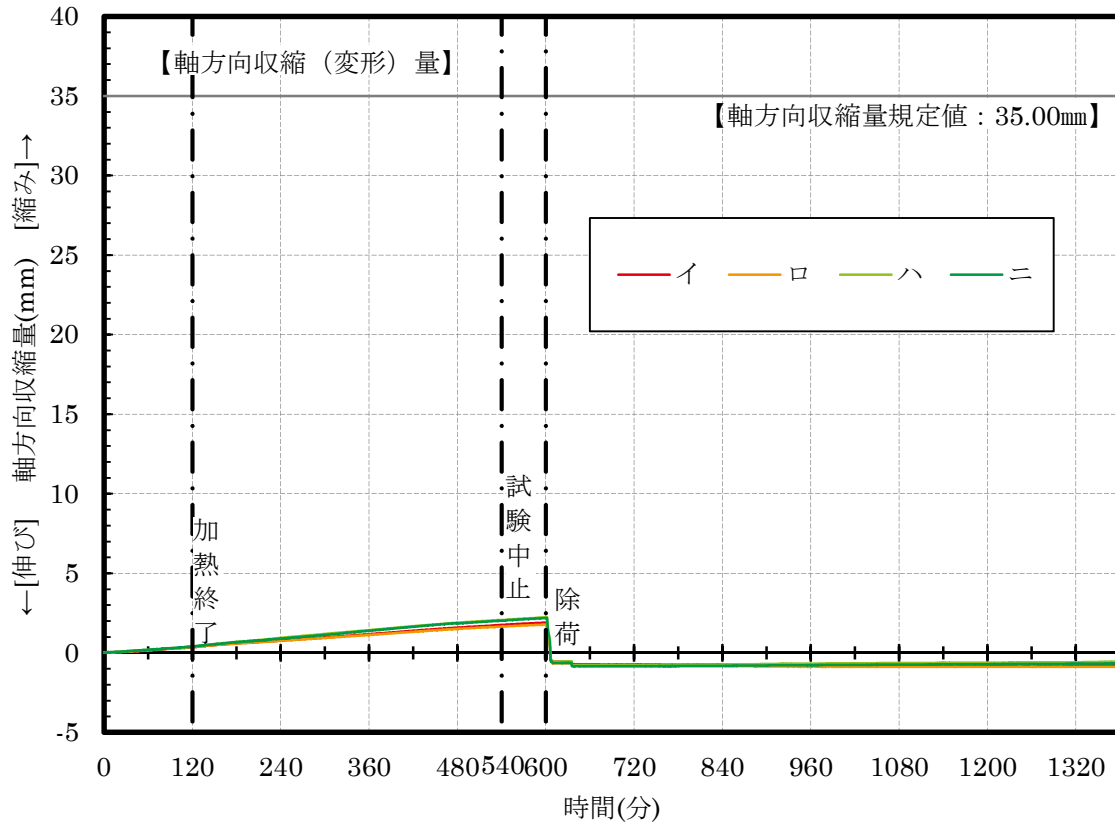


図 4.2.1.9 軸方向収縮量測定曲線

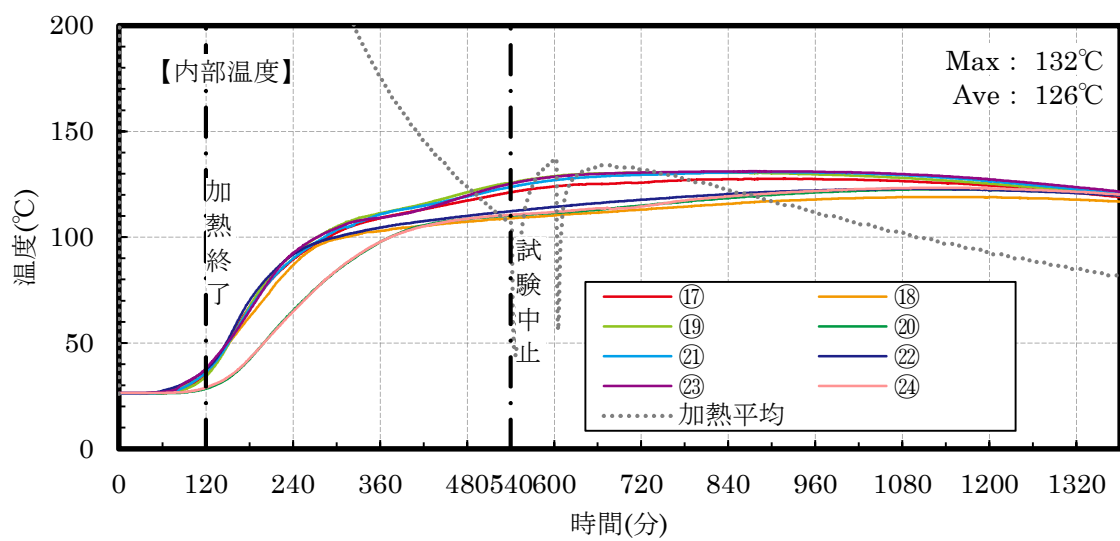
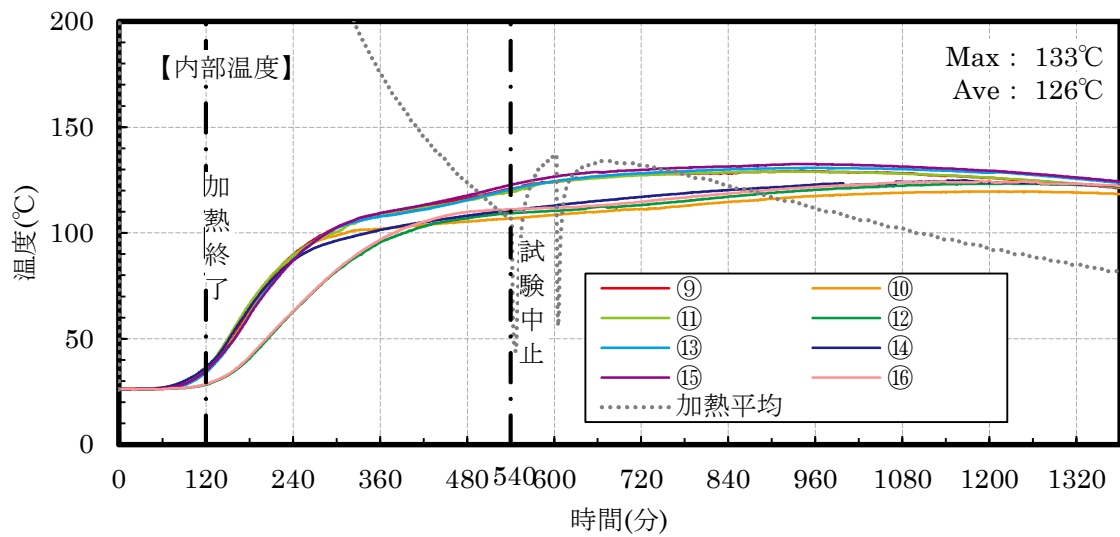
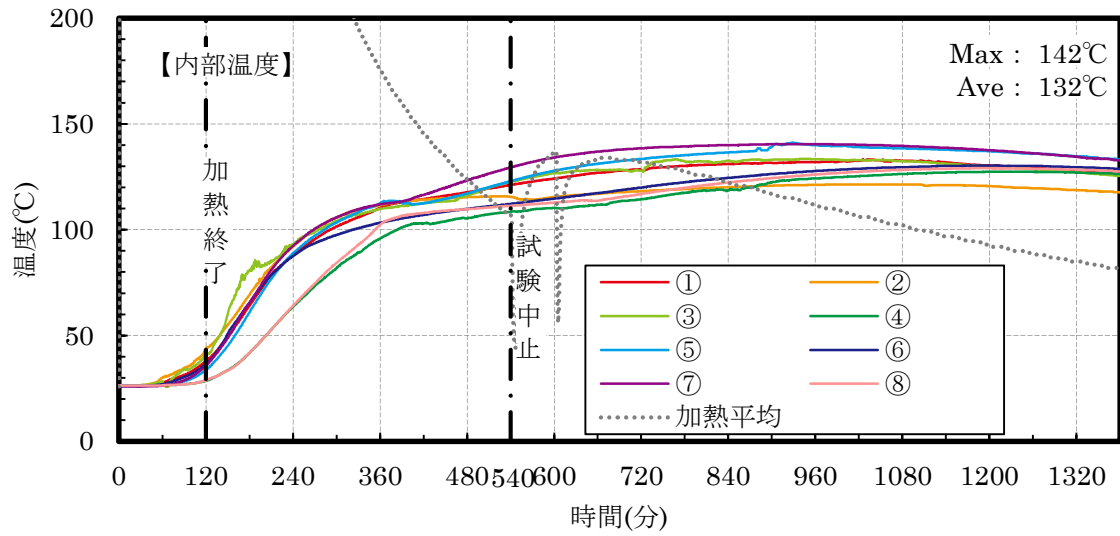


図 4.2.1.10 内部温度測定曲線



写真 4.2.1.2 加熱前

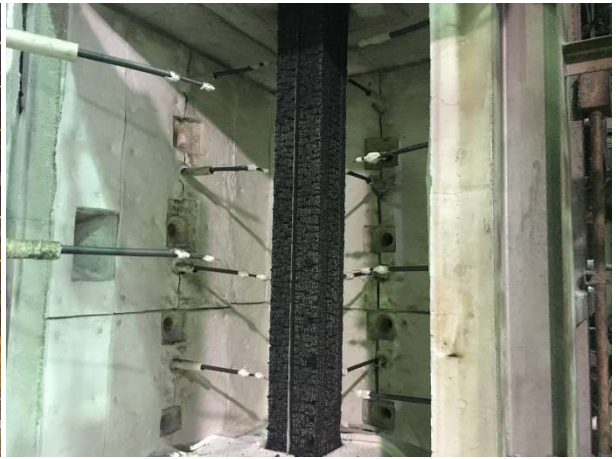


写真 4.2.1.3 加熱開始から 9h 後

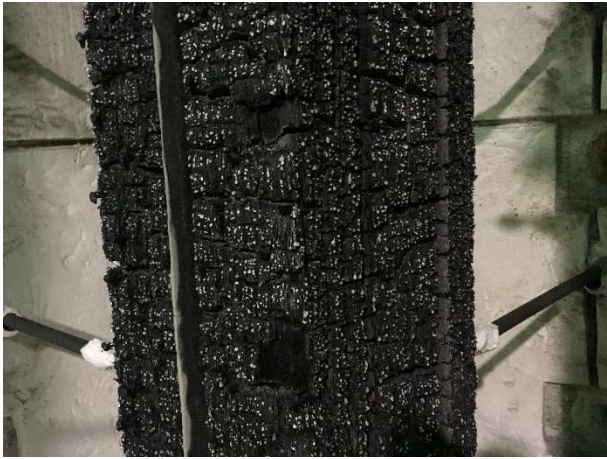


写真 4.2.1.4 加熱開始から 9h 後北西側



写真 4.2.1.5 東側



写真 4.2.1.6 西側



写真 4.2.1.7 南側



写真 4.2.1.8 北側



写真 4.2.1.9 下から 850 mmの断面



写真 4.2.1.10 下から 1750 mmの断面



写真 4.2.1.11 下から 2350 mmの断面



写真 4.2.1.12 柱上部の被覆材残存量



写真 4.2.1.13 エプトシーラーによる隙
間

4. 2. 1. 3 考察

9時57分に加熱開始して2時間後である11時57分に加熱を終了した。加熱開始後150分ごろからエプトシーラーを付けた南西側の上部角温度がやや高めだったが、徐々に安定してきて他熱電対温度と同じ曲線を描くようになった。

負け側の平部は始終低い温度を記録していて、勝側の目地部温度は加熱終了後上昇が鈍くなり負け側の平部温度曲線と合流した。

しかし、加熱開始後390分頃から熱電対温度がまた上昇し始めて加熱開始後9時間が経過しても上昇し続けている状況となった。

試験所の都合で、午後7時に給喚起措置の稼動を停止し一回炉蓋を開けて試験体の様子を確認したが、特に赤熱しているところは見られなかった。その後も継続して温度測定をし、加熱開始後15時間経過した時点で140℃程度を記録してそれ以降全ての熱電対温度の下降を確認し、試験終了となった。

試験体の上中下部の断面をカットし炭化性状を確認すると、どの断面も被覆材の残存量が50mm以上で、荷重支持部材の炭化は見られなかった。

今回は、四隅ともビスの本数や木栓の有無について異なる構成にして試したが、どれも大きな差は見られなかった。更に、南西側の被覆材同士の接合部は、ビスの数を減らしたため、エプトシーラーを充填して万一被覆材接合部が開いた場合でも、火の浸透速度を遅くする工夫をしている。しかし、被覆材及び荷重支持部材が微細に斜めだったため、施工時に3mm程度開いていた。その部分も断面カットで特に問題なかったことが確認できた。

4. 2. 2 被覆材厚み 95mm

4. 2. 1 で行った被覆材厚みの被覆材の厚みを減らし、3枚合わせ厚み 95mm として 2 時間耐火性能を有するかの確認試験を行った。試験体は大阪の東亜理科にて 11 月 2 日に製作した。

4. 2. 2. 1 実験概要

2 時間耐火性能を目標に製作した 4 面加熱の試験体は、一般財団法人日本建築総合試験所の柱炉を使用し、「防耐火性能・標準業務方法書」に準拠して载荷加熱試験を行った。図 4.2.2.1 に柱炉の試験装置図を示す。試験実施日は、平成 30 年 11 月 19 日であった。

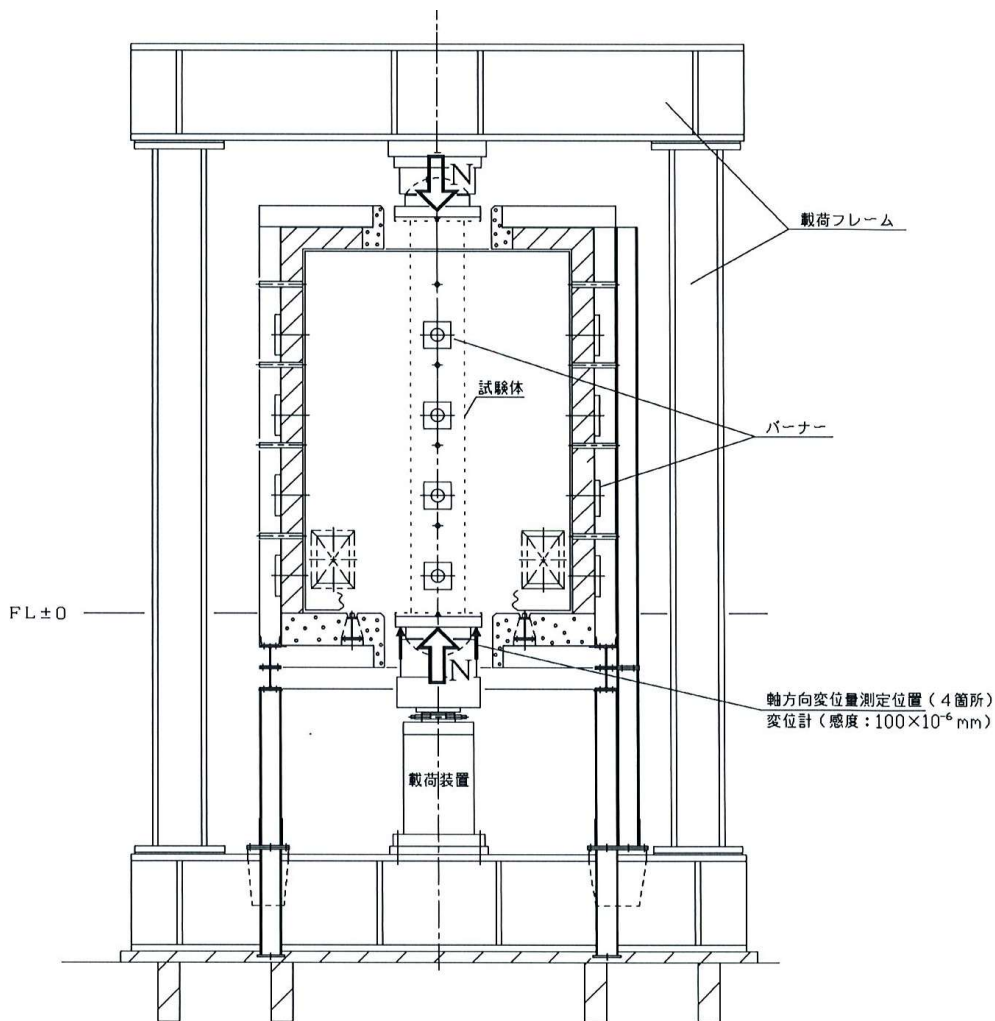


図 4.2.2.1 試験装置図

(1) 加熱方法

ISO834 に規定する標準加熱曲線に準拠した加熱を行った。軸方向変形が進み、載荷の継続が困難となった場合に試験を中止する事とした。

(2) 載荷方法

試験荷重Nは、長期許容圧縮応力度($f_c=4.687\text{N/mm}^2$)より算出した。

試験荷重 $N=4.687\text{N/mm}^2 \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ (有効断面積)=105.5kN

ただし、 $F=20.6\text{N/mm}^2$, $lk=3500\text{ mm}$ (座屈長さ)とし、 f_c を算出した。

(3) 測定項目

- ①試験体内部温度
- ②炉内温度
- ③軸方向収縮(変形)量
- ④炭化状況

試験終了後、試験体各部を切断し、加熱後の炭化深さ及び残存断面を測定した

⑤含水率

試験体に使用した構造用集成材の端部から作成されたサンプルを 105°Cの絶乾状態に設定した恒温器を用いて 12 日間養生した後、重量減少を測定して、含水率を測定した。含水率は次式から求めた。

$$\text{含水率(\%)} = ((\text{絶乾前の重量} - \text{絶乾後の重量}) \div \text{絶乾後の重量}) \times 100$$

⑥その他

試験体の目視観察、写真撮影等を行った。

3. 試験体概要

試験体は断面寸法 150×150 mmの同一等級構成構造用集成材を構造部材とする試験体について載荷加熱試験を実施した。加熱試験体の構成部材、組立仕様などの試験体仕様の一覧を製作時の様子を表 4.2.2.1～2 と図 4.2.2.2～7、写真 4.2.2.1 に示す。

表 4.2.2.1 試験体構成材料 (寸法単位:mm)

項目	試験体の構造
荷重支持部材	<ul style="list-style-type: none">・材質 同一等級構成構造用集成材(日本農林規格に適合するもの)・樹種 カラマツ・比重 0.583 (気乾、実測値)・断面寸法 150×150
被覆材	[1]単板積層材 <ul style="list-style-type: none">・材質 りん・窒素系薬剤処理単板積層材・薬剤含浸量 140～149kg/m³・厚さ 95(厚さ 31.5 の板を積層)

表 4.2.2.2 試験体構成材料留付材 (寸法単位:mm)

項 目	試験体の構造
留付材	<p>[1]被覆材留付用</p> <p>[1]-1 ねじ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 鉄鋼 ・寸法 $\phi 5 \text{ mm} \times \text{L}90 \text{ mm}$ ・留付間隔 200 以下 <p>[1]-2 接着剤</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 ウレタン系樹脂接着剤 ・塗布量 300 g/m^2 <p>[1]-3 木栓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 広葉樹 ・寸法 $\phi 12$

