

## 第5章 高温時におけるH形断面・箱形断面部材の曲げ圧縮実験

5.1 概要	153
5.2 曲げ圧縮実験	155
5.2.1 実験条件	155
5.2.2 試験体	157
5.2.3 実験方法	164
5.2.4 H形断面部材の実験結果	177
5.2.5 箱形断面部材の実験結果	196
5.3 曲げ圧縮実験の数値解析	218
5.3.1 数値解析の方法	218
5.3.2 解析結果と実験結果の比較	220
5.4 結語	238
第5章の参考文献	240

## 5.1 概要

鋼構造建物において火災が生じると、加熱を受ける鋼構造部材には、鋼材の熱膨張と熱劣化さらには周辺部材からの拘束により、極めて大きな熱応力と熱変形が生じる<sup>1)</sup>。特に外柱を含む区画において火災が生じた場合、鋼梁の熱膨張により外柱は外側へと押し出され、図 5.1 に示すように、外柱の柱頭・柱脚に局部座屈が生じる可能性がある。火災時においては、防火区画を設けることで構造的損傷を局所的に抑えることが可能である。一方、その反面、加熱を受ける鋼構造部材には大地震時をはるかに上回る大きな変形が生じ、外柱において1/50を超える層間変形角が生じた解析例なども報告されている<sup>1)</sup>。よって、火災時における鋼構造骨組の構造安定性を検討する際には、梁の伸びだしによる水平変形を受ける外柱の荷重支持能力を確認する必要がある。層間変形が1/50を超えるような外柱の変形は、柱頭・柱脚に局部座屈を伴う。よって、火災加熱を受ける外柱の荷重支持能力を、実験により確認する必要がある。

鋼柱の耐火性に関する研究は、従来では、鋼柱に施す耐火被覆の断熱性・有効性を把握するための加熱実験が数多く行なわれてきた<sup>2),3)</sup>。最近では、ISO834による標準加熱温度を与えた鋼柱の中心圧縮試験が行なわれている<sup>4)</sup>。これらの実験的研究は、単純明快かつ実用的であるが、加熱梁の伸びだしを受ける柱の水平変形は考慮されていない。加熱梁の伸びだしを考慮した研究としては、耐火鋼を用いた部材の曲げ圧縮実験がある<sup>5),6)</sup>。その結果に基づいて、耐火鋼を用いた建築構造物の耐火設計手法が開発されている<sup>7)</sup>。また、コンクリート充填鋼管柱においても、軸力と曲げを同時に与える耐火試験が行なわれ<sup>8)~10)</sup>、加熱梁の伸びだしを考慮した耐火設計手法が採用されている<sup>11)</sup>。このような背景の中、一般鋼においても、加熱梁の伸びだしを受ける鋼柱の曲げ圧縮変形性状に関して、実験データが求められるようになった。

本章では、一般鋼を用いたH形断面・箱形断面部材の定常温度下における曲げ圧縮実験について述べる。火災加熱を受ける鋼構造部材の曲げ圧縮変形性状を明らかにするとともに、鋼梁の伸びだしを受ける鋼柱の荷重支持能力を確認することが目的である。さらに、高温引張試験と短柱圧縮実験より得た局部座屈を含む応力・ひずみ曲線を用いて曲げ圧縮実験の数値解析を行ない、実験より得た曲げ圧縮変形性状をどの程度まで追跡できるかを考察する。

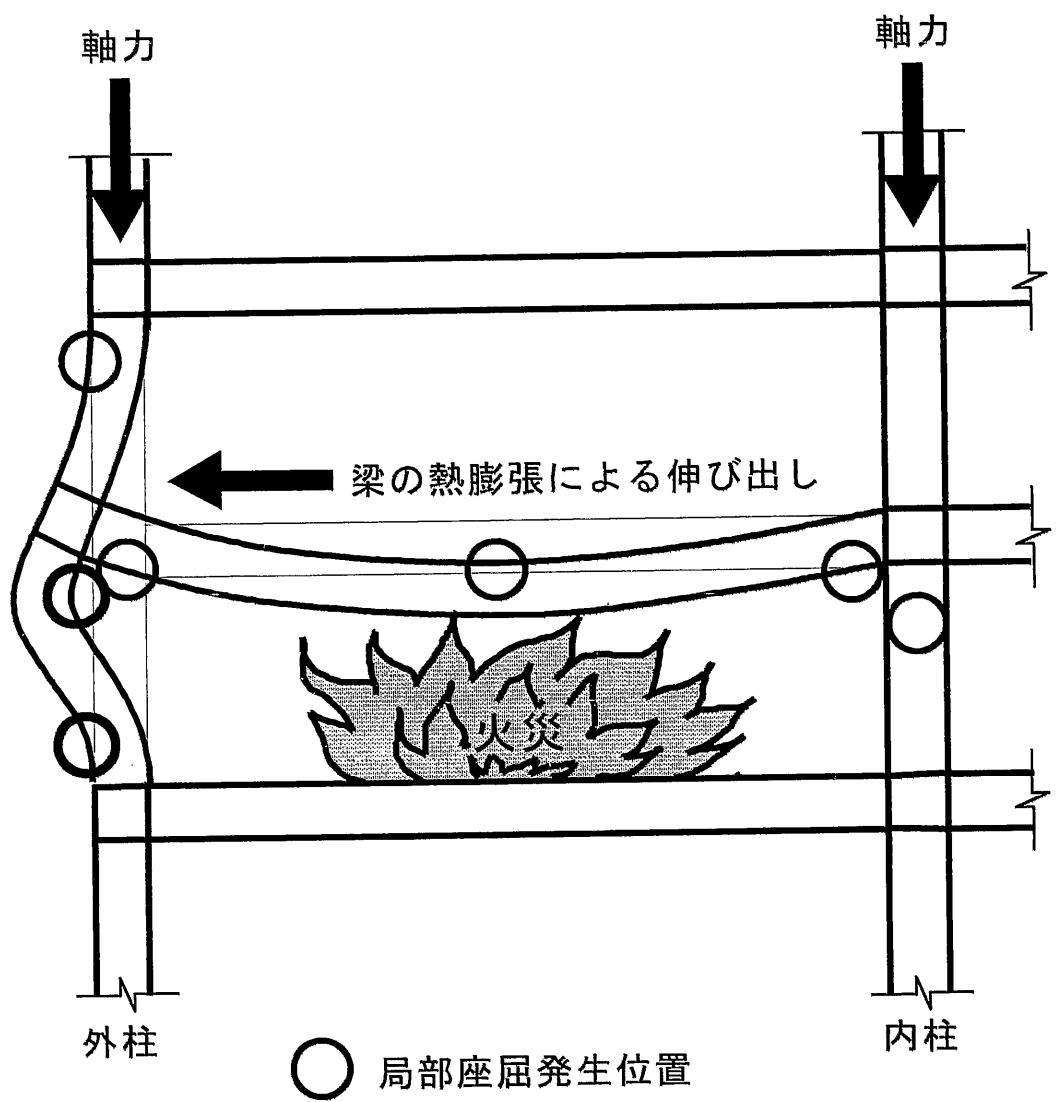


図 5.1 火災加熱を受ける鋼構造骨組の挙動

## 5.2 曲げ圧縮実験

### 5.2.1 実験条件

曲げ圧縮実験の実験条件を表 5.1 に示す。鋼構造部材の曲げ変形性状に影響を及ぼす要因として、以下の項目を取り上げた。

#### (1) 断面形状

利用頻度の比較的多いH形断面と箱形断面の2種類とした。

#### (2) 鋼種

溶接構造用圧延鋼材 (SM490A) とした。

#### (3) 板要素の幅厚比

一般に多く用いられている範囲の幅厚比として、H形断面部材においては幅厚比  $b/t=7.5$  と幅厚比  $b/t=10$ 、箱形断面部材においては幅厚比  $d/t=25$  と幅厚比  $d/t=30$ 、それぞれ2種類を選択した。なお、H形断面部材の変形性状に影響を及ぼす要因としてはウェブの幅厚比も考えられるが、フランジの局部座屈がウェブに先行することから<sup>21)</sup>、本研究ではフランジ幅厚比を主たる要因とした。

#### (4) 軸力比

火災加熱を受ける鋼構造ラーメンの熱応力解析によれば、外柱においては、熱応力による軸力の変動がほとんど見られない<sup>1)</sup>。鋼柱の耐火性は、概ね存在軸力の大きさで決まると考えられる。曲げ圧縮実験では、軸力比を0.3と0.4と0.5の3水準とした。本論における軸力比の定義は、鋼材の基準強度(F値)と公称断面積の積である公称降伏軸力に対する存在軸力の比である。住宅・事務所等における鋼柱の90%以上が軸力比0.3以内に含まれると報告されているが<sup>12)</sup>、耐震要素としての筋かいを有する鋼構造骨組においては、軸力比0.3以上の鋼柱も数多く存在する。本実験では、比較的高めの軸力比を選択した。

#### (5) 鋼材温度

2章～4章で示したように、鋼材の耐力は400℃位から急激に低下する。本

実験では 600℃位を一般鋼の使用限界と想定し、温度条件は、常温、400℃、500℃、600℃の 4 水準とした。しかし、短柱圧縮実験の結果（図 3.10 と図 3.15）より、鋼材温度 600℃については、軸力比 0.4 と軸力比 0.5 において存在軸力を保持できないことが判明した。よって、軸力比 0.4 と軸力比 0.5 の条件においては、鋼材温度の条件を 600℃から 550℃に変更した。

#### (6) 裏当て金の有無

箱形断面部材に用いた裏当て金が部材の圧縮応力と変形性状に大きな影響を及ぼしたことを、第 3 章の短柱圧縮実験において述べた。これより、曲げ圧縮実験においては、表 5.1 に示すように、裏当て金ありと裏当て金なしの試験体を用いて、両者の比較を一部で試みた。

表 5.1 曲げ圧縮実験の実験条件

断面形状	鋼種 (板の種類)	幅厚比	軸力比	鋼材温度 (°C)				
				常温	400	500	550	600
H-135×135×6×9	SM490A (PL-6A, PL-9)	7.5	0.3	●	●	●		●
			0.4	●	●	●	●	
			0.5	●	●	●	●	
H-120×120×4.5×6	SM490A (PL-4.5B, PL-6B)	10	0.3	●	●	●		●
			0.4	●	●	●	●	
			0.5	●	●	●	●	
□-150×150×6	SM490A (PL-6B, FB-9)	25	0.3	●	●	●		●○
			0.4	●	●	●	●	
			0.5	●	●	●○	●○	
□-135×135×4.5	SM490A (PL-4.5A, FB-9)	30	0.3	●	●	●		●○
			0.4	●	●	●	●	
			0.5	●	●	●○	●○	

注) 板の種類は 2 章で用いた記号を示している。

○は裏当て金なしの試験体を意味する。

## 5.2.2 試験体

曲げ圧縮実験に用いる試験体の形状を、H形断面材の幅厚比  $b/t=7.5$  については図 5.2(a)に、幅厚比  $b/t=10$  については図 5.2(b)に示す。また、裏当て金ありの箱形断面材の幅厚比  $d/t=25$  については図 5.2(c)に、幅厚比  $d/t=30$  については図 5.2(d)に示し、裏当て金なしの箱形断面材の幅厚比  $d/t=25$  については図 5.2(e)に、幅厚比  $d/t=30$  については図 5.2(f)に示す。