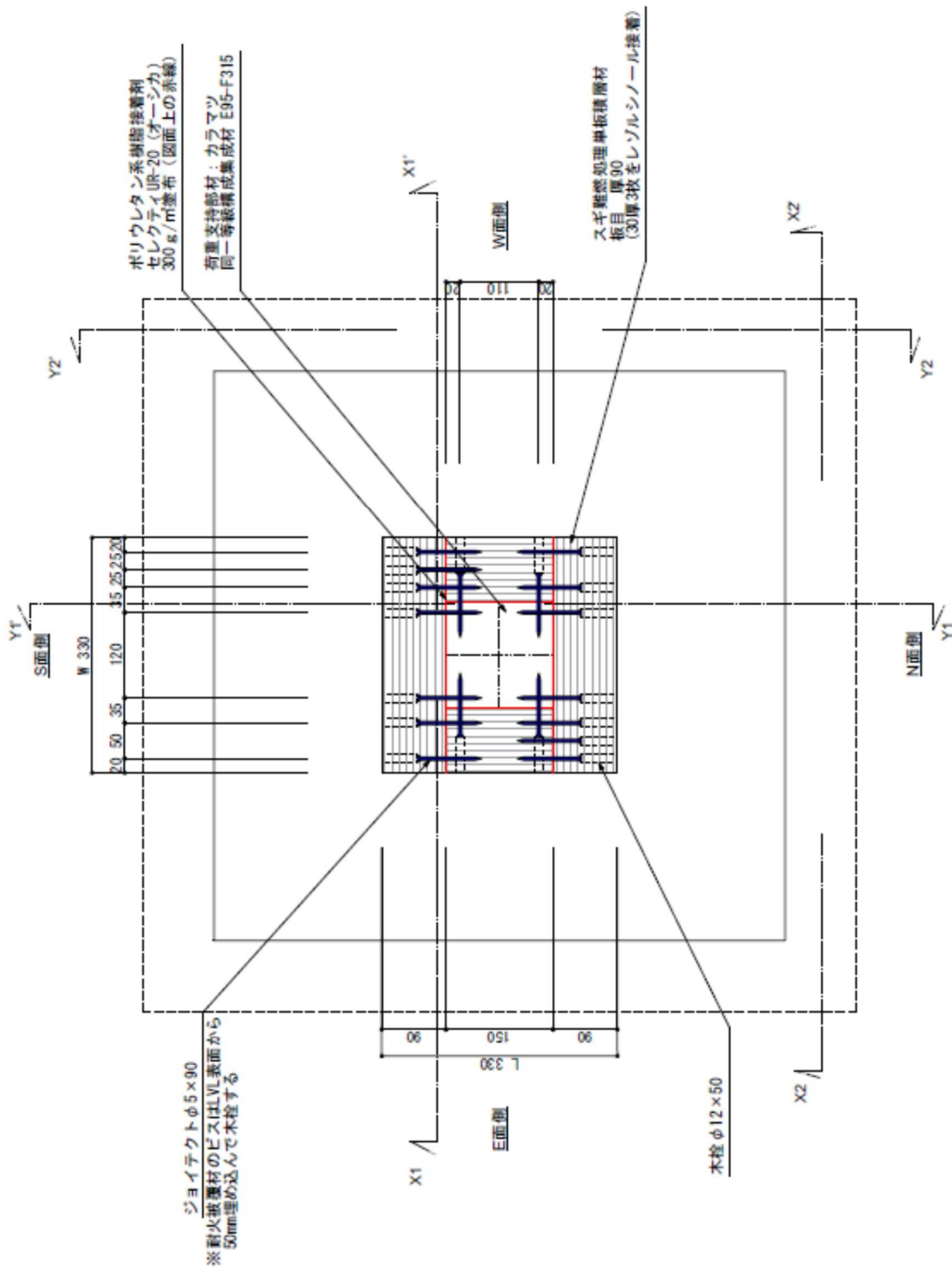


図 4.2.2.2 試験体の構造及び寸法

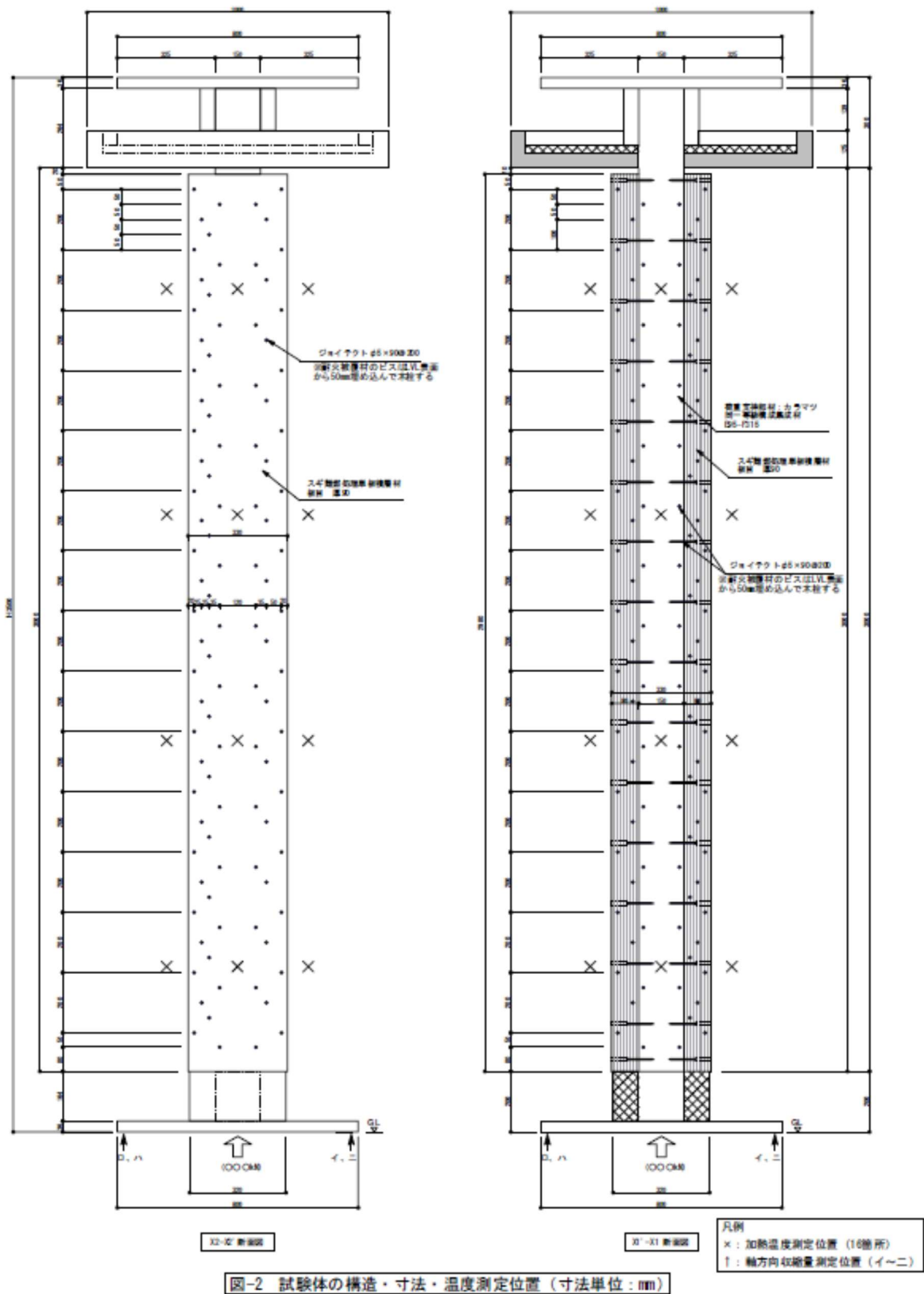


図 4.2.2.3 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (X 通り①)

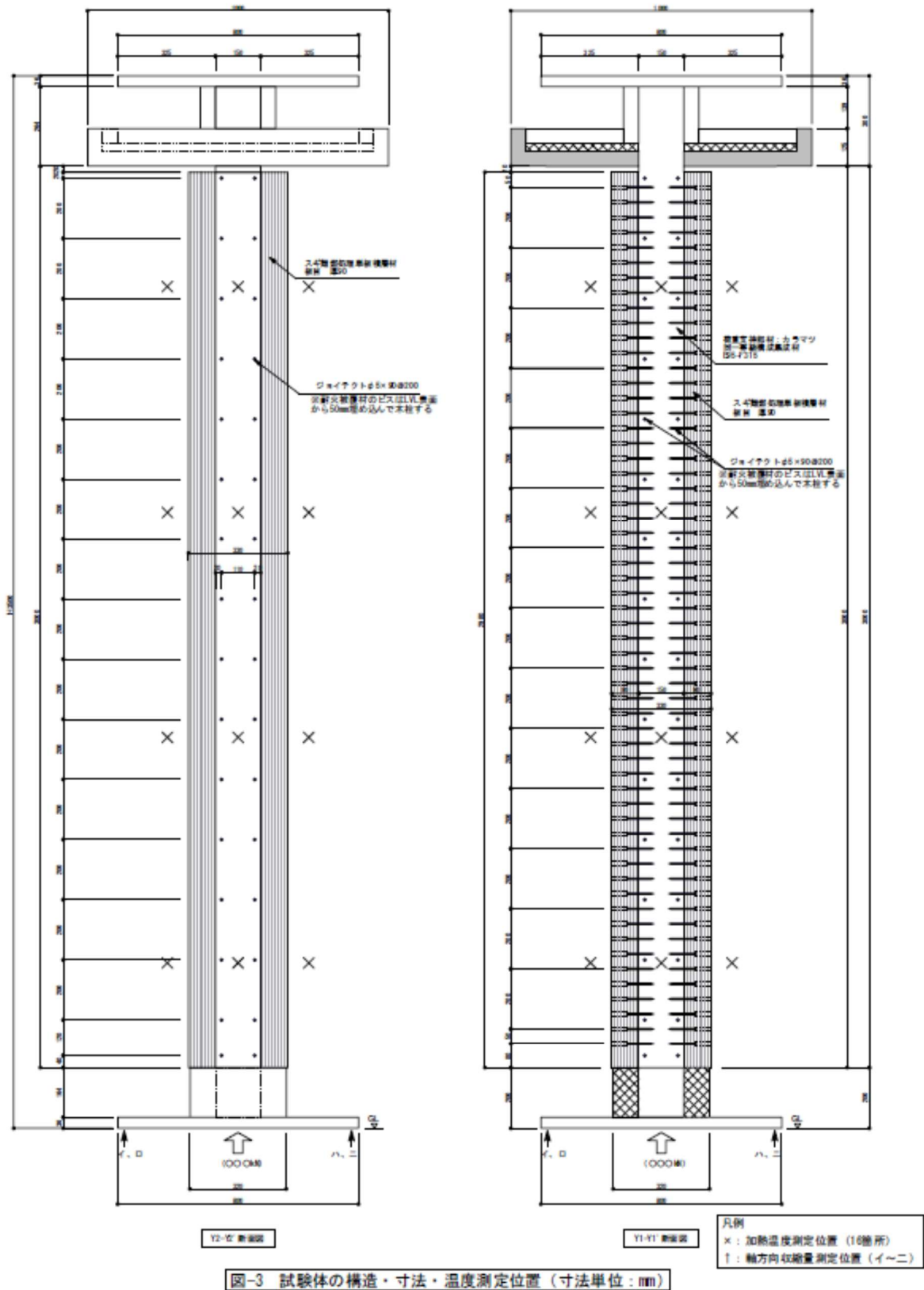


図 4.2.2.4 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (X 通り②)

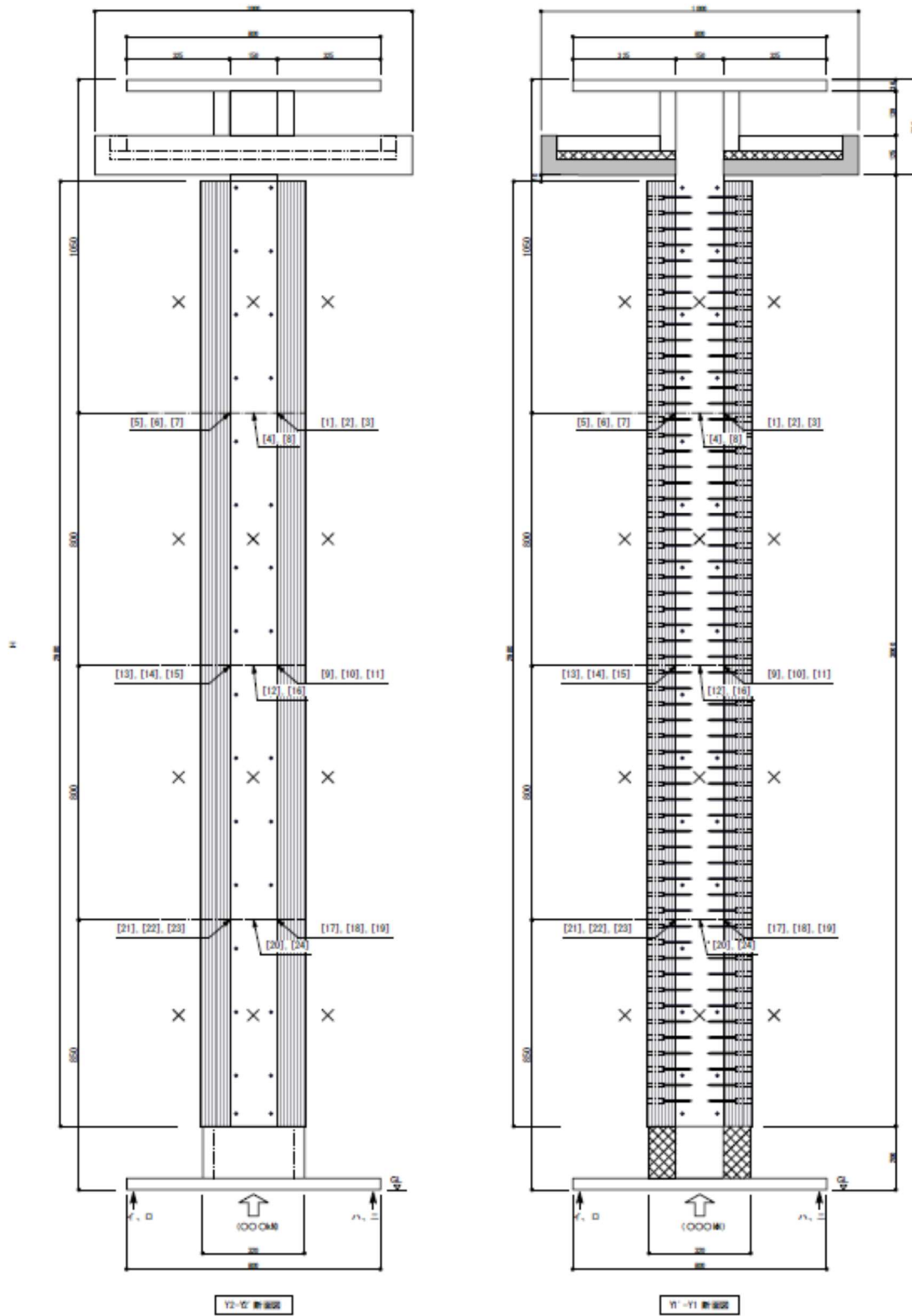


図 4.2.2.5 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (Y 通り)

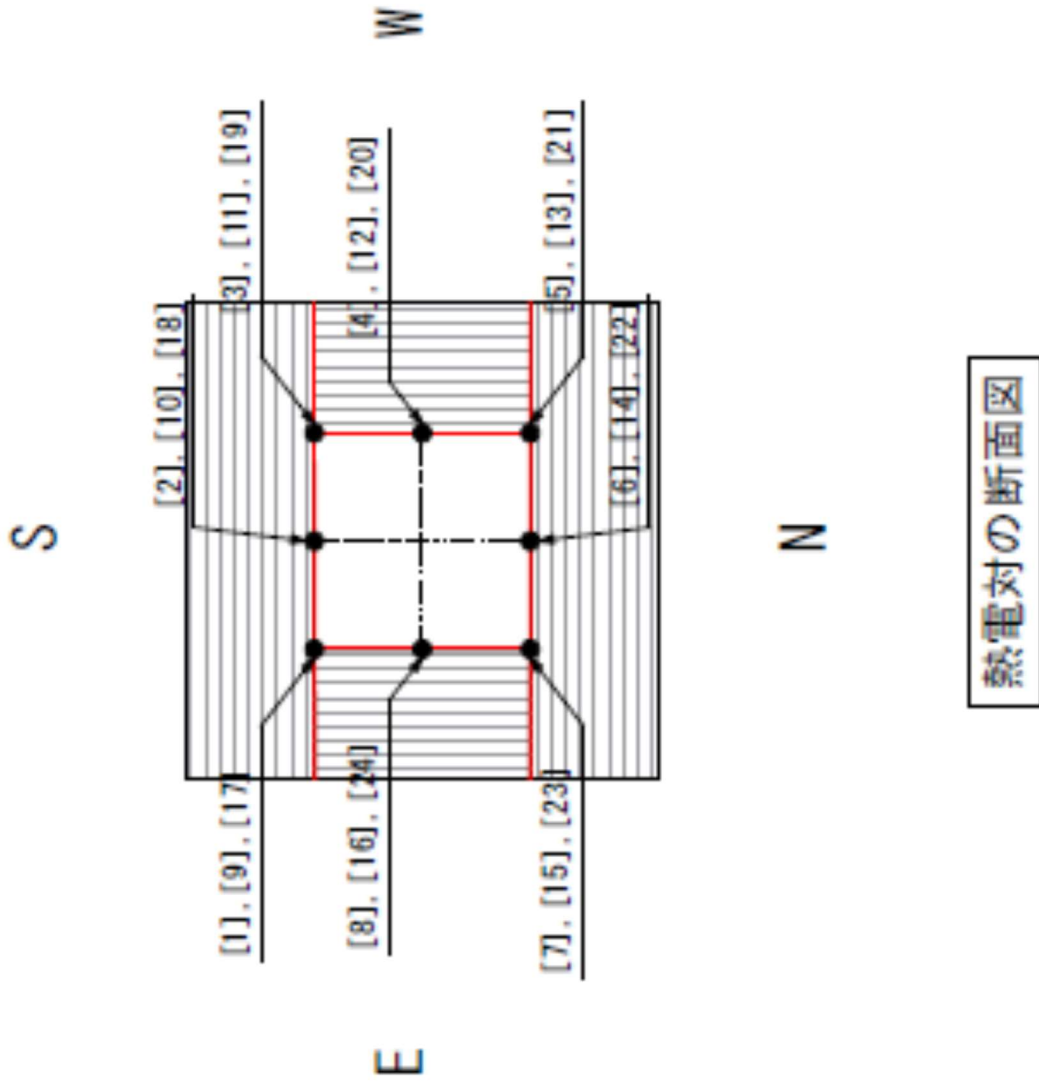


図 4.2.2.6 試験体の熱電対位置

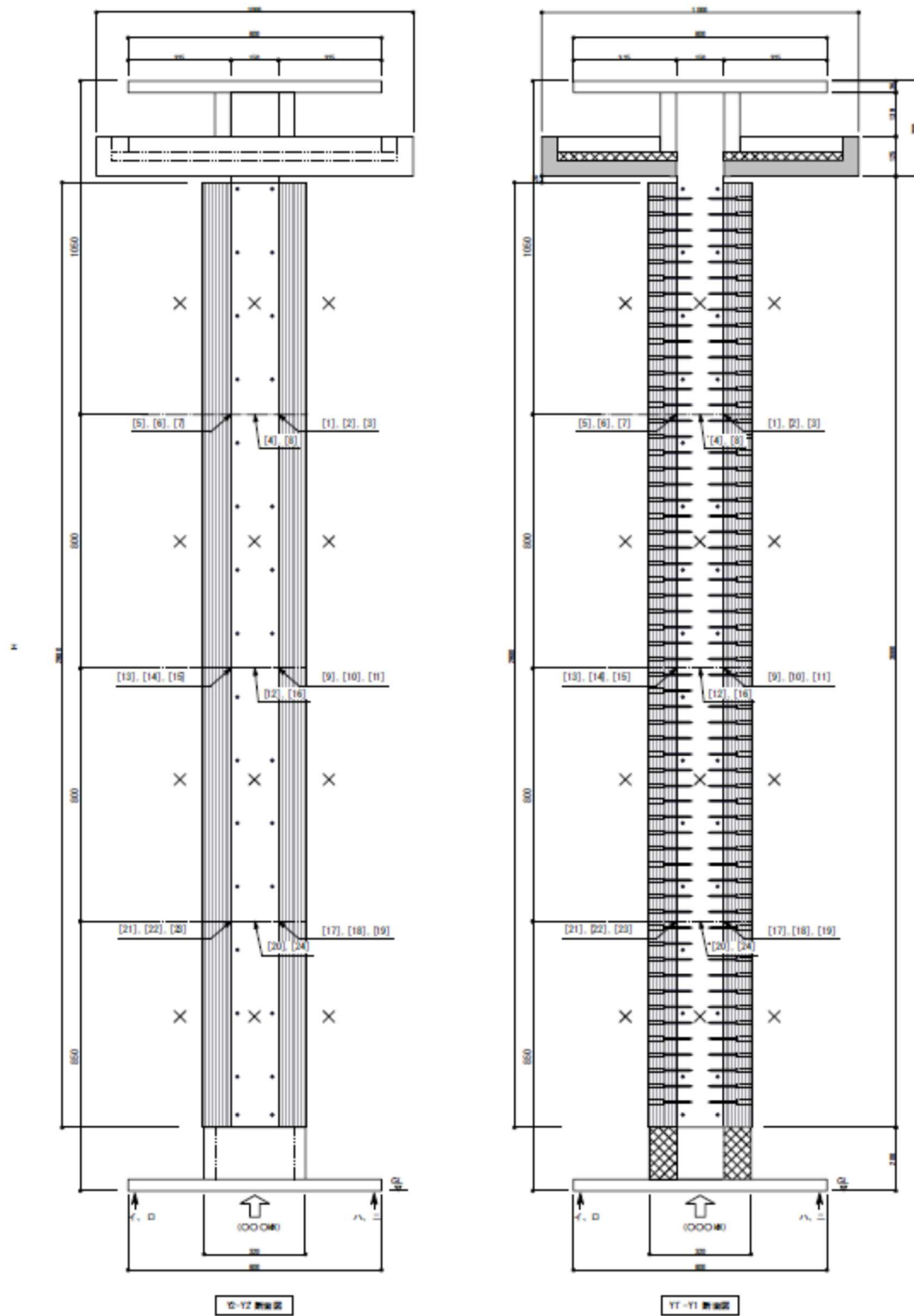


図 4.2.2.7 試験体の熱電対位置

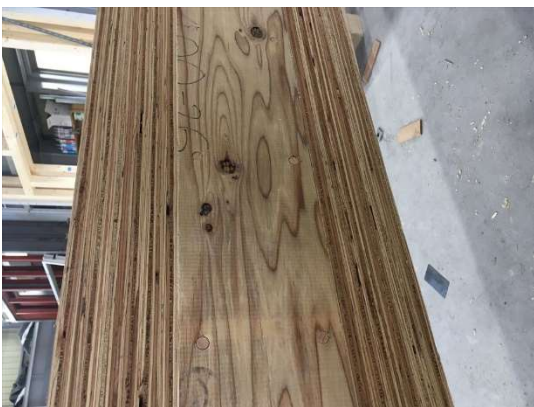


写真 4.2.2.1 製作時の様子

4. 2. 1. 2 実験結果

加熱開始後、試験場の都合で夜間は試験を行えないため、480分で試験を終了した。加熱温度測定結果を図4.2.2.8、軸方向収縮量測定結果を図4.2.2.9、熱電対の内部温度曲線を図4.2.2.10に示した。炭化状況と記録写真を写真4.2.2.2～写真4.2.2.13に示す。

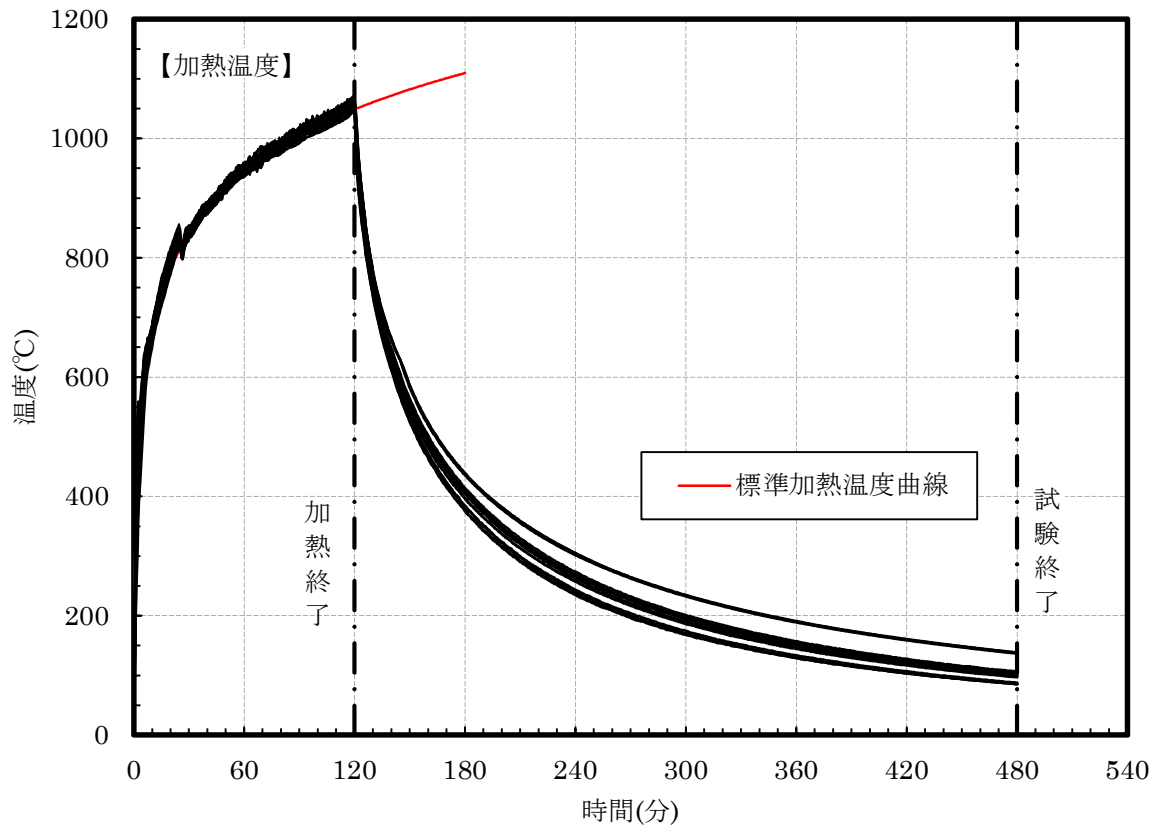


図 4.2.2.8 加熱温度測定曲線

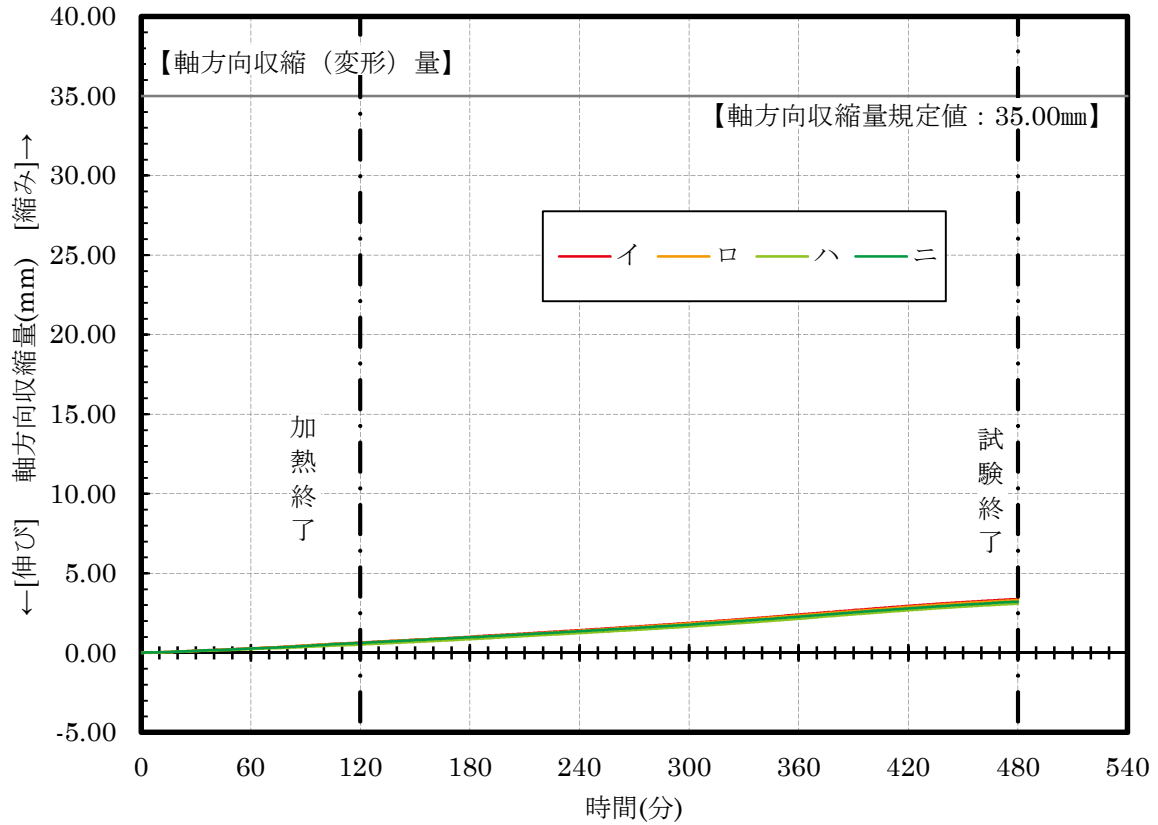


図 4.2.2.9 軸方向収縮量測定曲線

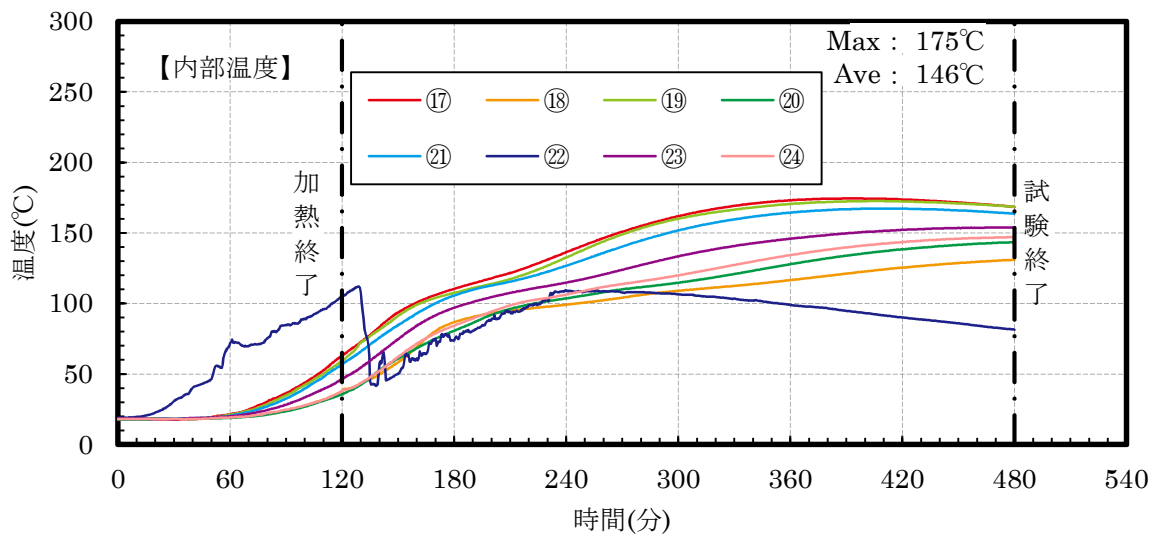
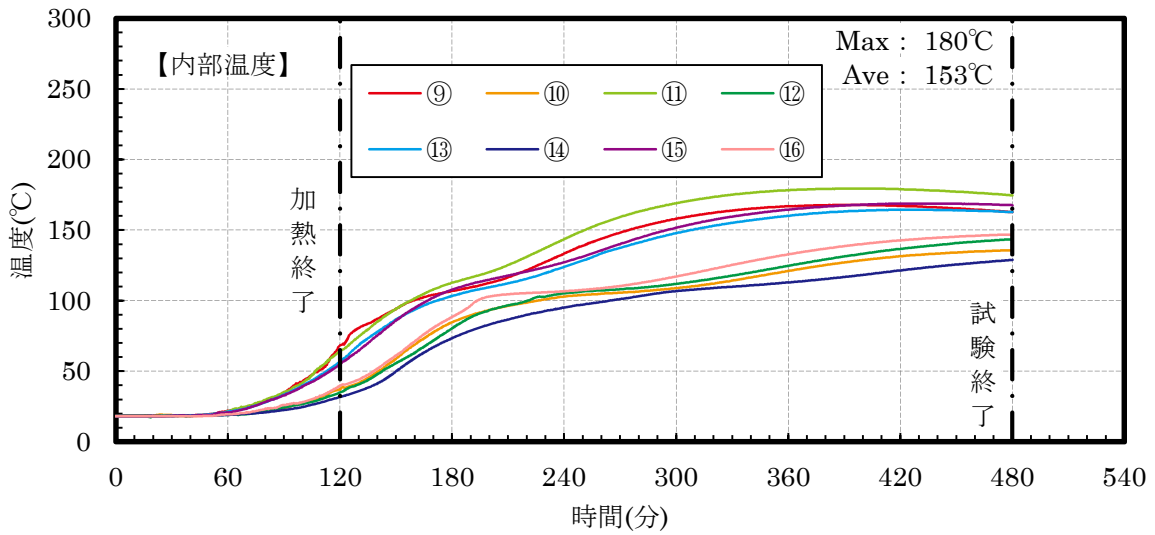
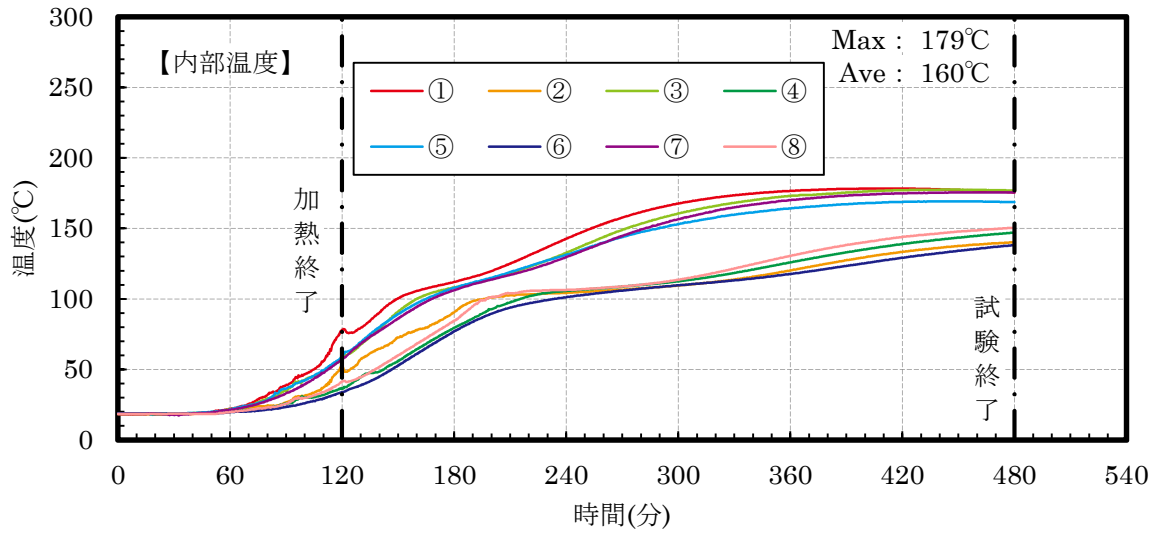


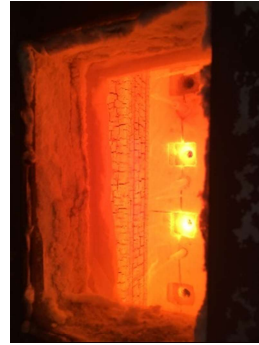
図 4.2.2.10 内部温度測定曲線



写真 4.2.2.2 加熱前



写真 4.2.2.3 45分加熱後



90分加熱後



写真 4.2.2.4 脱炉直後



写真 4.2.2.5 脱炉直後 下部



写真 4.2.2.6 東側



写真 4.2.2.7 南側

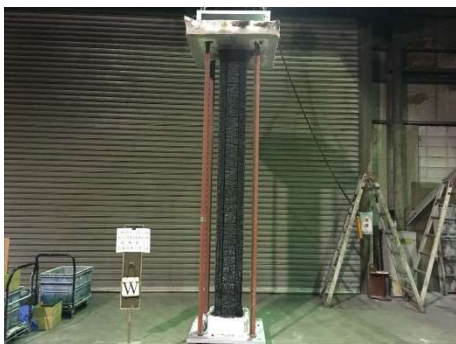


写真 4.2.2.8 西側



写真 4.2.2.9 北側



写真 4.2.2.10 断面カット

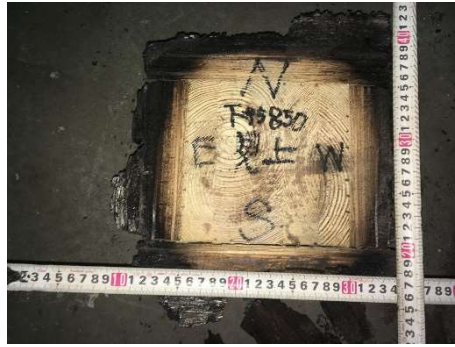


写真 4.2.2.11 断面 下から 850mm



写真 4.2.2.12 断面 下から 1650mm



写真 4.2.2.13 断面 下から 2450mm



写真 4.2.2.14 被覆材接着状況

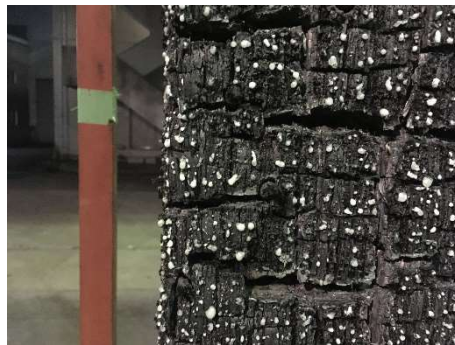


写真 4.2.2.15 難燃薬剤析出（白色）



写真 4.2.2.16 隅部開き



写真 4.2.2.17 隅部ビスまでの燃え込み

4. 2. 2. 3 考察

10時05分に加熱開始して2時間後である12時05分に加熱を終了し、8時間後の18時05分に脱炉した。炉内温度は3時間後には420度、4時間後には300度と、9月に行った120mm厚の時より20度ほど早く温度が低下した。内部温度は8時間後までの最大で、隅部で180℃、平部で160℃であった。8時間経過時の温度推移は、隅部は温度が下がり始めるか、上昇がほぼ止まっていた。平部はほとんどの箇所温度が上昇中であった。下部隅部の24番に関しては、他の熱電対に比べて異常に高い温度を示していた。加熱を留めた直後に50度以上の温度低下を示し、その後もおかしい数値を示したことから、何らかの異常値を示していたと考えられる。

試験体の上中下部の断面をカットし炭化性状を確認した。3断面とも、荷重支持部材の炭化は見られなかった。被覆材の残存量は平部で50mm程度、隅部は5mm程度であった。

隅部のビス止め本数は2種類を設定したが、大きな差は見られなかった。

4. 3 性能評価試験

4. 3. 1 性能評価 1 体目

4. 2. 2で検討した被覆材厚み 95 mmの仕様は 2 時間耐火性能を十分に満たすことがわかった。ので、材料製作と施工手間、材料コストの面から、本試験の被覆材の厚みを 3 枚合わせとした。隅部のビス本数は 2 本と 3 本との間で性能に差が無かったことから、施工手間の少ない 2 本とした。試験体は大阪の東亜理科にて 12 月 26 日に製作した。

4. 3. 1. 1 実験概要

2 時間耐火性能を目標に製作した 4 面加熱の試験体は、一般財団法人日本建築総合試験所の池田試験所の柱炉を使用し、「防耐火性能・標準業務方法書」に準拠して載荷加熱試験を行った。図 4.3.1.1 に柱炉の試験装置図を示す。試験実施日は、平成 31 年 1 月 24 日から 25 日。