鋼種は溶接構造用圧延鋼材(SM490A)である。図 5.2(a)～図 5.2(f)に示すように、試験体の全長は 1200mm とし、試験部分の長さは中央部 600mm とした。全試験体とも試験体の片側 1/4 (図中では右側部分) には鋼の塊が用いられており、試験部分に比べて剛な仕様としている。鋼の塊部分には変形測定治具を取り付けるためのナット M20 が 2 個溶接されており、鋼の塊部分に追従して変形測定治具が移動する仕組みとなっている。さらに、鋼の塊部分と反対に位置する試験部分の端部において、ナット M12 が 1 個溶接されており、ここには、もう一方の変形測定治具がユニバーサルジョイントにより接合される。

本実験に用いたH形断面材と箱形断面材は、溶接により組み立てられたものである。H形断面材の作製は、図 5.2(a)と図 5.2(b)に示すように、ウェブとフランジを両側脚長 6mm の隅肉溶接により行なった。裏当て金ありの箱形断面材の作製は、図 5.2(c)と図 5.2(d)の開先形状部分に示すように、25mm×9mm の裏当て金を用いて、開先角度 45 度、ルート間隔 3mm のレ型完全溶込み溶接により行なった。裏当て金なしの箱形断面材の作製は、図 5.2(e)と図 5.2(f)に示すような開先形状とし、裏波溶接により行なった。

図 5.2(a)～図 5.2(f)に示す試験部分は、所定の温度まで加熱される部分であり、図 5.1 に示した火災階における外柱に相当する。火災階の外柱柱頭に相当する試験部分の右端部は、大きな曲げ変形が生じて局部座屈が発生する部分である。

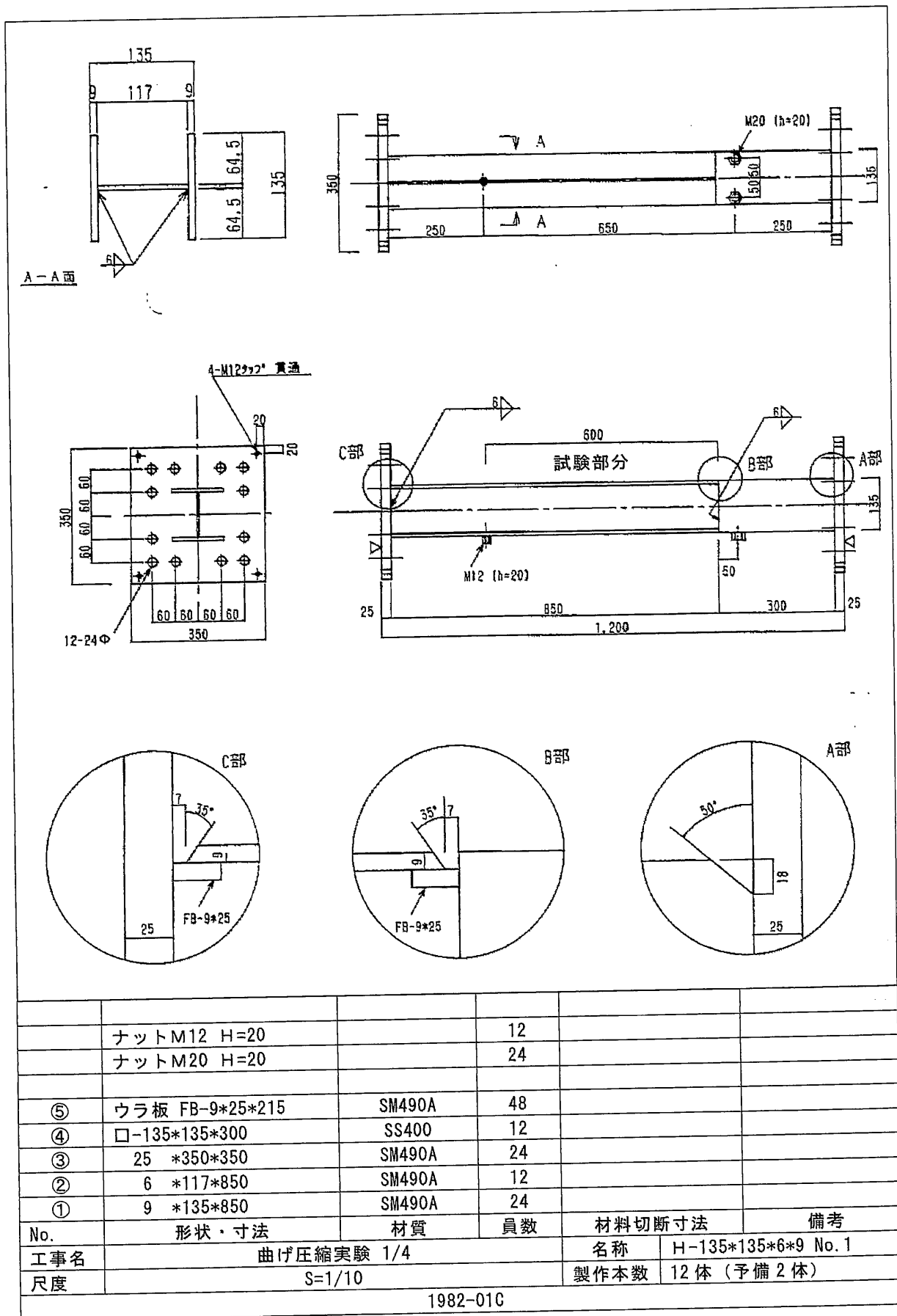
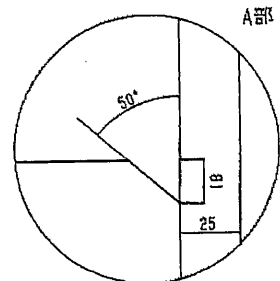
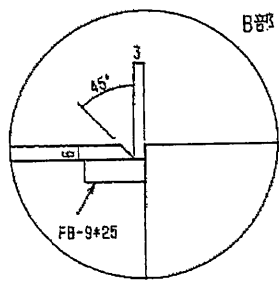
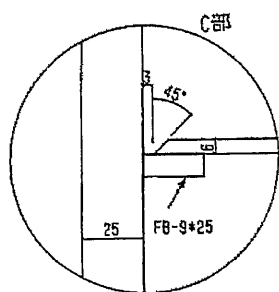
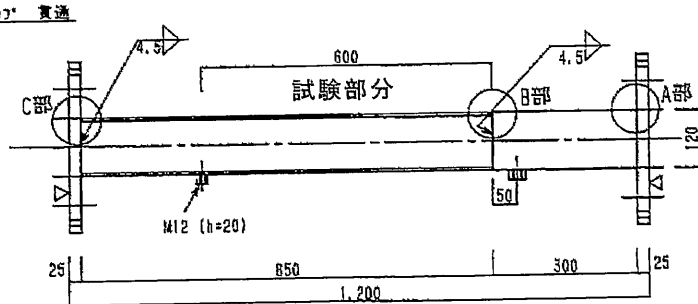
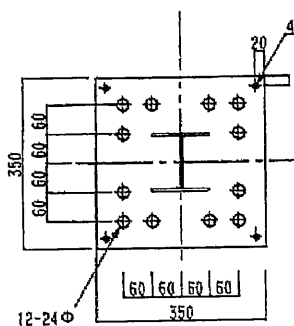
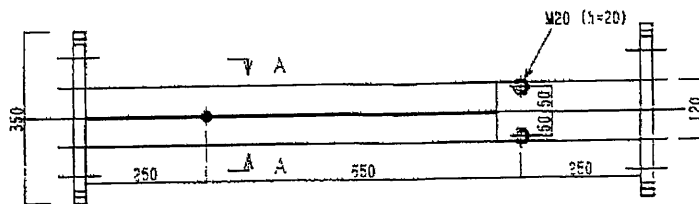
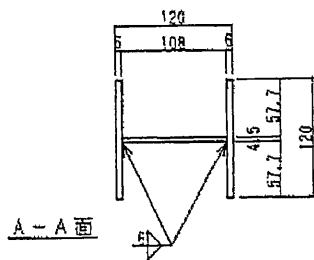


図 5.2(a) H形断面・幅厚比  $b/t=7.5$  の曲げ圧縮実験における試験体



			12		
			24		
⑤	ウラ板 FB-9*25*200	SM490A	48		
④	□-120*120*300	SS400	12		
③	25 *350*350	SM490A	24		
②	4.5*102*850	SM490A	12		
①	6 *120*850	SM490A	24		
No.	形状・寸法	材質	員数	材料切断寸法	備考
工事名	曲げ圧縮実験 2/4			名称	H-120*120*4.5*6 No. 2
尺度	S=1/10			製作本数	12体 (予備2体)

1982-02G

図 5.2(b) H形断面・幅厚比  $b/t=10$  の曲げ圧縮実験における試験体



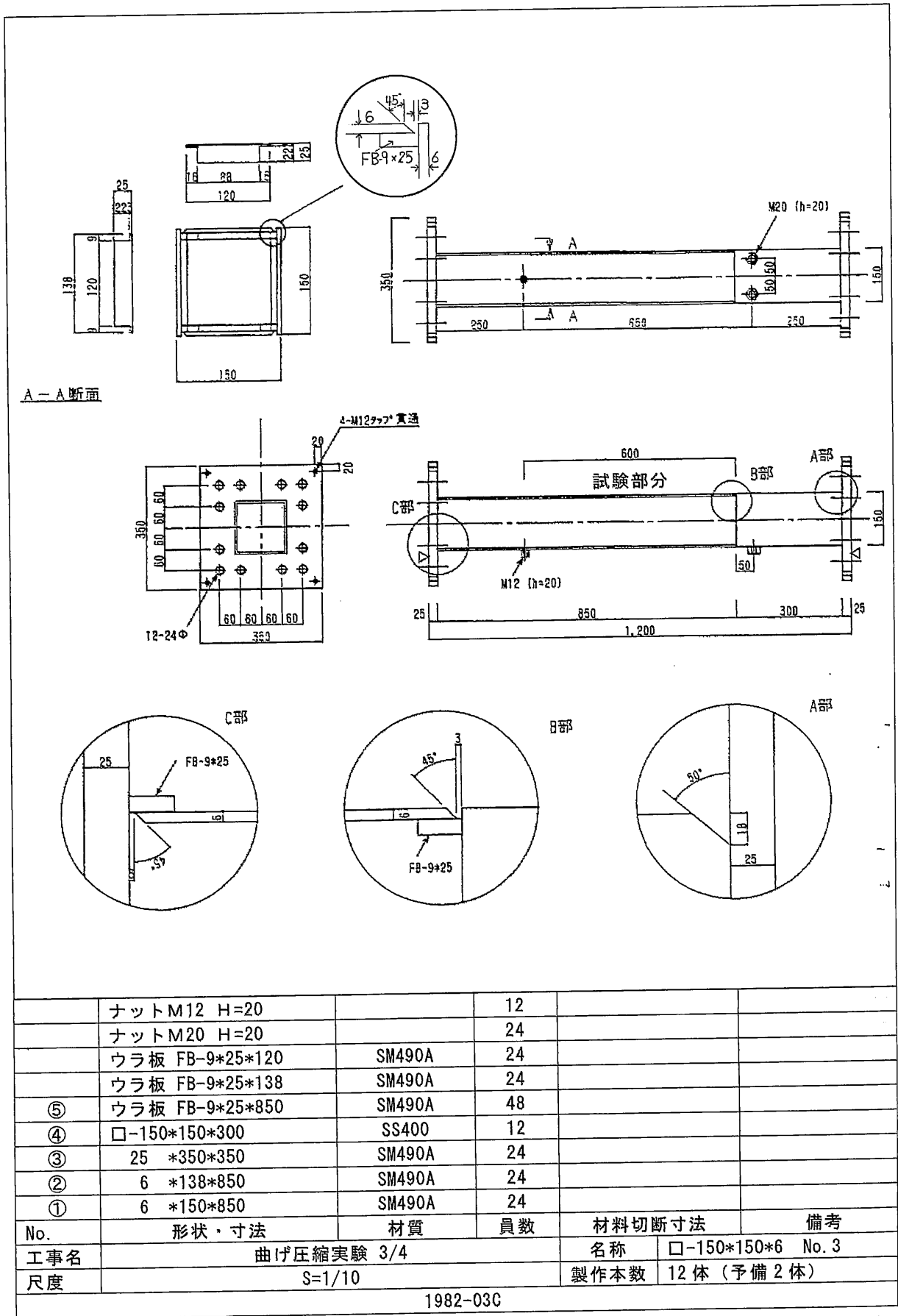


図 5.2(c) 箱形断面・幅厚比  $d/t=25$  の曲げ圧縮実験における試験体 (裏当て金あり)