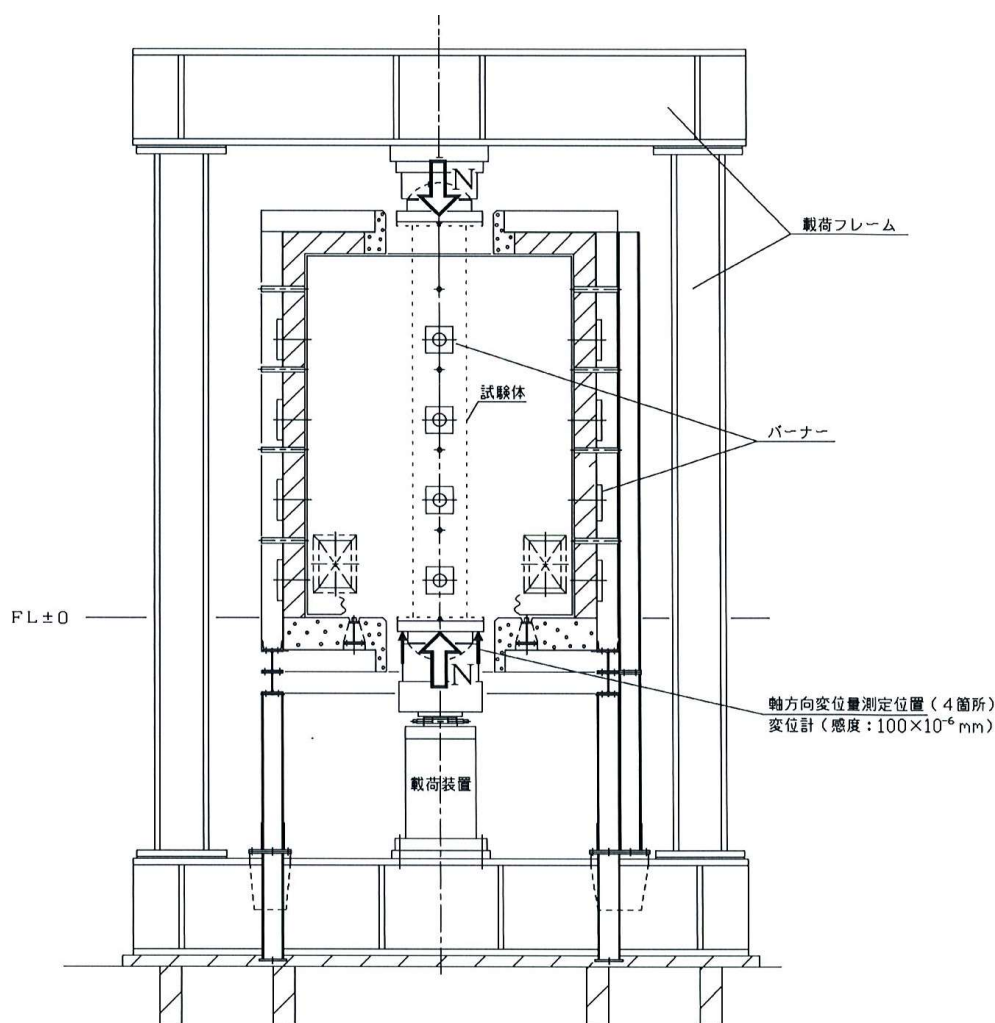


図 4.3.1.1 試験装置図

(1) 加熱方法

ISO834 に規定する標準加熱曲線に準拠した加熱を行った。軸方向変形が進み、載荷の継続が困難となった場合に試験を中止する事とした。

(2) 載荷方法

試験荷重Nは、長期許容圧縮応力度($f_c=4.687\text{N/mm}^2$)より算出した。

試験荷重 $N=4.687\text{N/mm}^2 \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ (有効断面積)=105.5kN

ただし、 $F=20.6\text{N/mm}^2$, $l_k=3500\text{mm}$ (座屈長さ)とし、 f_c を算出した。

(3) 測定項目

①試験体内部温度

②炉内温度

③軸方向収縮(変形)量

④炭化状況

試験終了後、試験体各部を切断し、加熱後の炭化深さ及び残存断面を測定した

⑤含水率

試験体に使用した構造用集成材の端部から作成されたサンプルを 105℃の絶乾状態に設定した恒温器を用いて 12 日間養生した後、重量減少を測定して、含水率を測定した。含水率は次式から求めた。

$$\text{含水率(\%)} = ((\text{絶乾前の重量} - \text{絶乾後の重量}) \div \text{絶乾後の重量}) \times 100$$

⑥その他

試験体の目視観察、写真撮影等を行った。

試験体は断面寸法 150×150 mmの同一等級構成構造用集成材を構造部材とする試験体について載荷加熱試験を実施した。加熱試験体の構成部材、組立仕様などの試験体仕様の一覧を製作時の様子を表 4.3.1.1～2 と図 4.3.1.2～7、写真 4.3.1.1 に示す。

表 4.3.1.1 試験体構成材料 (寸法単位:mm)

項目	試験体の構造
荷重支持部材	<ul style="list-style-type: none">・材質 同一等級構成構造用集成材(日本農林規格に適合するもの)・樹種 カラマツ・比重 0.48 (気乾、実測値)・断面寸法 150×150
被覆材	[1]単板積層材 <ul style="list-style-type: none">・材質 りん・窒素系薬剤処理単板積層材・薬剤含浸量 140～149kg/m³・厚さ 90(厚さ 30 の板を積層)

表 4.3.1.2 試験体構成材料留付材 (寸法単位:mm)

項 目	試験体の構造
留付材	<p>[1]被覆材留付用</p> <p>[1]-1 ねじ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 鉄鋼 ・寸法 $\phi 5 \text{ mm} \times L90 \text{ mm}$ ・留付間隔 200 以下 <p>[1]-2 接着剤</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 ウレタン系樹脂接着剤 ・塗布量 300 g/m^2 <p>[1]-3 木栓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 広葉樹 ・寸法 $\phi 12$

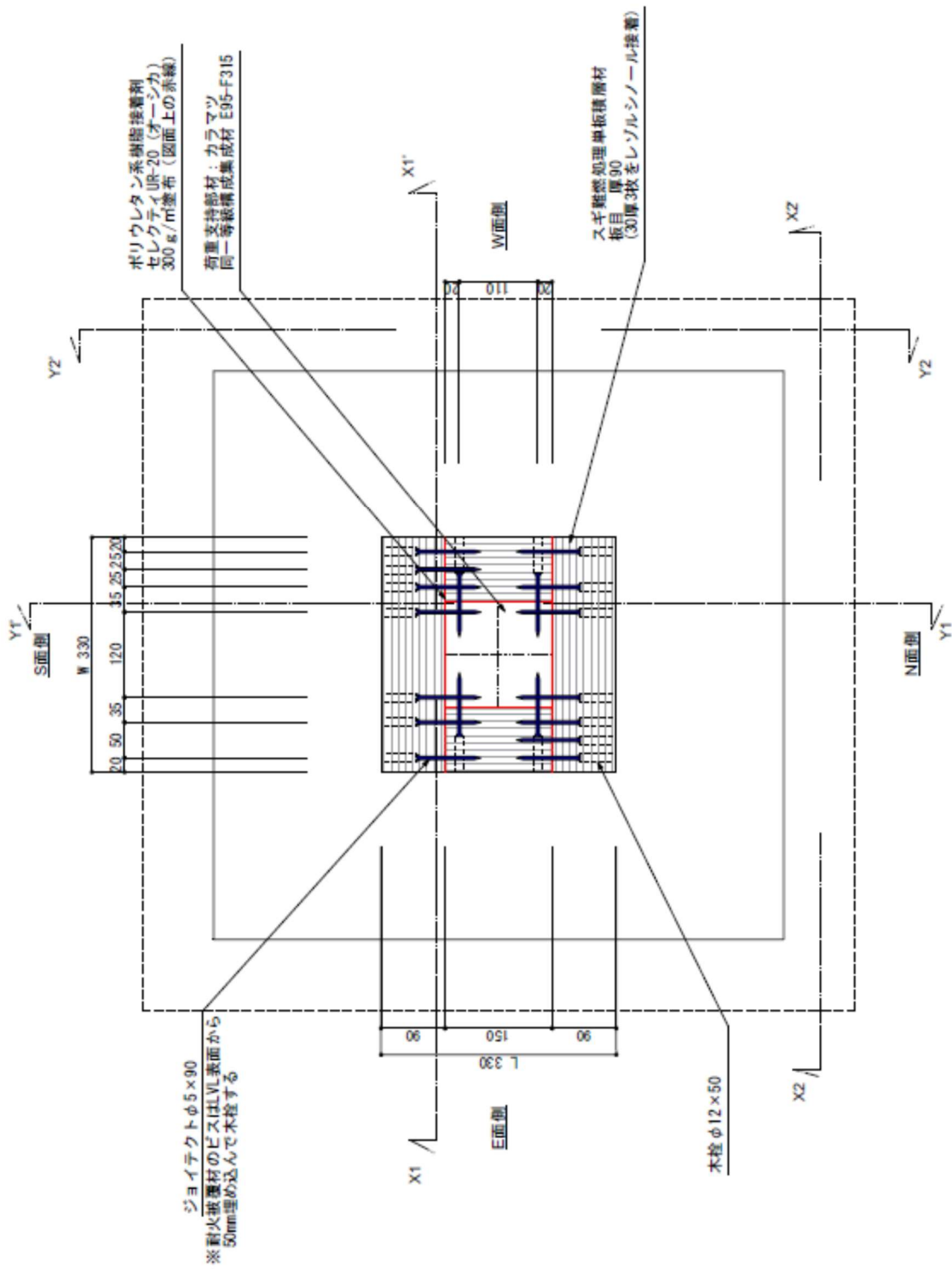


図 4.3.1.2 試験体の構造及び寸法

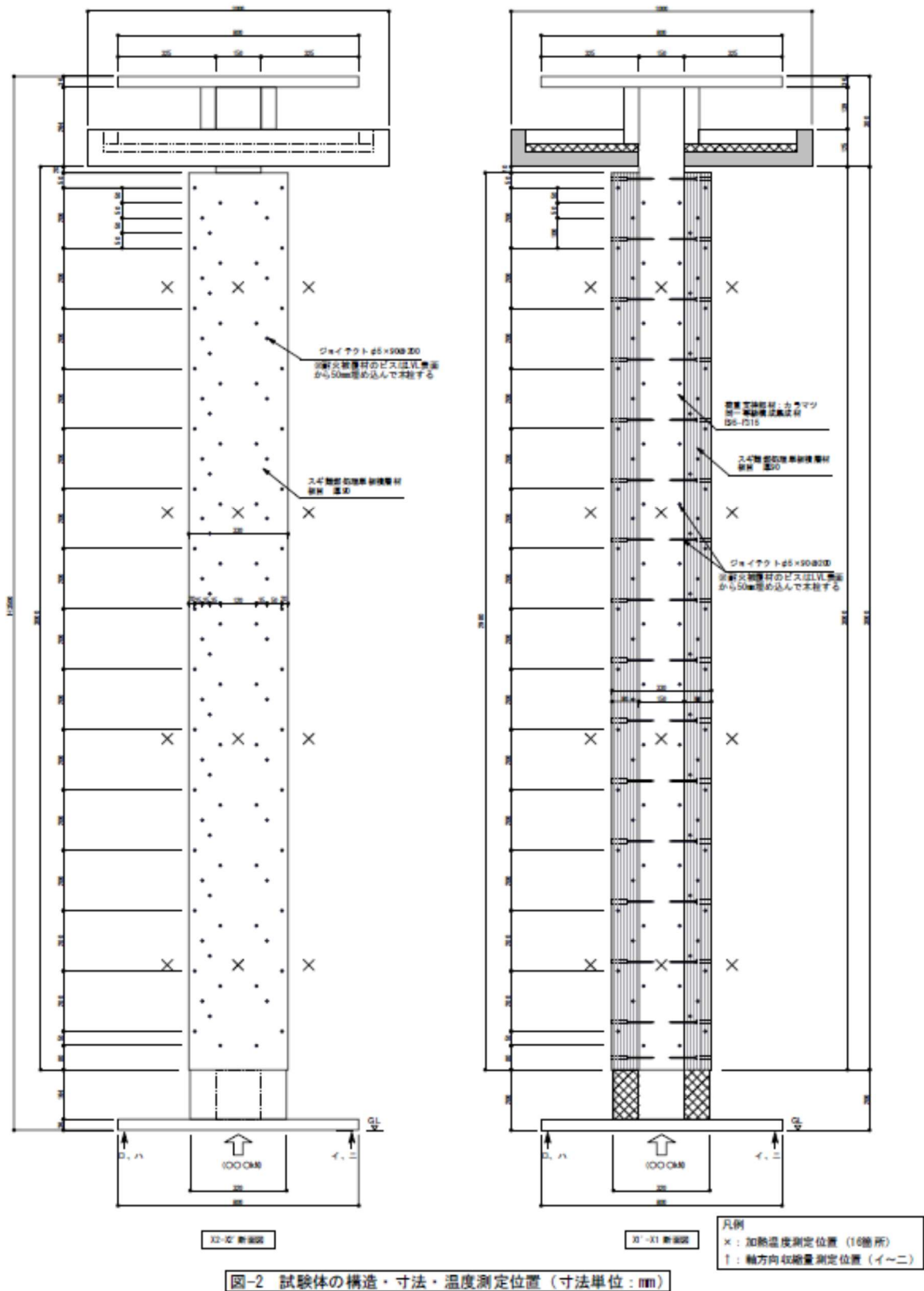


図 4.3.1.3 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (X 通り①)

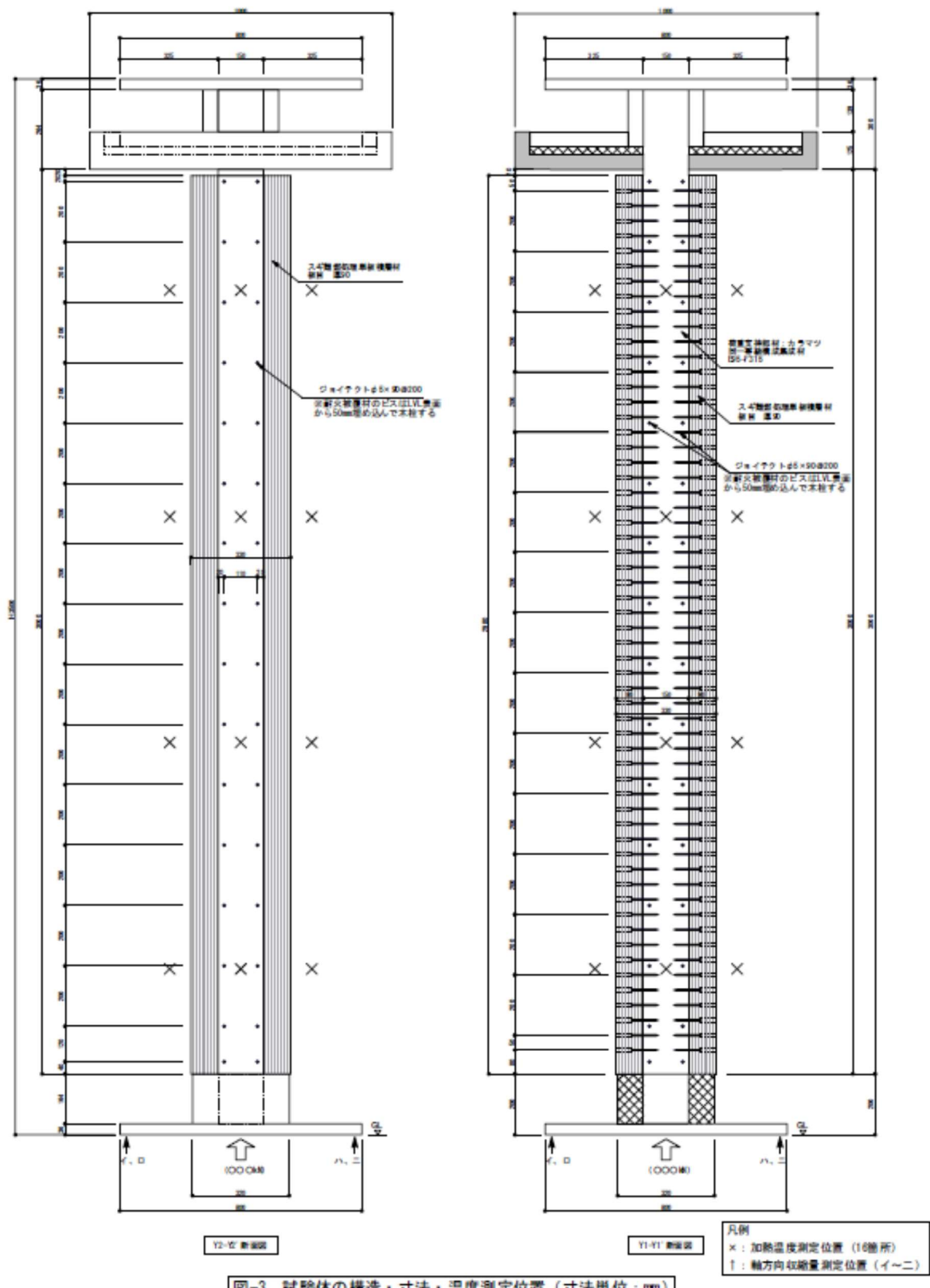


図-3 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (寸法単位: mm)

図 4.3.1.4 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (X 通り②)

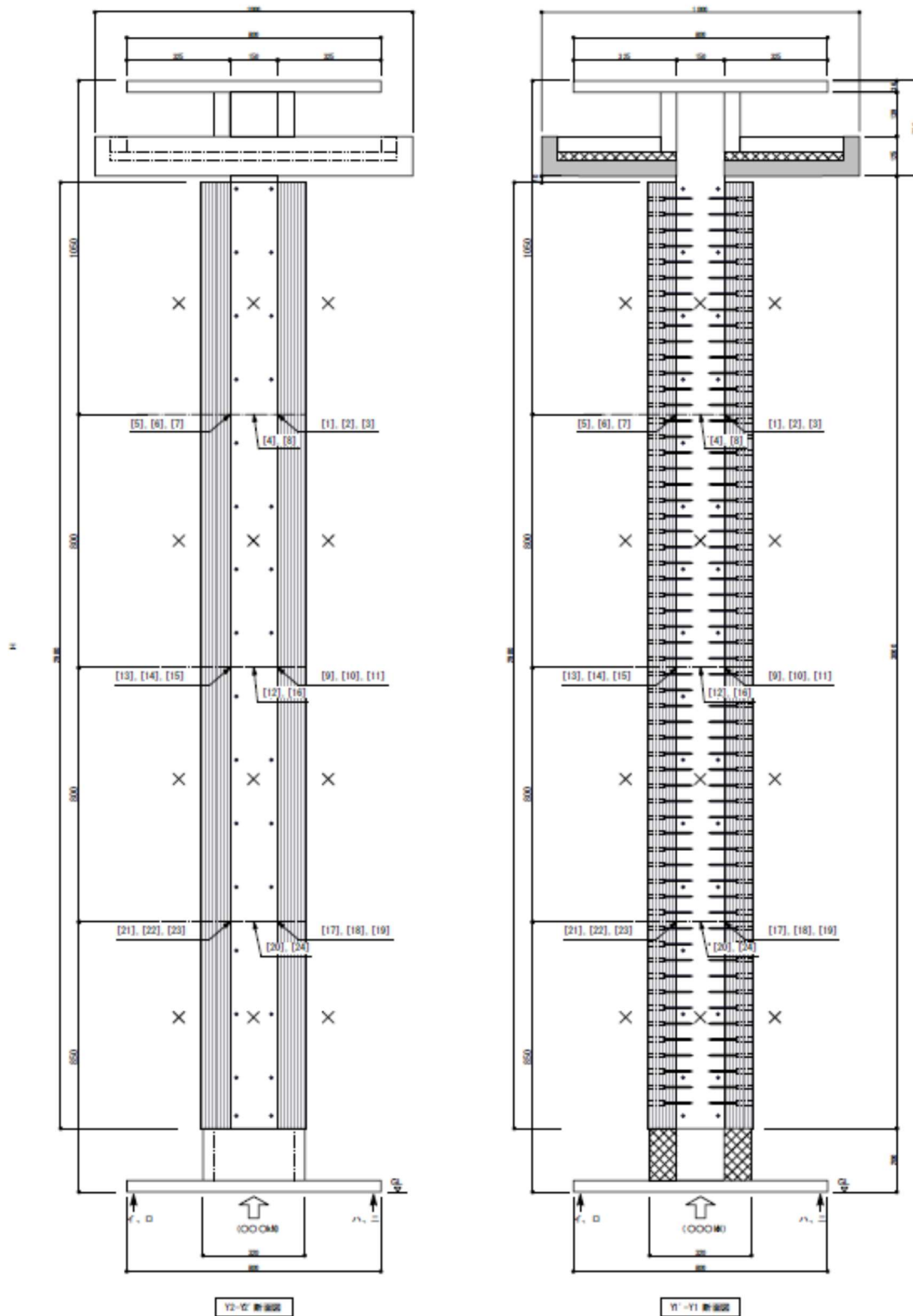


図 4.3.1.5 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (Y 通り)