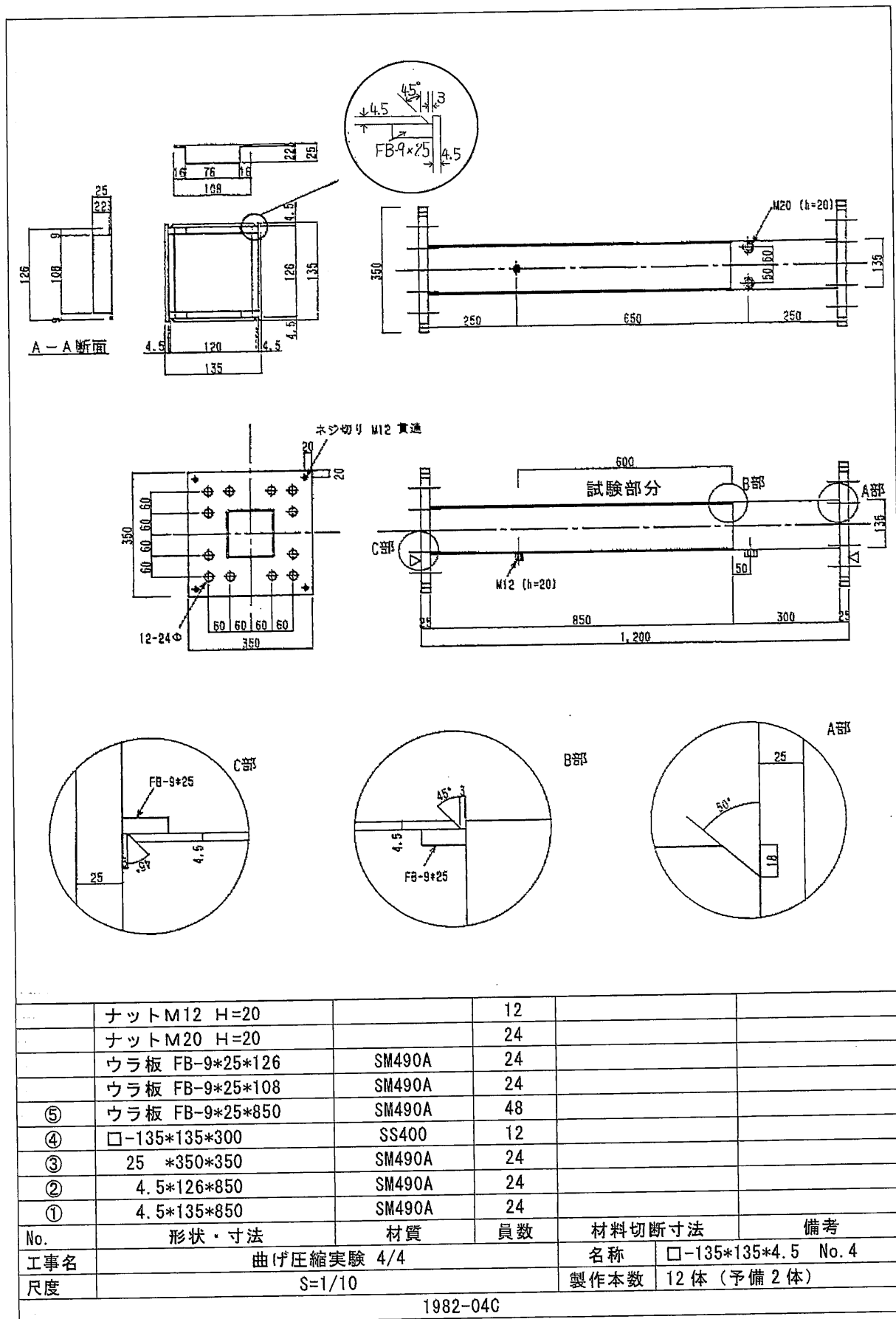
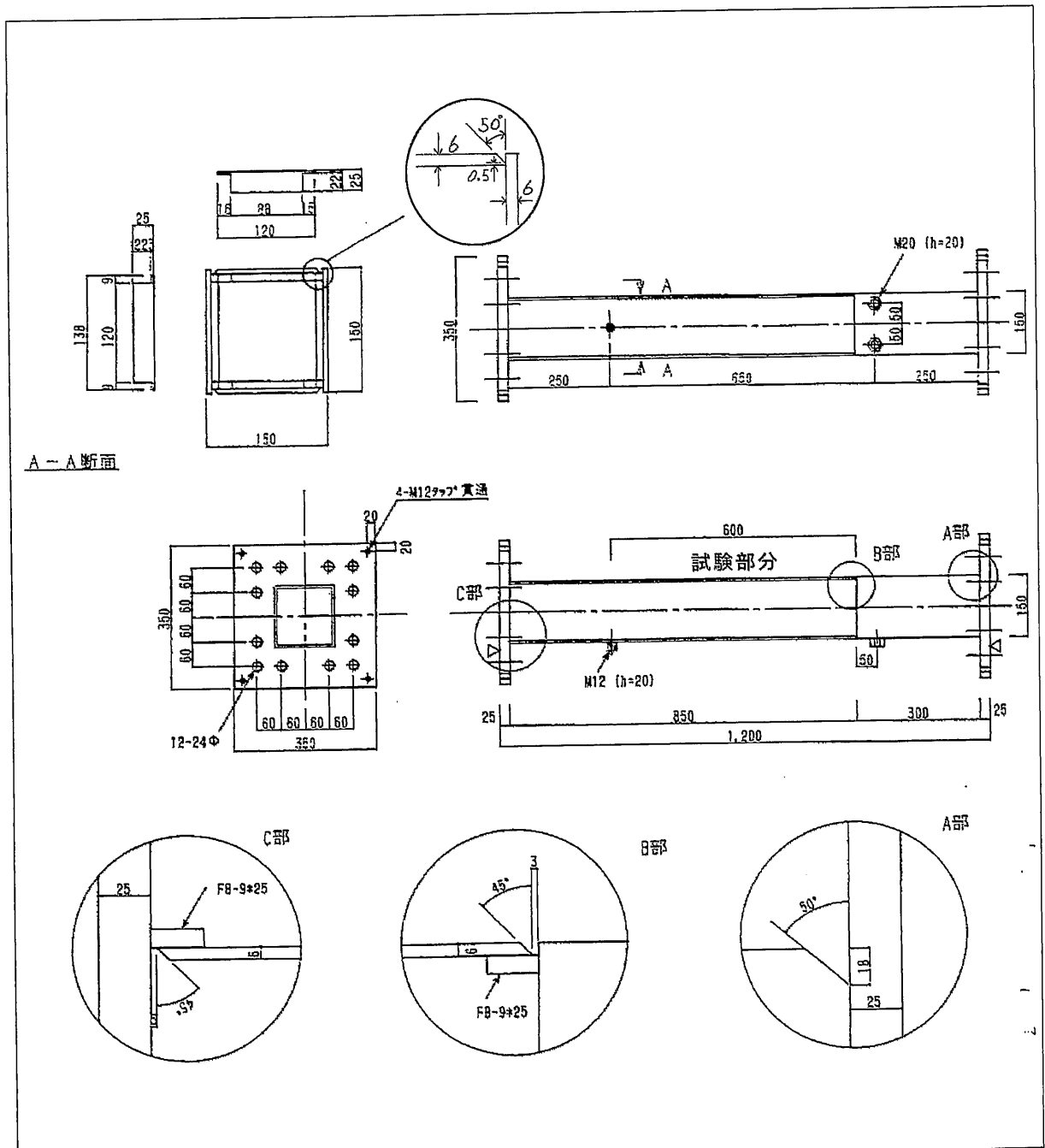
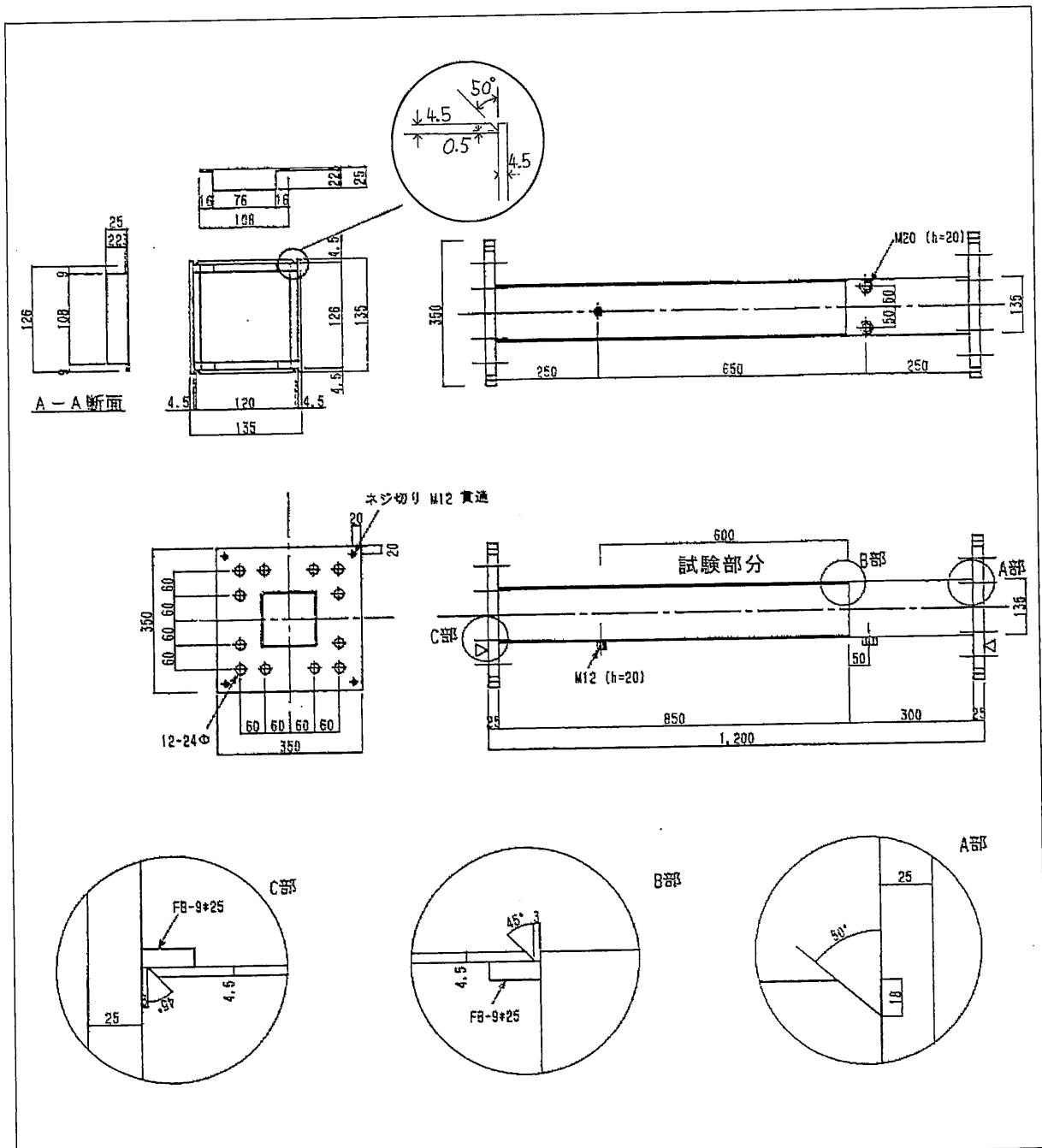