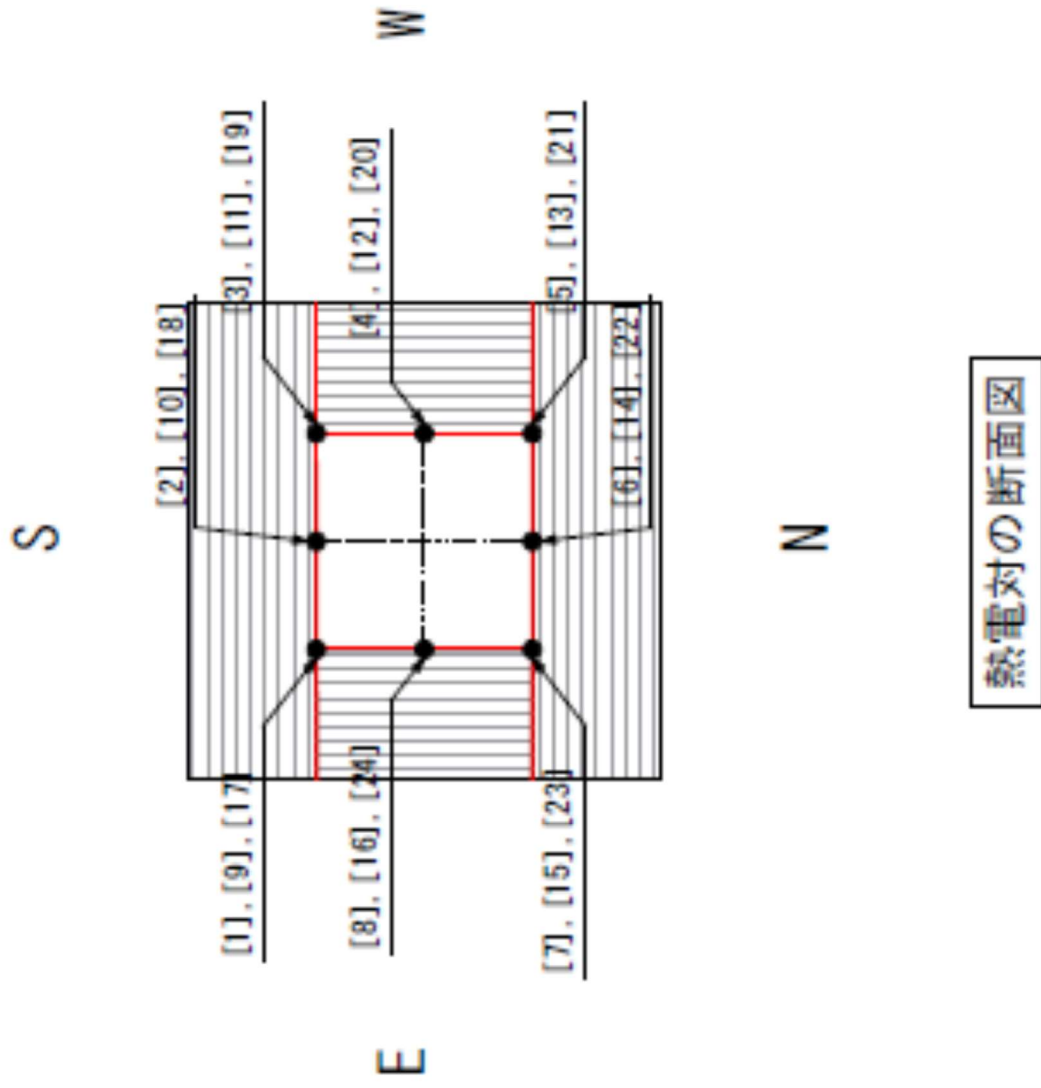


図 4.3.1.6 試験体の熱電対位置

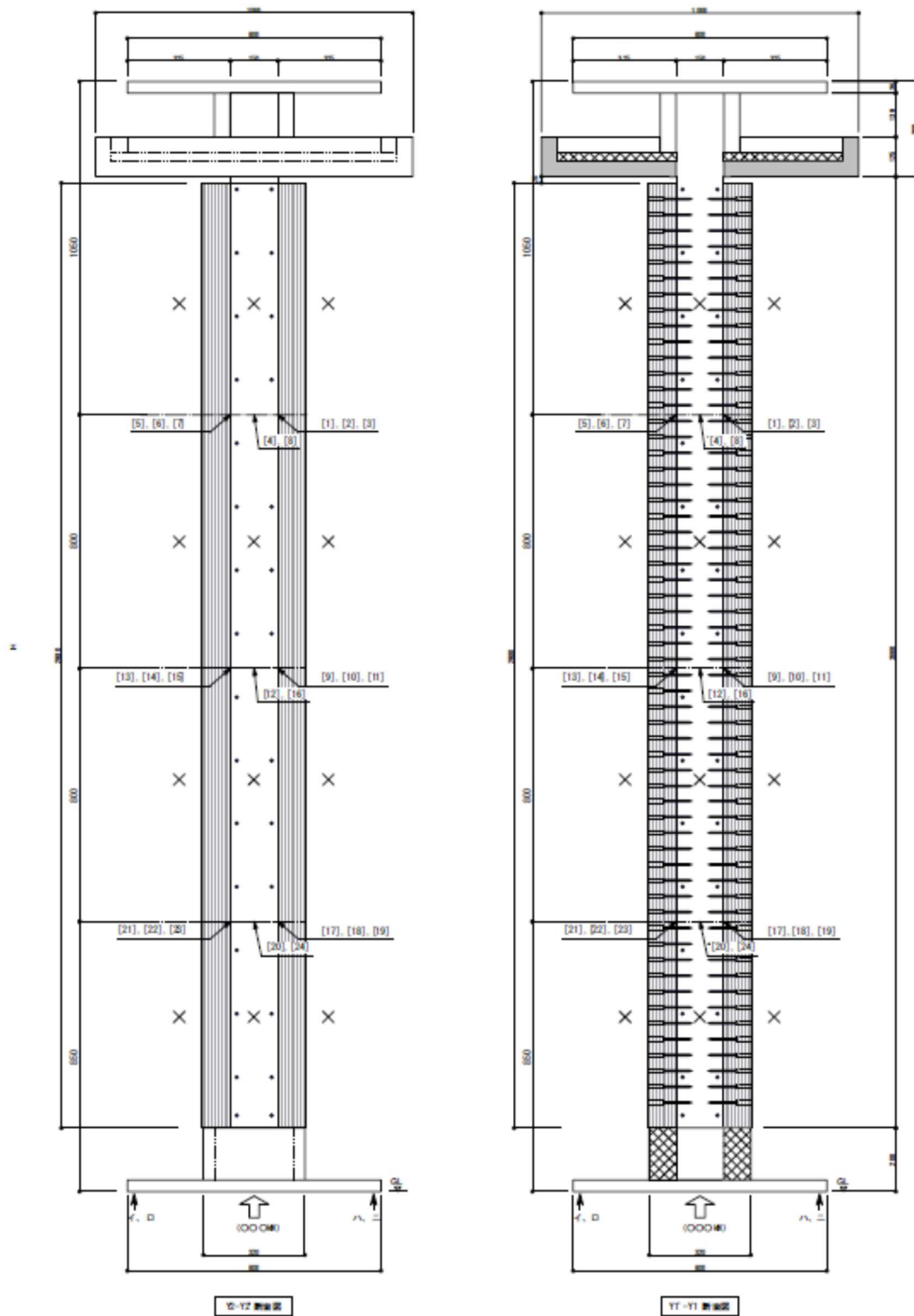


図 4.3.1.7 試験体の熱電対位置

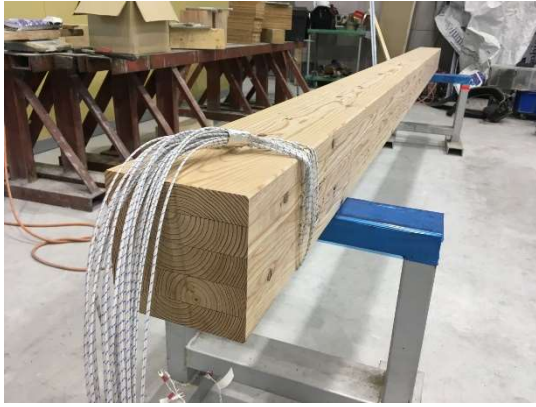


写真 4.3.1.1 製作時の様子



写真 4.3.1.2 製作時の様子

4. 3. 1. 2 結果

加熱開始後、1242分で各計測点の温度の下降と変形速度の安定を確認し、試験を終了した。加熱温度測定結果を図4.3.1.8、軸方向収縮量測定結果を図4.3.1.9、熱電対の内部温度曲線を図4.3.1.10に示した。炭化状況と記録写真を写真4.3.1.3～写真4.3.1.4に示す。

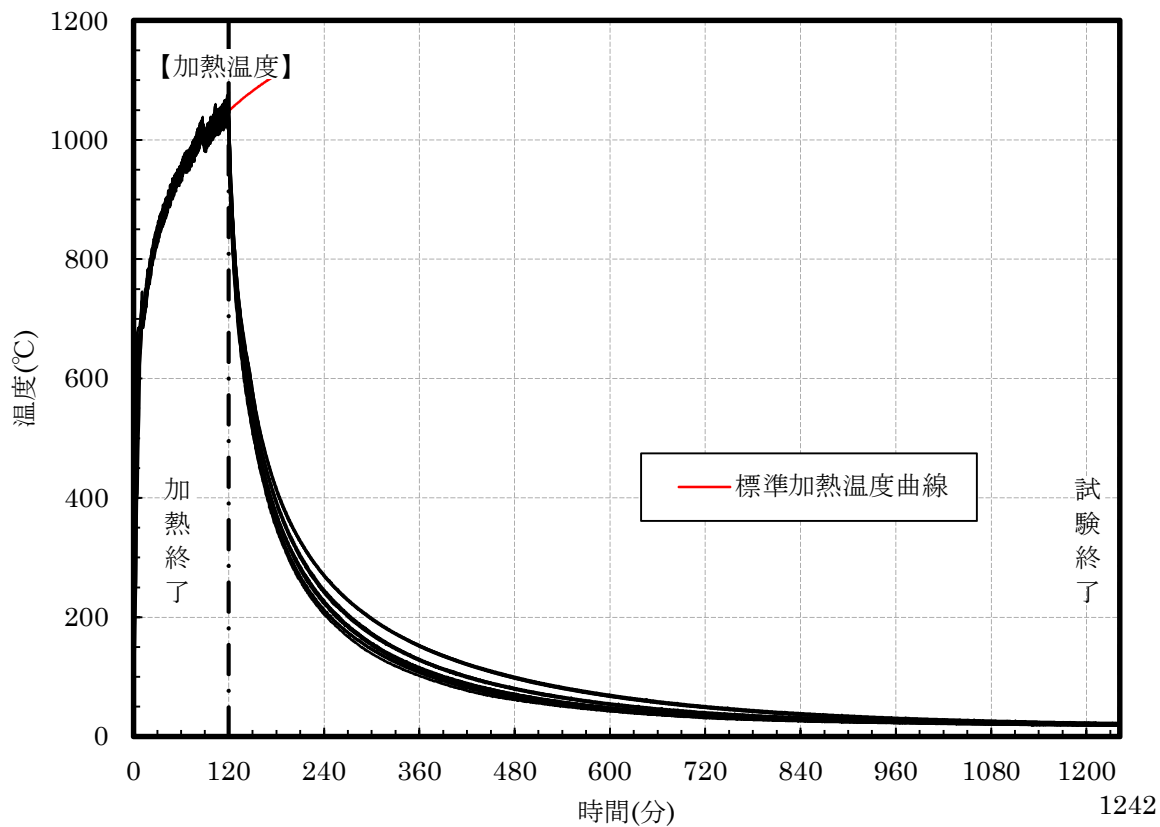


図 4.3.1.8 加熱溫度測定曲線

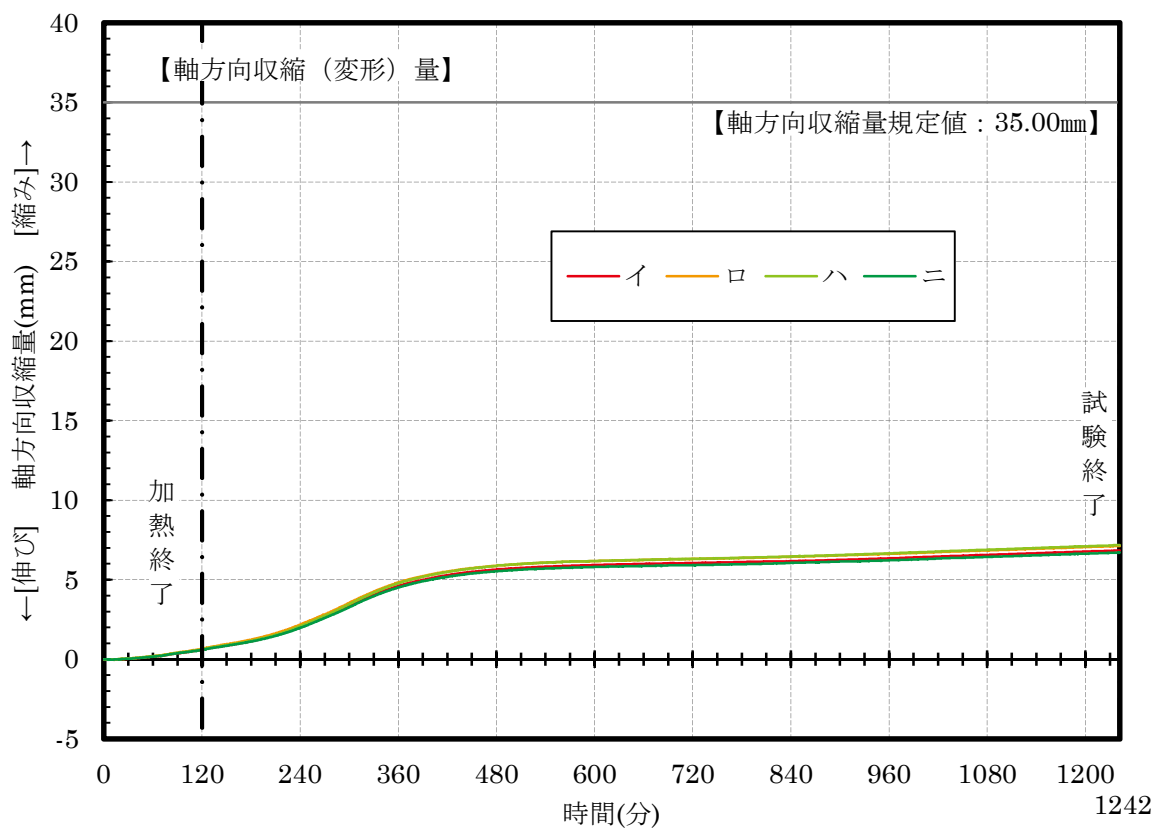


図 4.3.1.9 軸方向收縮量測定曲線

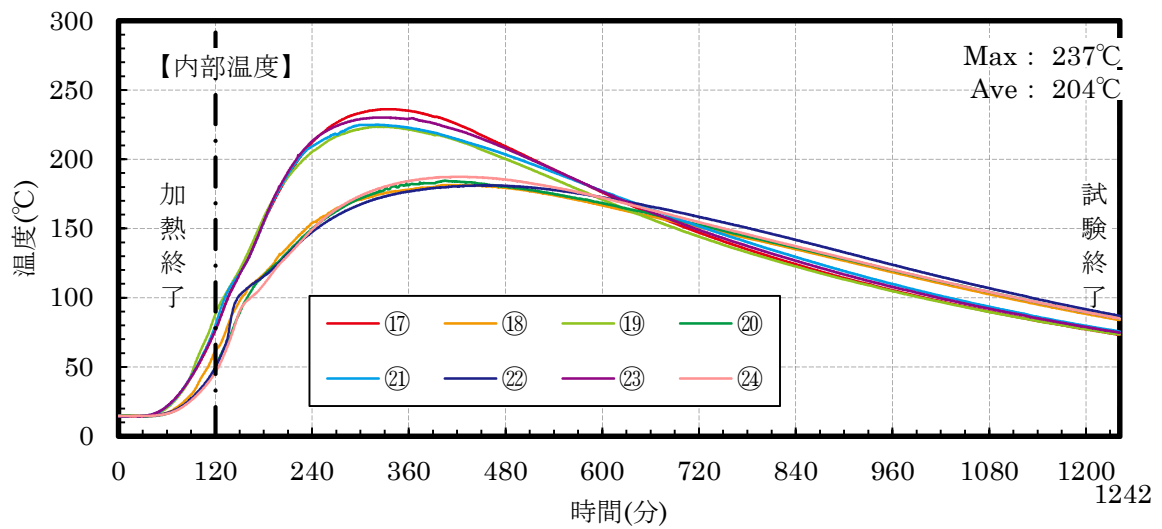
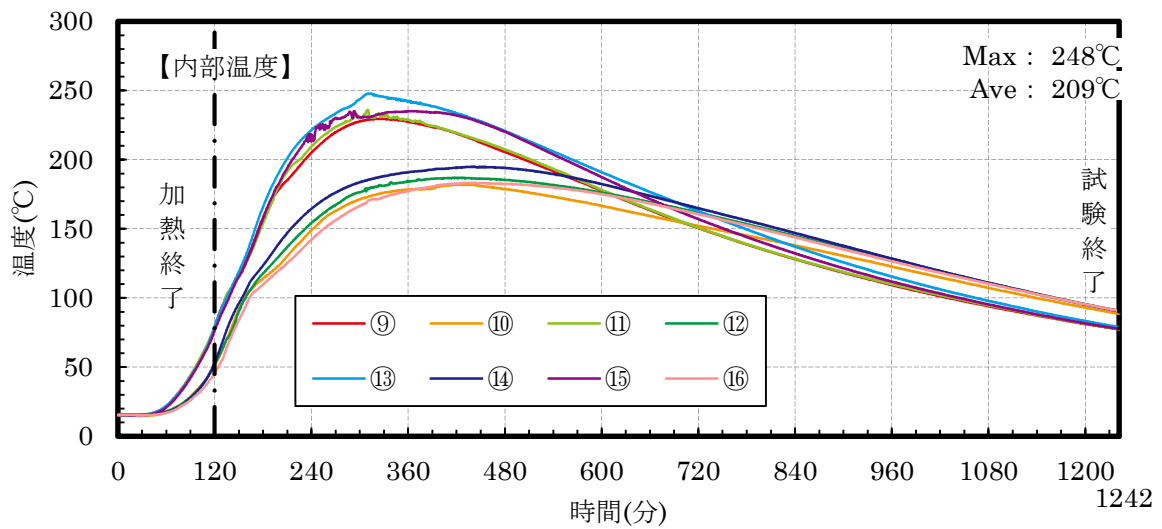
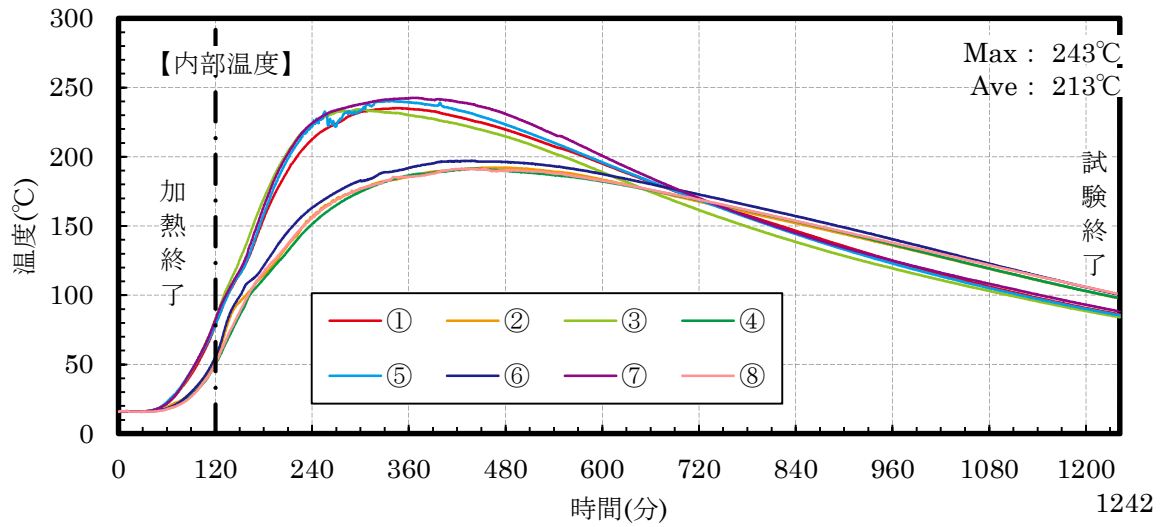