図 5.2(d) 箱形断面・幅厚比  $d/t=30$  の曲げ圧縮実験における試験体 (裏当て金あり)



	ナット M12 H=20		12		
	ナット M20 H=20		24		
	ウラ板 FB-9*25*120	SM490A	24		
	ウラ板 FB-9*25*138	SM490A	24		
⑤					
④	□-150*150*300	SS400	12		
③	25 *350*350	SM490A	24		
②	6 *138*850	SM490A	24		
①	6 *150*850	SM490A	24		
No.	形状・寸法	材質	員数	材料切断寸法	
工事名	曲げ圧縮実験			名称	□-150*150*6
尺度	S=1/10			製作本数	3体 (予備なし)
備考：図面が無い場合、当時の打合せ記録を基に作成した。(2002年9月)					

図 5.2(e) 箱形断面・幅厚比  $d/t=25$  の曲げ圧縮実験における試験体 (裏当て金なし)



	ナットM12 H=20		12		
	ナットM20 H=20		24		
	ウラ板 FB-9*25*126	SM490A	24		
	ウラ板 FB-9*25*108	SM490A	24		
⑤					
④	□-135*135*300	SS400	12		
③	25 *350*350	SM490A	24		
②	4.5*126*850	SM490A	24		
①	4.5*135*850	SM490A	24		
No.	形状・寸法	材質	員数	材料切断寸法	備考
工事名	曲げ圧縮実験			名称	□-135*135*4.5
尺度	S=1/10			製作本数	3体(予備なし)
備考: 図面が無い場合、当時の打合せ記録を基に作成した。(2002年9月)					

図 5.2(f) 箱形断面・幅厚比  $d/t=30$  の曲げ圧縮実験における試験体 (裏当て金なし)

### 5.2.3 実験方法

#### (1) 試験体の設置と芯合わせ

曲げ圧縮実験の実験装置を図 5.3 および写真 5.1 に示す。試験体設置の手順としては、まず、北側の加力梁をチェーンブロックにより水平にし、南側の加力梁を下の梁に設置したジャッキにより水平にする。加力梁が水平であることを確認した後に、試験体と北側の加力梁を高力ボルトで接合する。次に、水平アクチュエーターを送り出して、試験体と南側の加力梁を密着させ高力ボルトで接合する。試験体と加力梁を接合した後に、北側の加力梁につながるチェーンブロックを緩め、南側の加力梁を支えるジャッキを取り外す。次に、水平アクチュエーターにより約 98kN(10tf)の引張力を与え、水平加力系の芯を出す。水平加力系の芯を出した後に、再び水平アクチュエーターの荷重を 0 とし、北側の加力梁と加力側垂直アクチュエーターを接合し、南側の加力梁とピン支持側垂直アクチュエーターを接合する。また同時に、変形測定治具および電気炉を設置する。加力梁が構面外へ横振れしないように設置したリーハイ機構は、加熱前に加力梁と接合しておく。加熱中においては、鋼材の熱膨張による軸力の発生を防ぐために、水平アクチュエーターは荷重 0 を保つように荷重制御する。他方、加力梁の自重が試験体に加わることを防ぐために、加力側垂直アクチュエーターとピン支持側垂直アクチュエーターは変位 0 を保つように変位制御する。

#### (2) 加力方法

図 5.3 および写真 5.1 に示すように、水平アクチュエーターにより試験体に所定の軸力を与えて、加力側垂直アクチュエーターおよびピン支持側垂直アクチュエーターにより試験体に曲げモーメントを与えた。水平アクチュエーターの載荷能力は、引張・圧縮ともに 980kN(100tf)である。加力側垂直アクチュエーターおよびピン支持側垂直アクチュエーターの両者は、引張・圧縮ともに 440kN(45tf)の載荷能力を有している。

曲げ圧縮実験は、火災加熱を受ける外柱を模擬した実験である。曲げ圧縮実験の加力モデルを図 5.4 に示す。鋼材温度が目標温度で安定した後に、まず、水平アクチュエーターを送り出し、所定の軸力を加える。所定の軸力とは、鋼材の基準強度(F 値)と公称断面積の積である公称降伏軸力に軸力比を乗じたも

のである。次に、軸力を一定に保った状態で、加力側垂直アクチュエーターの E 点を下方に送り出し、同時にピン支持側垂直アクチュエーターの B 点を 0 に変位制御し、試験部分に曲げモーメントとせん断力を加える。この際、火災時の状態を想定して、ゆっくりと曲げ変形を与える。軸力が保持できなくなるか、軸変形の増大により試験体が電気炉にぶつかるか、図 5.3 に示す試験部分 600mm における曲げ変形（変位計 1 による値）が 80mm を超えるまで、E 点に強制変位を与えた。