図 4.3.1.10 内部温度測定曲線



写真 4.3.1.3 加熱前



写真 4.3.1.4 脱炉直後 (1242分、20時間)



写真 4.3.1.5 東側



写真 4.3.1.6 北側



写真 4.3.1.7 南側



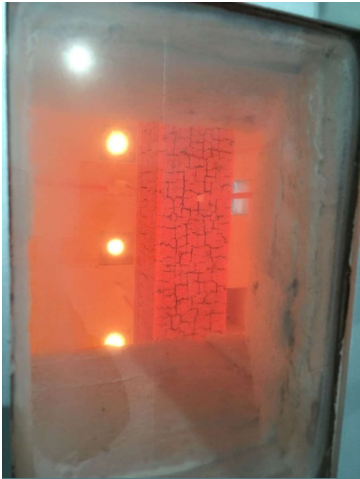
写真 4.3.1.8 西側



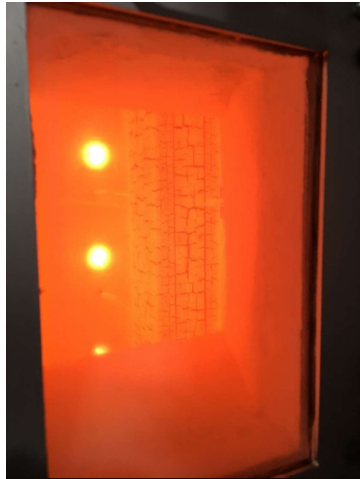
写真 4.3.1.9 下部 (加熱前)



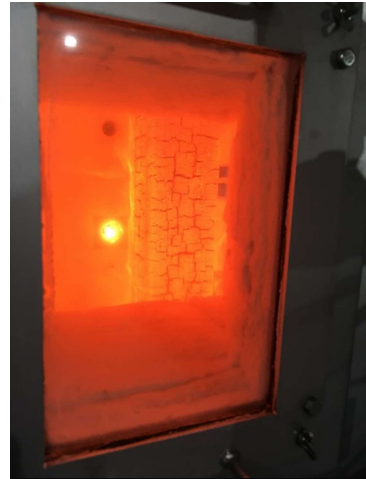
写真 4.3.1.10 下部 (脱炉直後)



40分



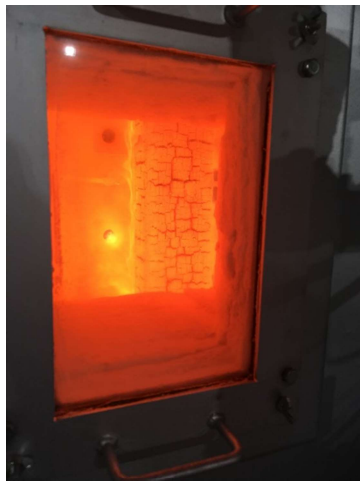
70分



90分 下から炎が上がる



95分 柱下部



118分



120分



122分



130分 下部赤熱



170分 赤熱消える

写真 4.3.1.11 加熱中の様子



写真 4.3.1.12 断面 下部



写真 4.3.1.13 断面 下部



写真 4.3.1.14 断面 中間点



写真 4.3.1.15 断面 上部



写真 4.3.1.16 被覆材剥がし



写真 4.3.1.17 被覆材を剥がした柱



写真 4.3.1.18 柱最下部 切断



写真 4.3.1.19 断面 柱最



写真 4.3.1.20 最下部隅部 柱の欠け



写真 4.3.1.21 最下部隅部 柱



写真 4.3.1.22 難燃薬剤析出（白色）

4. 3. 1. 3 考察

10時37分に加熱開始して2時間後である12時37分に加熱を終了し、20時間後の翌日8時37分に脱炉した。炉内温度は3時間後には400度、4時間後には200度と、11月に行った90mm厚の時と同時間程度で温度が低下した。内部温度の最大値は、隅部は6時間後で248℃、平部は7時間後に213℃であった。500分を過ぎたところで平部・隅部の全体で温度が下がり始めた。軸方向収縮量は6時間後で5mmを超え、時間とともに変形が進んでいく傾向を示した。

試験体の上中下部の断面をカットし炭化性状を確認した。3断面とも、荷重支持部材の炭化は見られなかった。被覆材はすべて炭化し、難燃薬剤がLVLを炭素化していた。被覆材を剥がす際、11月の試験時より木破が少なかった。

加熱90分を過ぎたところで柱下部の被覆材から炎が出て、試験体上部まで炎が出ていた。加熱を止めた後も30分ほど、同場所で赤熱が見られた。脱炉後に確認したところ、炎がでた部分のみ燃え込みが激しく被覆材の減少が見られた。柱脚部を確認したところ、荷重支持部材の炭化は見られなかったが、中心部に比べて柔らかくなっていた。カラムツ柱の隅部は250℃近い熱に長時間さらされたことで、材料の劣化につながったと考えられる。11月の試験時の脱炉直後も柱脚部の一部で燃え込みが大きかった。試験機関によると加熱中・冷却中とも試験体下部から空気を供給するため、試験体下部は酸素供給量が大きいとのことであった。

4. 3. 2 性能評価 2 体目

平成 31 年 1 月 24 日に行った性能評価試験 1 体目が性能を満たしたことにより、性能評価試験 2 体目を平成 31 年 3 月 8 日に行った。試験体は大阪の東亜理科にて 2 月 15 日に製作した。

4. 3. 2. 2 実験概要

2 時間耐火性能を目標に製作した 4 面加熱の試験体は、一般財団法人日本建築総合試験所の池田試験所の柱炉を使用し、「防耐火性能・標準業務方法書」に準拠して載荷加熱試験を行った。図 4.3.2.1 に柱炉の試験装置図を示す。

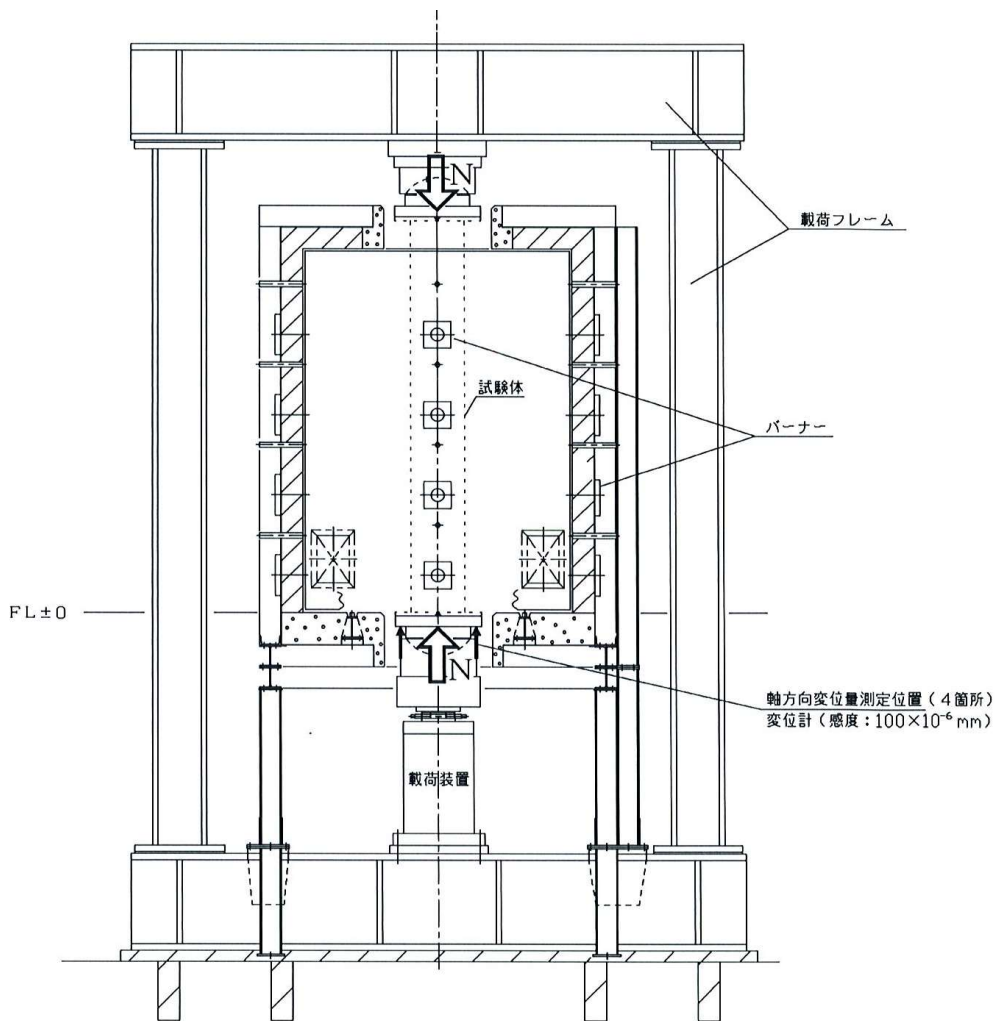


図 4.3.2.1 試験装置図

(1) 加熱方法

ISO834 に規定する標準加熱曲線に準拠した加熱を行った。軸方向変形が進み、載荷の継続が困難となった場合に試験を中止する事とした。

(2) 載荷方法

試験荷重Nは、長期許容圧縮応力度($f_c=4.687\text{N/mm}^2$)より算出した。

試験荷重 $N=4.687\text{N/mm}^2 \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ (有効断面積)=105.5kN

ただし、 $F=20.6\text{N/mm}^2$, $l_k=3500\text{ mm}$ (座屈長さ)とし、 f_c を算出した。

(3) 測定項目

- ①試験体内部温度
- ②炉内温度
- ③軸方向収縮(変形)量
- ④炭化状況

試験終了後、試験体各部を切断し、加熱後の炭化深さ及び残存断面を測定した

⑤含水率

試験体に使用した構造用集成材の端部から作成されたサンプルを 105℃の絶乾状態に設定した恒温器を用いて 12 日間養生した後、重量減少を測定して、含水率を測定した。含水率は次式から求めた。

$$\text{含水率(\%)} = ((\text{絶乾前の重量} - \text{絶乾後の重量}) \div \text{絶乾後の重量}) \times 100$$

⑥その他

試験体の目視観察、写真撮影等を行った。

3. 試験体概要

試験体は断面寸法 150×150 mmの同一等級構成構造用集成材を構造部材とする試験体について載荷加熱試験を実施した。加熱試験体の構成部材、組立仕様などの試験体仕様の一覧を製作時の様子を表 4.3.2.1～2 と図 4.3.2.2～7、写真 4.3.2.1 に示す。

表 4.3.2.1 試験体構成材料 (寸法単位:mm)

項目	試験体の構造
荷重支持部材	<ul style="list-style-type: none">・材質 同一等級構成構造用集成材(日本農林規格に適合するもの)・樹種 カラマツ・比重 0.48 (気乾、実測値)・断面寸法 150×150
被覆材	[1]単板積層材 <ul style="list-style-type: none">・材質 りん・窒素系薬剤処理単板積層材・薬剤含浸量 140～149kg/m³・厚さ 90(厚さ 30 の板を積層)

表 3-2 試験体構成材料留付材 (寸法単位:mm)

項 目	試験体の構造
留付材	<p>[1]被覆材留付用</p> <p>[1]-1 ねじ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 鉄鋼 ・寸法 φ5 mm×L90 mm ・留付間隔 200 以下 <p>[1]-2 接着剤</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 ウレタン系樹脂接着剤 ・塗布量 300g/m² <p>[1]-3 木栓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材質 広葉樹 ・寸法 φ12

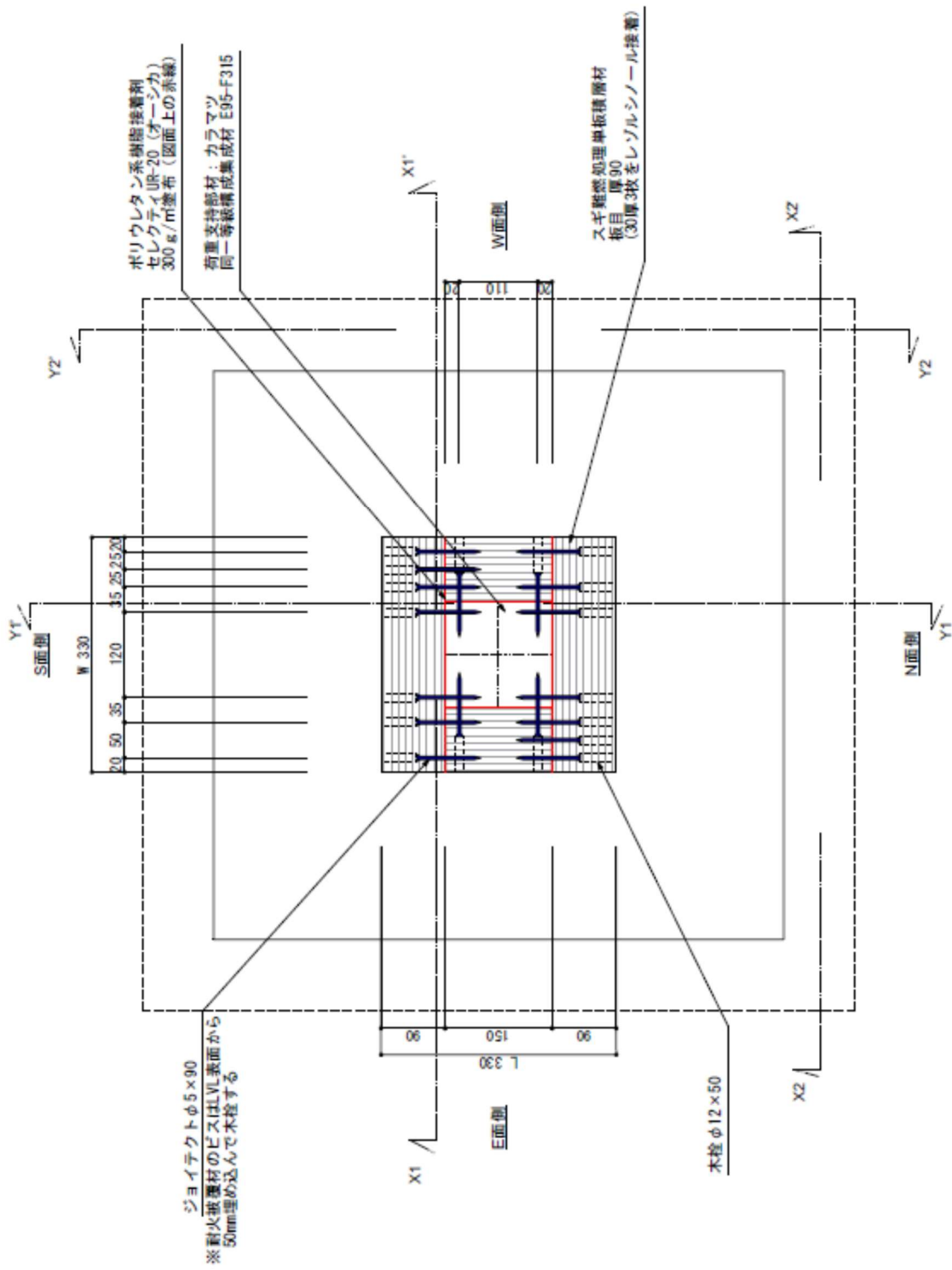


図 4.3.2.2 試験体の構造及び寸法

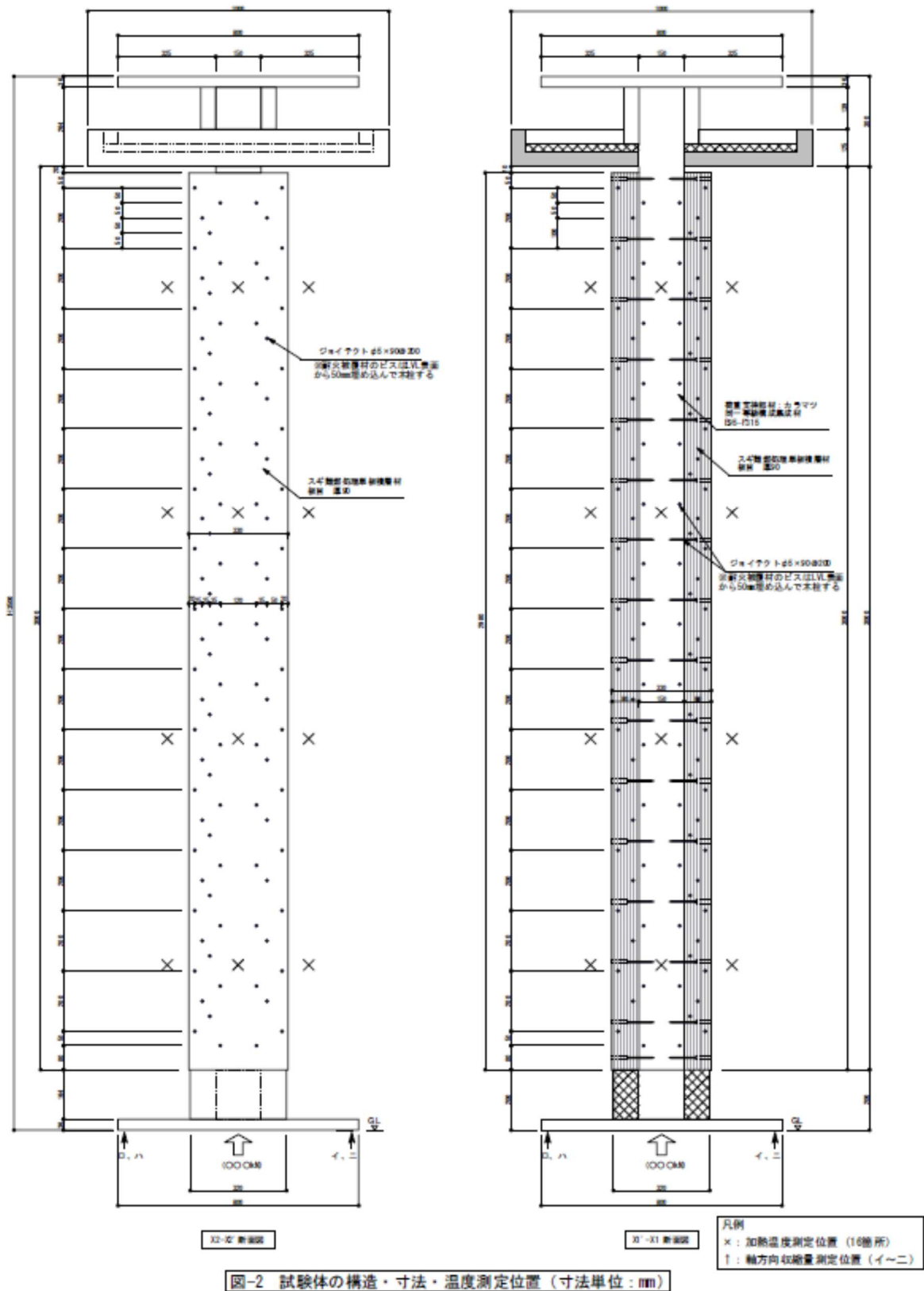


図 4.3.2.3 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (X 通り①)

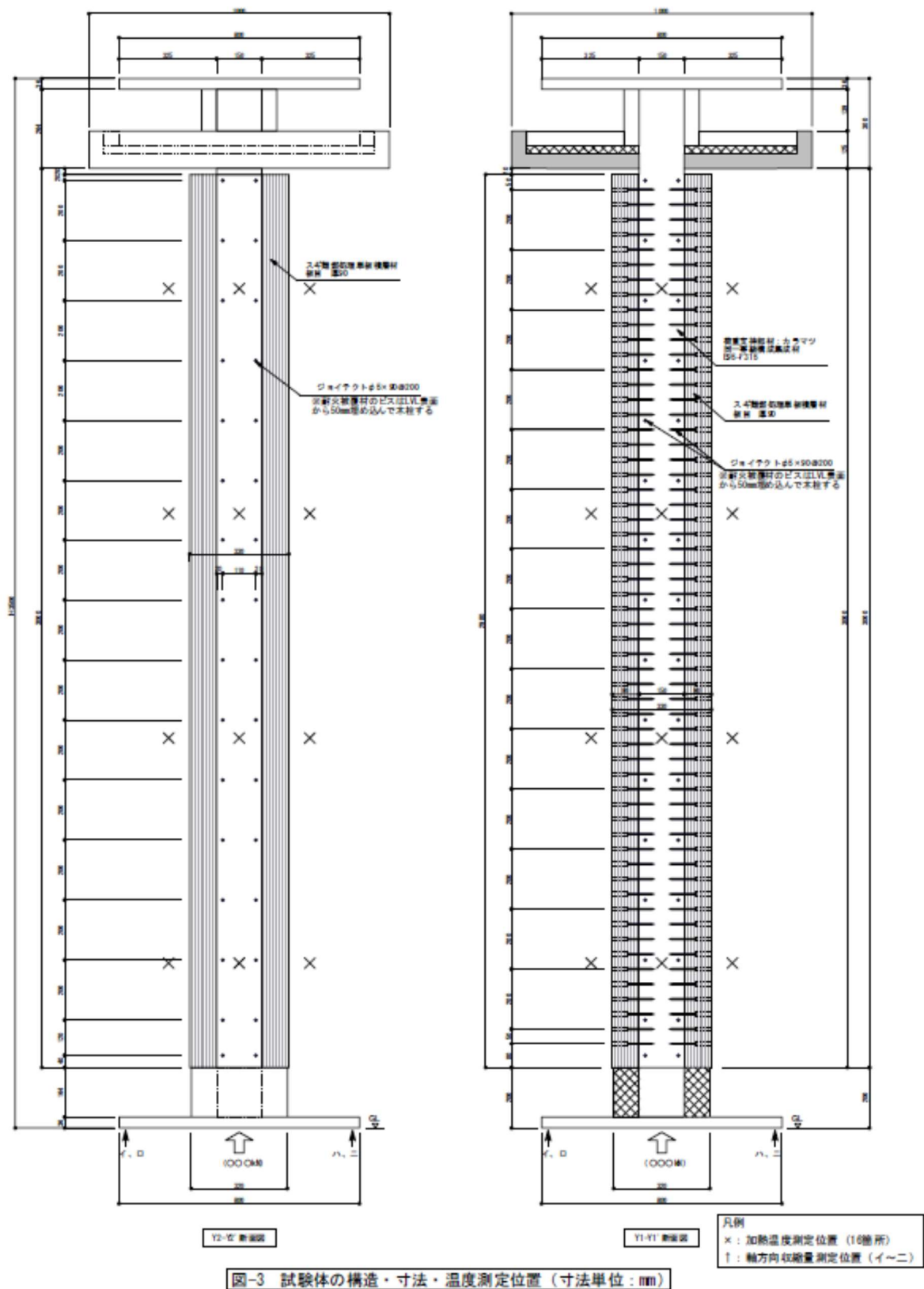


図 4.3.2.4 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (X 通り②)

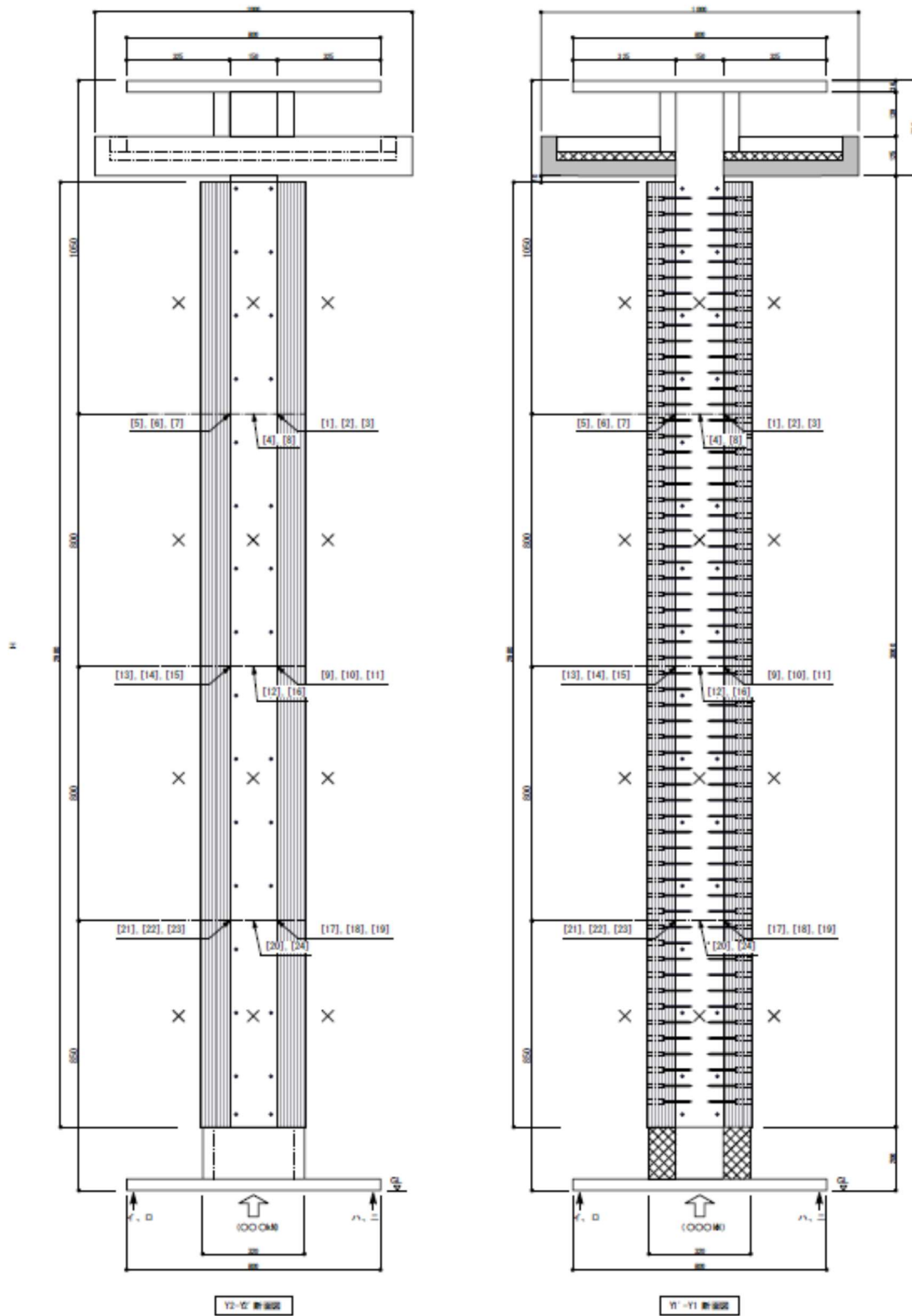
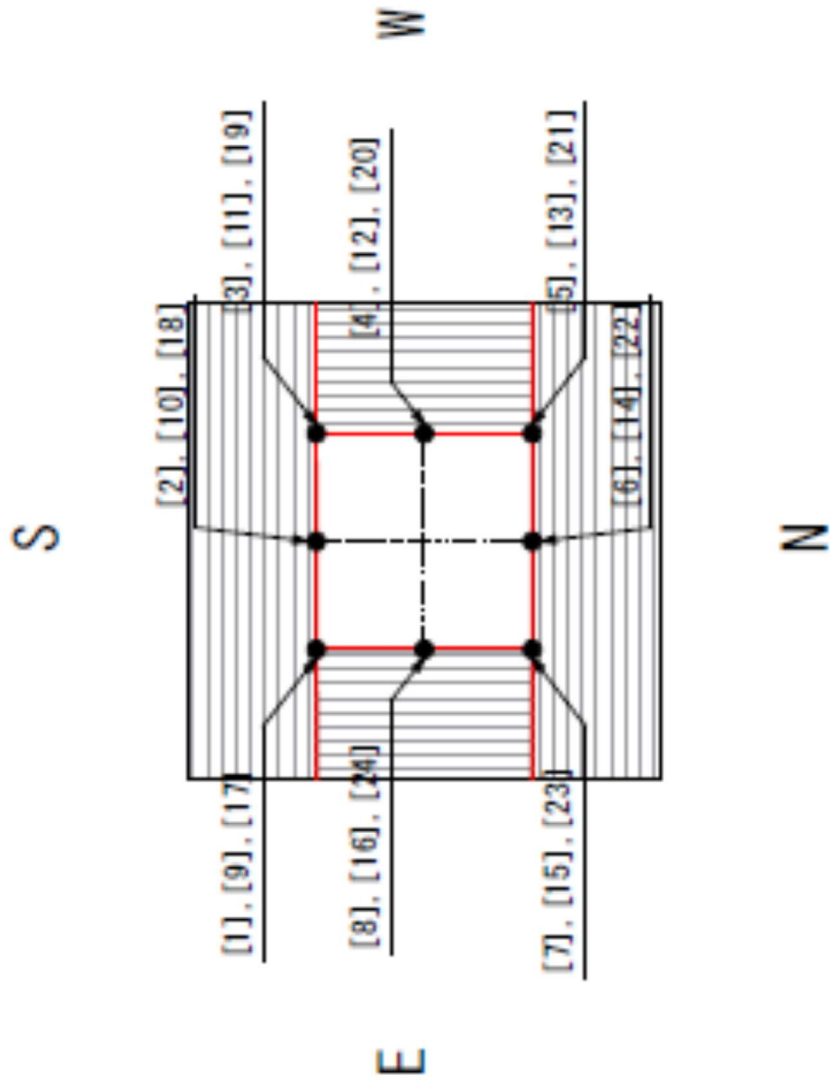


図 4.3.2.5 試験体の構造・寸法・温度測定位置 (Y 通り)



熱電対の断面図

図 4.3.2.6 試験体の熱電対位置

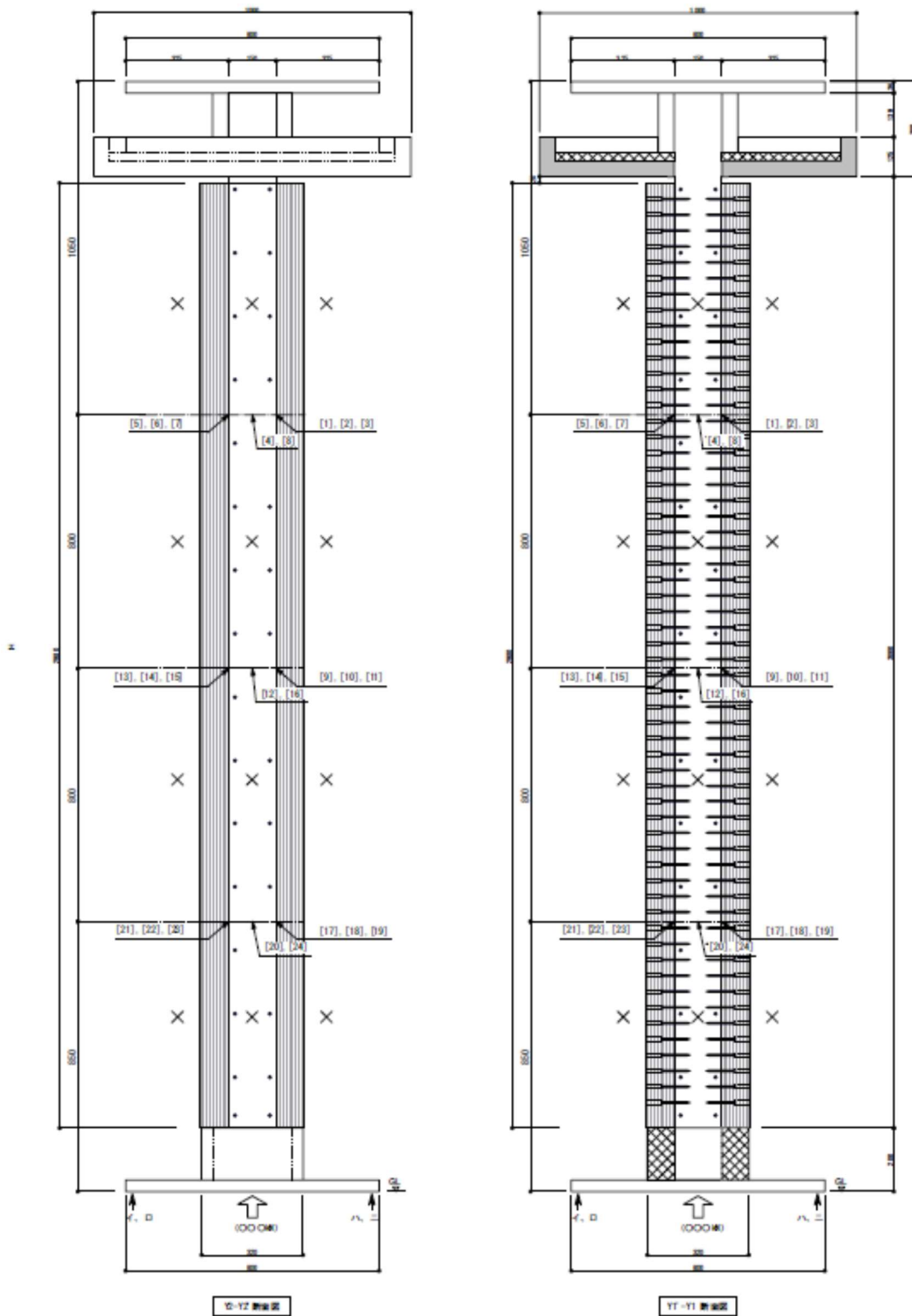


図 4.3.2.7 試験体の熱電対位置

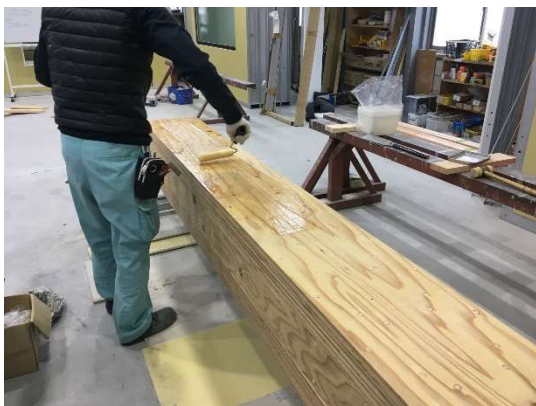


写真 4.3.2.1 製作時の様子

4. 3. 2. 2 結果

加熱開始後、1175分で軸方向変形量の各変位計毎の差が大きくなり、座屈の傾向が顕著になったため、加力を中止、脱炉した。加熱温度測定結果を図4.3.2.8、軸方向収縮量測定結果を図4.3.2.9、熱電対の内部温度曲線を図4.3.2.10に示した。炭化状況と記録写真を写真4.3.2.2～写真4.3.2.20に示す。

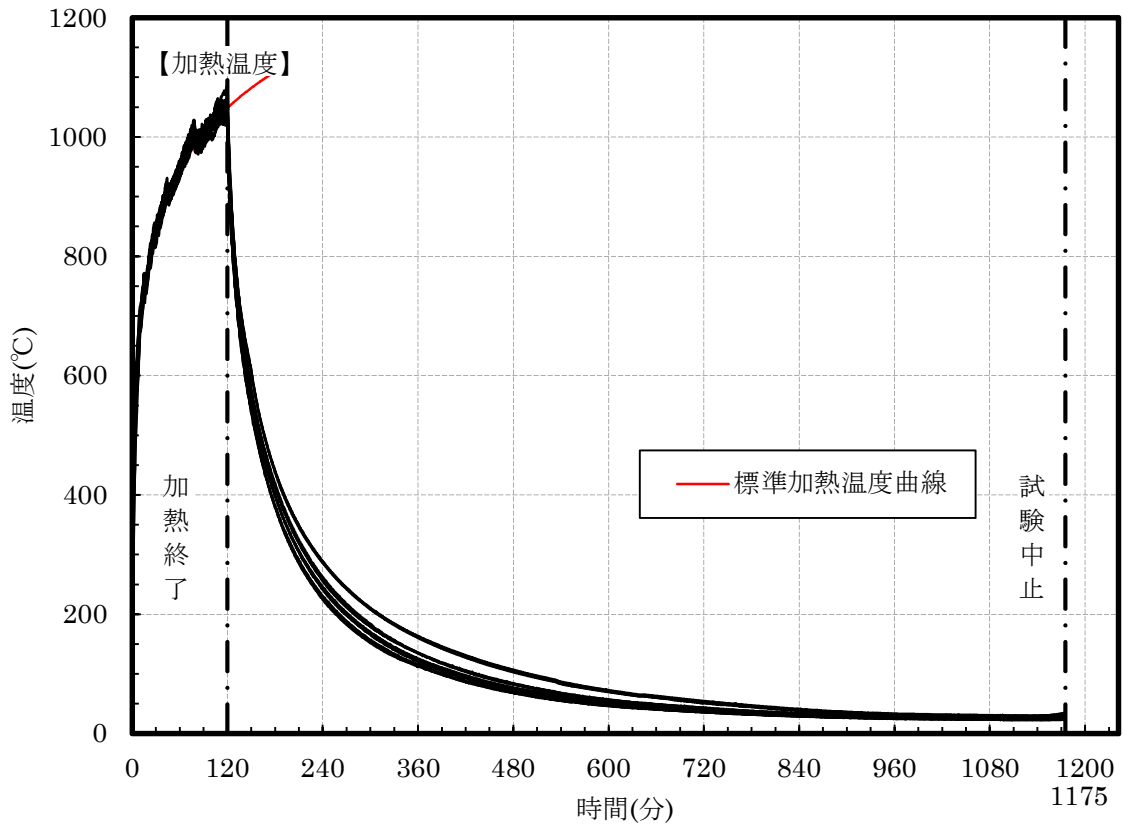


図 4.3.2.8 加熱溫度測定曲線

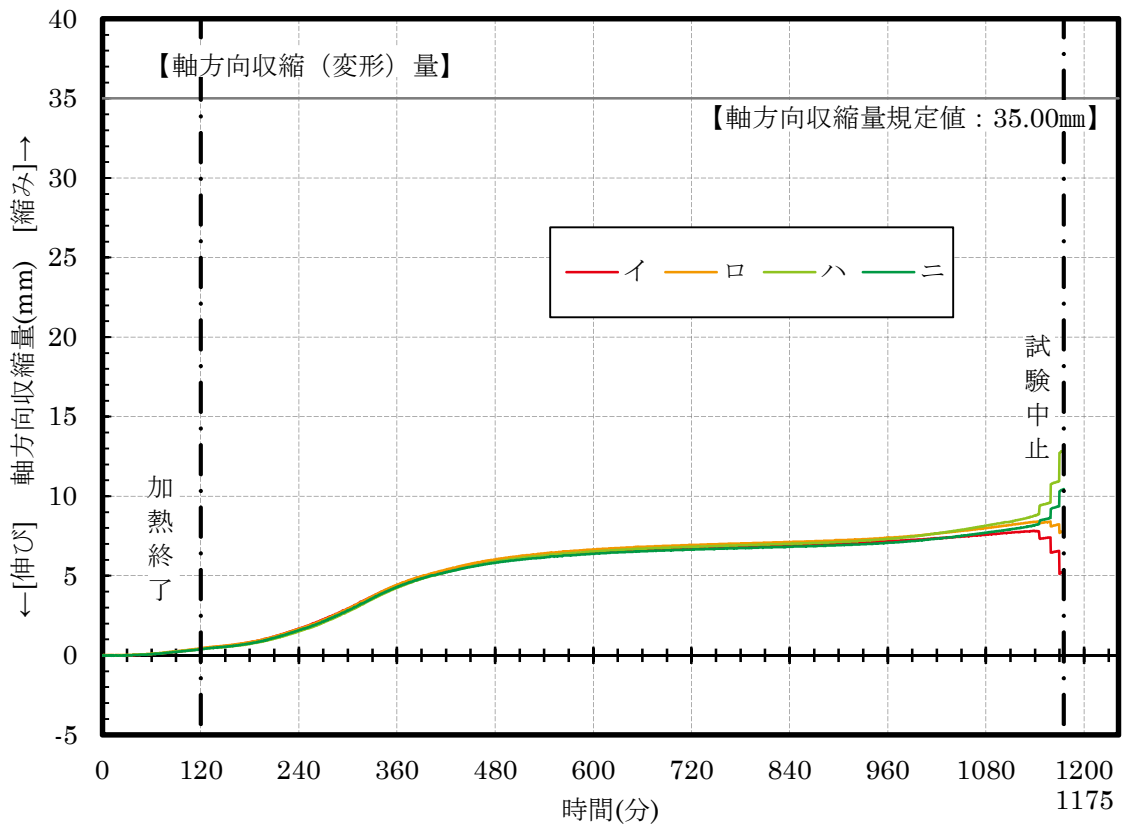


図 4.3.2.9 軸方向收縮量測定曲線

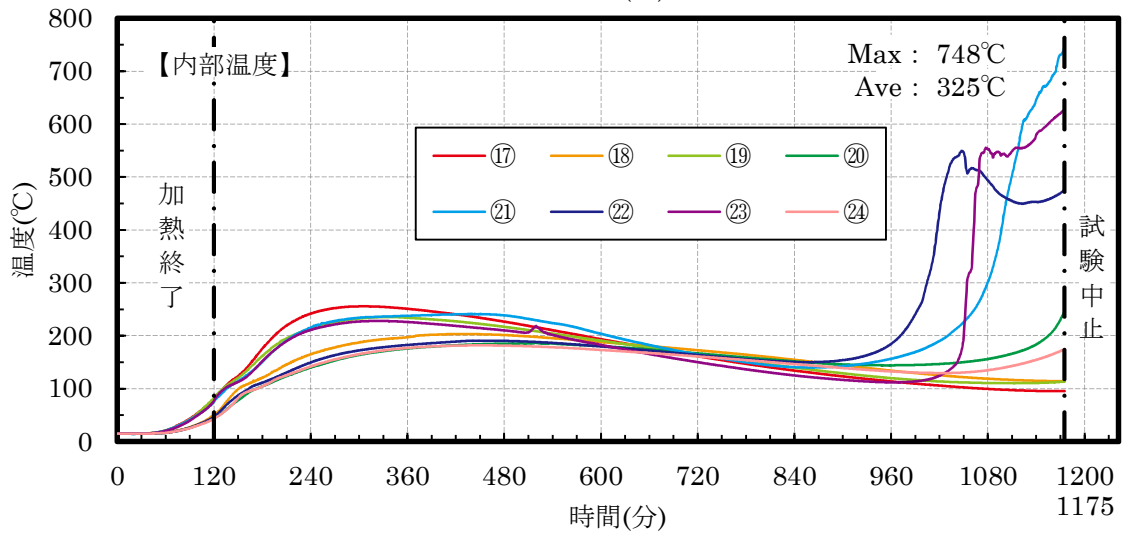
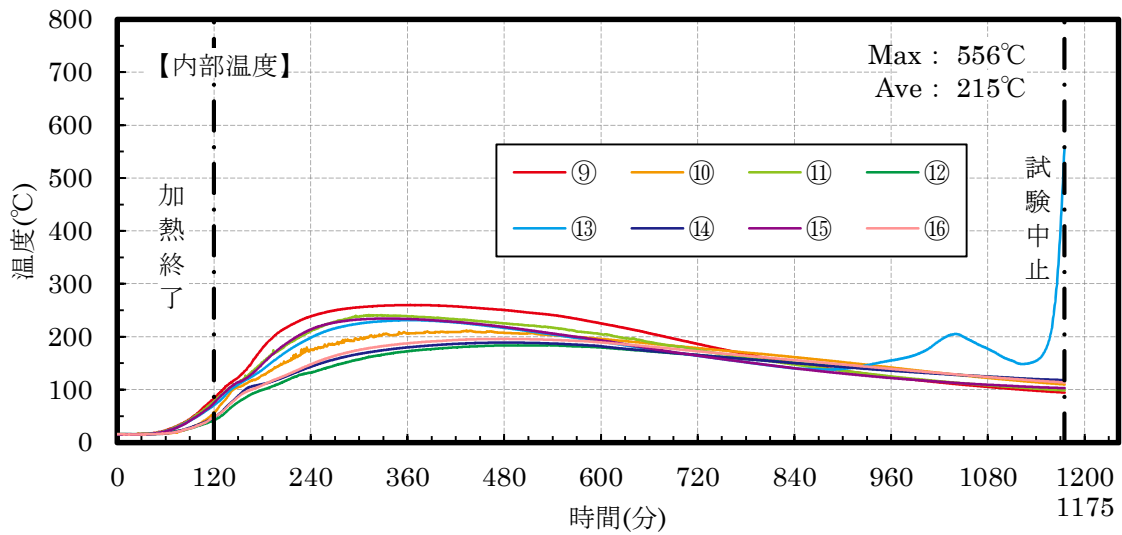
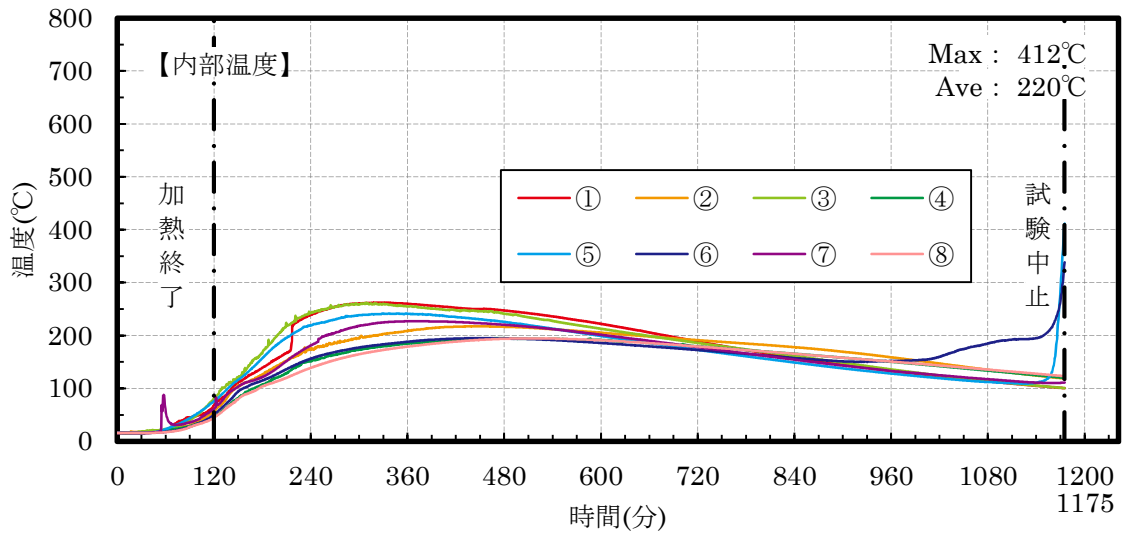


図 4.3.2.10 内部温度測定曲線



写真 4.3.2.2 加熱前



写真 4.3.2.3 脱炉直後（1200分、20時間）



写真 4.3.2.4 東側

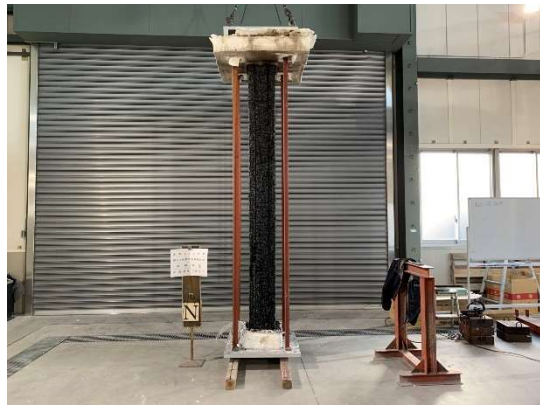


写真 4.3.2.5 北側



写真 4.3.2.6 南側



写真 4.3.2.7 西側



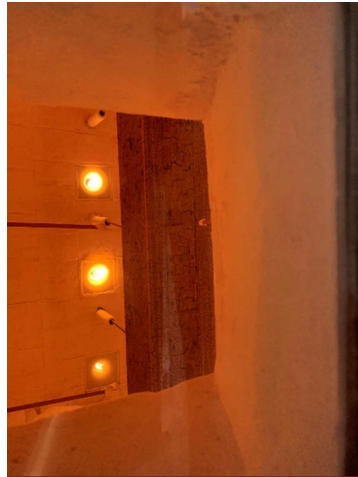
写真 4.3.2.8 下部（加熱前）



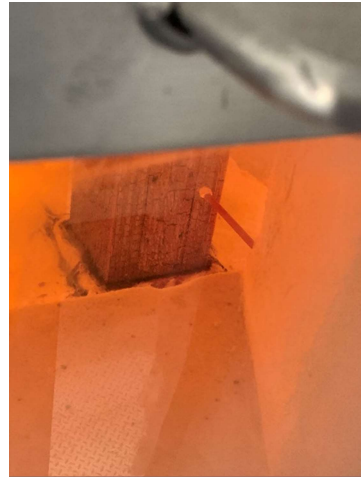
写真 4.3.2.9 下部（脱炉直後）



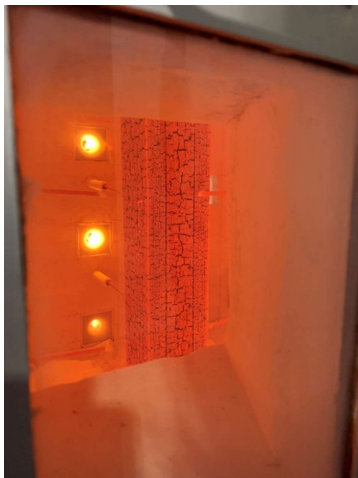
開始 4分



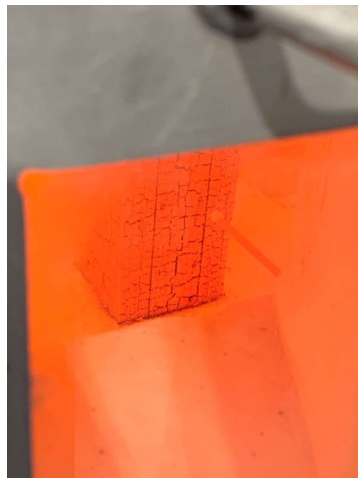
15分



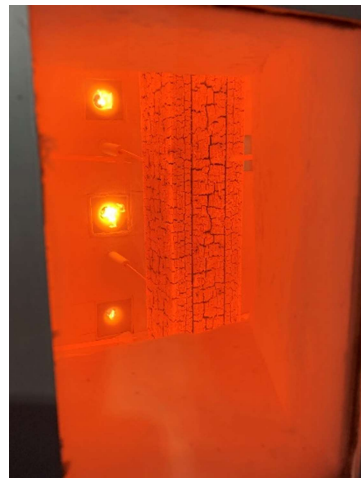
15分



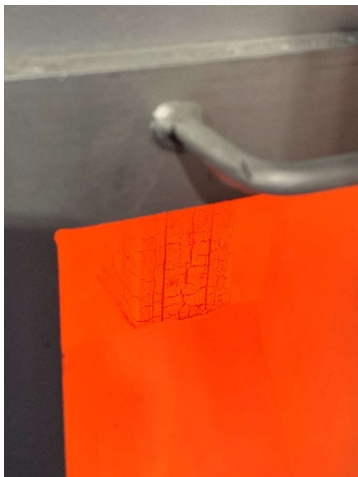
33分



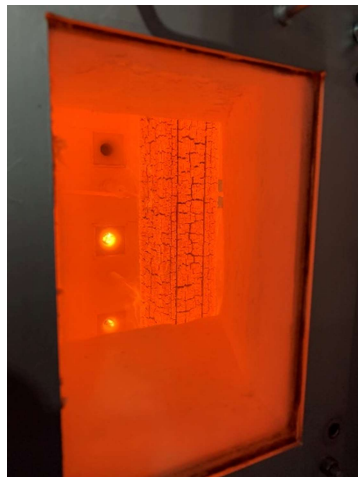
33分



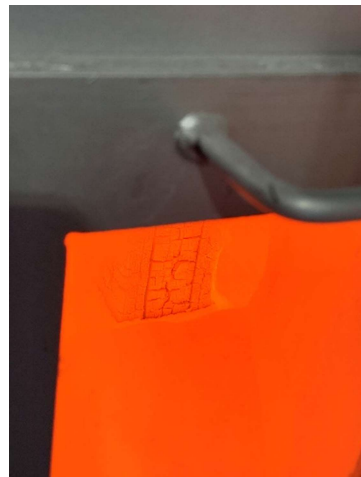
60分



60分

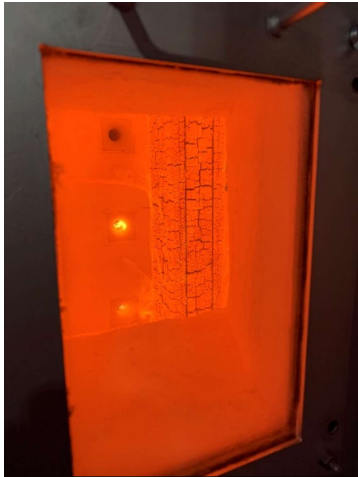


90分



90分

写真 4.3.2.10 加熱中の様子



112分



112分



122分



122分



150分



1175分 脱炉直後



脱炉直後 荷重支持部材の赤熱

写真 4.3.2.11 加熱中の様子



写真 4.3.2.12 被覆材脱落



写真 4.3.2.13 被覆材脱落



写真 4.3.2.14 上部



写真 4.3.2.15 被覆材脱落



写真 4.3.2.16 下部



写真 4.3.2.17 脱落部



写真 4.3.2.18 脱落部



写真 4.3.2.19 脱落部



写真 4.3.2.20 脱落部被覆材剥がした



写真 4.3.2.21 柱炭化



写真 4.3.2.22 柱寸法 146mm



写真 4.3.2.23 下部

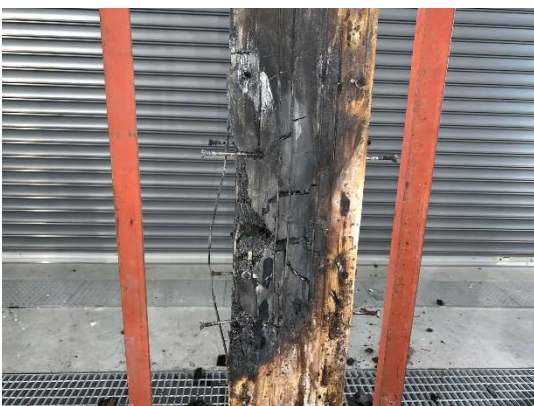


写真 4.3.2.24 柱炭化



写真 4.3.2.25 柱炭化



写真 4.3.2.26 東側



写真 4.3.2.27 南側



写真 4.3.2.28 西側



写真 4.3.2.29 北側



写真 4.3.2.30 被覆材表側



写真 4.3.2.30 被覆材裏側 (柱側)



写真 4.3.2.31 荷重支持部材

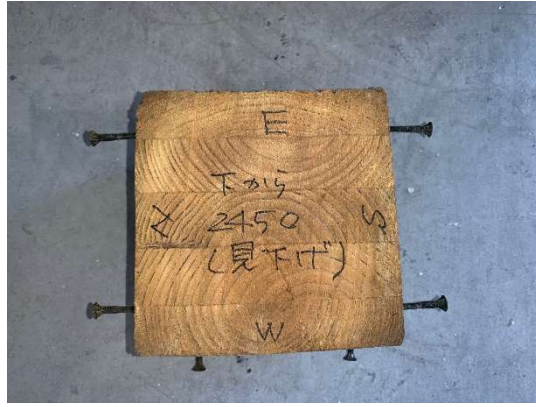


写真 4.3.2.32 柱断面 上部

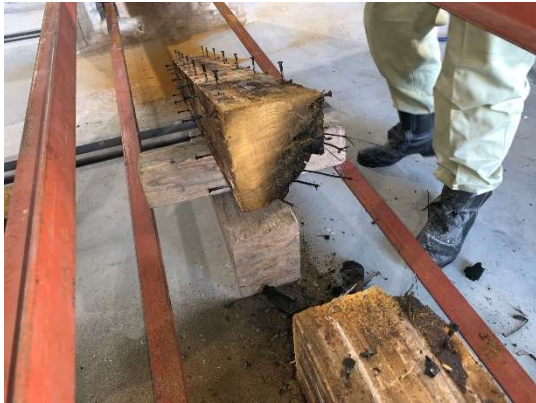


写真 4.3.2.33 炭化部断面



写真 4.3.2.34 炭化部断面



写真 4.3.2.35 柱断面 上部と炭化部

4. 3. 2. 3 考察

10時40分に加熱開始して2時間後である12時40分に加熱を終了した。1175分後（19.6時間後）の翌日朝6時15分、荷重支持部材の軸方向変形が急激に進んだことから試験を中止、脱炉したところ試験体中間点から下部に赤熱・炎が見られ、水をかけて消火した。

炉内温度は180分に約430度、240分には約240度と、1月に行った性能評価試験1体目の時より20度ほど高い温度で低下した。内部温度の最大値は、隅部は330分で261℃、平部は450分で224℃であった。540分を過ぎたところで平部・隅部の全体で温度が下がり始めた。軸方向収縮量は540分で6mmに達し、時間経過とともに変形が進んでいく傾向を示した。840分後から内部温度の22番（試験体下部・平部）が上がり始め、続いて両側隅部の21番、23番の温度も上昇し始めた。22番と同面隅部の13番、同面平部の6番も同時刻に上昇し始めた。1000分を超えたところでは外側のガラス戸から試験体同面に赤熱が見えた。軸方向変形がすすみ、計測4か所のうちの2か所ずつの差が大きくなり、試験体が座屈しはじめていることが判明したので試験を中止した。

試験体の被覆材をすべてはがし、荷重支持部材の炭化を確認した。一番炭化がすすんでいたのは、被覆材最下部から950mmのところであり、熱電対を配置していた850mmから100mmほど上部であった。熱電対から外れたところで荷重支持部材が燃え出し、広がっていったと考えられる。いつの時点で燃え出したかは熱電対のデータからはわからない。隅部内部温度は上中下3か所とも260℃に達しており、荷重支持部材が全体的に260℃にさらされ、どこで燃え出してもおかしくなかった状況だったのではないかと思われる。

なお、加熱前に試験体下部の覆いを入念に行った結果、性能評価試験1体目で見られた、加熱中の試験体下部の燃え出しは観察されなかった。

5. まとめと今後の課題

本事業では、①木質系材料のみの構成による、②現場施工による新設・交換可能である等の特徴を持つ、2時間耐火構造の柱の開発を、短柱（長さ約1m）による予備実験（4仕様、試験体1体）→長さ約3.5mの実大柱による予備実験（2仕様、試験体2体）→国土交通大臣認定取得のための性能評価試験（1仕様、試験体2体）を3段階で実施した。この進め方とすれば、性能評価試験を実施する前に、着実に耐火上の弱点部分を把握、克服することができると考えた。

(1) 予備実験と性能評価試験の概要

短柱による予備実験では、柱長さ約1mの仕様の異なる4試験体を同時に加熱し、その性能を把握した。その結果、被覆層に設ける難燃薬剤処理した木材厚さが90～120mmの場合に、2時間の耐火性能を有する可能性があること、難燃薬剤処理した木材は複数枚をビス等で重ね張りするよりは、事前に接着剤で一体化したほうが、耐火性能が高いことがわかった。

続く、実大柱による予備実験では、被覆層に設ける難燃薬剤処理した木材厚さを120mmとして、加熱実験を実施し、燃え残り性状から、より被覆層を薄く出来る可能性があることが確認できた。そこで、2体目の実験では、被覆層に設ける難燃薬剤処理した木材厚さを120mm→95mmに変更して加熱実験を実施して、2時間耐火構造の性能を有することを確認した。

以上の予備実験の結果をもとに、性能評価試験（同仕様で2体実施）では、被覆層に設ける難燃薬剤処理した木材厚さを90mmとして、加熱試験を2体実施したが、1体目は2時間耐火構造の要求性能を満足したものの、2体目においては、柱が部分的に燃焼を始めて途中で試験を中止し、不合格となった。

(2) 本事業の成果と今後の課題

本事業では、予備実験・本試験を3段階で実施し、2時間耐火構造の要求性能を満足する仕様を明確にした。しかし、性能評価試験では、薬剤の注入のバラツキ等の理由により、部分的に被覆層が突破されて構造躯体に着火し、不合格となった。これを改善するためには、以下のような被覆層の耐火性能の余裕度を向上させることが考えられる。

1. コストや作業性を鑑みて被覆層に設ける難燃薬剤処理した木材厚さを、性能確保できる可能性のある最小寸法90mmで実施したが、あと15mm程度、厚くし安全率を上げる。
2. 被覆層に設ける難燃薬剤処理した木材厚さは90mmのままとし、その表面に木材15～20mm程度の仕上げ材（必ずしも難燃薬剤処理は必要ない）を設けて、被覆層の総厚を増す。

以上のいずれかにより、耐火性能の余裕度が向上すれば、2時間耐火構造の要求性能を確実に確保できると考えられる。引き続き、柱だけでなく、被覆層の脱落が顕著となるはりについても検討を続けていきたい。