### (3) 変形測定方法

変形測定装置を図 5.5 および写真 5.2 に示す。電気炉から熱が変位計に伝わらないように、C 点と D 点より測定竿を伸ばして、電気炉の外で曲げ変形の測定を行なう装置である。C 点では、ユニバーサルジョイントにステンレス棒を取り付け、ピン接合とする。D 点では、ステンレスボルトによりステンレス製 L 字棒を取り付け、剛接合とする。変位計 1 では、図 5.6 に示す変形モデルにおける C-D 間の相対変位  $\delta_{CD}$  を測定する。C-D 間の相対変位  $\delta_{CD}$  を C-D 間の距離 600mm で除すことにより、D 点において部材が折れ曲った角度  $\theta_{CD}$  を導くことができる。D 点は外柱の柱頭に相当する部分である。D 点において部材が折れ曲った角度  $\theta_{CD}$  を、本論では折れ曲り角と定義する。変位計 2 では、図 5.6 に示す D 点の絶対変位  $\delta_D$  を測定する。 $\delta_D$  を得ることで、P- $\delta$  効果により D 点に生じるモーメントを導くことができる。

### (4) 加熱方法

加熱方法は、3 章に記した短柱圧縮実験とほぼ同じであるので割愛する。

### (5) 温度測定方法

鋼材温度の測定方法は 4 章に記した純曲げ実験と同様であるが、鋼材温度の測定位置が若干異なる。温度測定位置を図 5.7 に示し、熱電対の取り付け状況を写真 5.3 に示す。H 形断面部材の実験においては、C 点と D 点の近傍において各 5 点、計 10 点の温度を測定した。箱形断面部材の実験においては、C 点と D 点の近傍において各 4 点、試験部分の中央部において 2 点、計 10 点の温度を測定した。

温度測定結果の一部を、H 形断面部材については図 5.8(a)に、箱形断面部材

については図 5.8(b)に示す。1 分あたり 10°C位で鋼材温度を上昇させ、全ての温度が目標温度の±20°C以内に収まるように制御した。鋼材温度のバラツキが若干生じているのは、D 点近傍の温度がその他の部分の温度より 20°C~30°C位低かったことによる。D 点近傍においては、鋼の塊部分に多くの熱を奪われて、試験体の中央部や C 点近傍の温度より若干低い値を示した。

#### (6) その他

曲げ圧縮実験に用いた機器の一覧を表 5.2 に示す。また、実験時の様子を写真 5.4 および写真 5.5 に示し、実験中の覚え書きを表 5.3(a)~表 5.3(c)に示す。

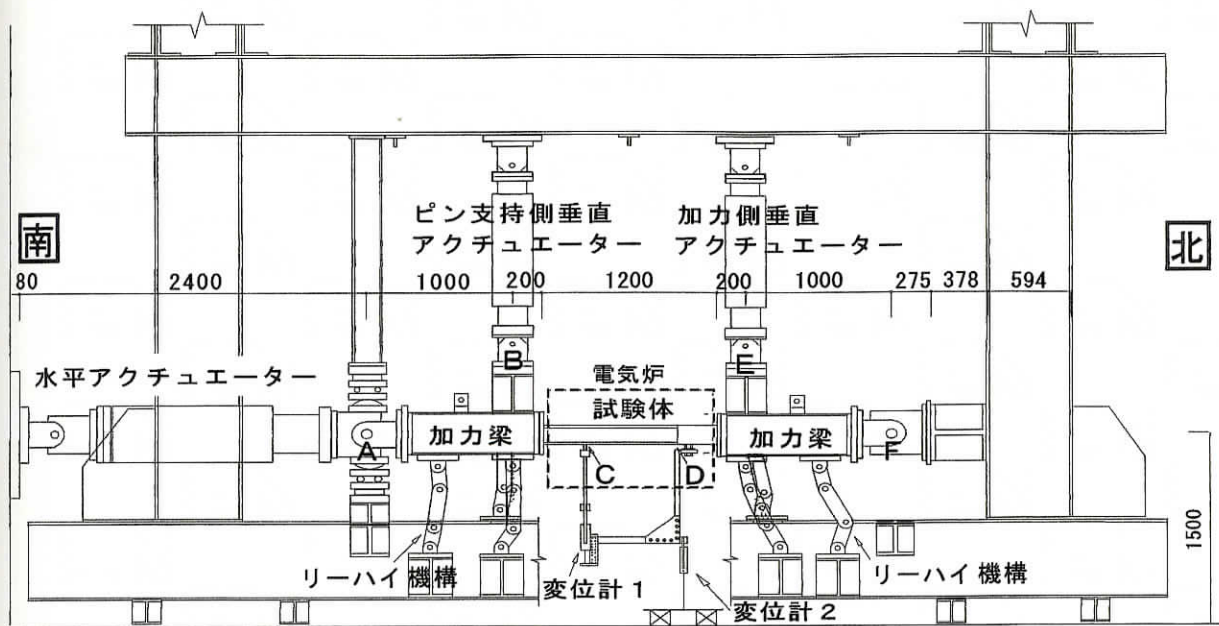


図 5.3 曲げ圧縮実験の実験装置

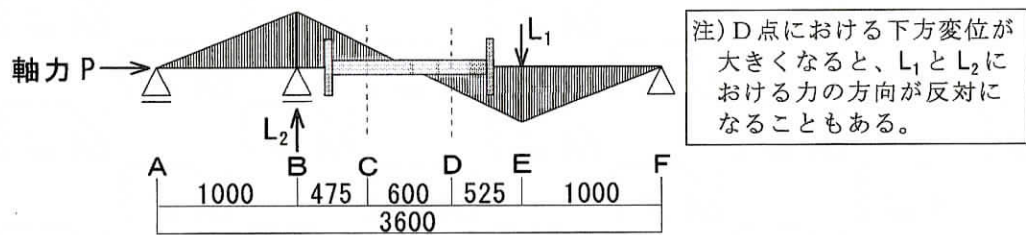


図 5.4 曲げ圧縮実験の加力モデル

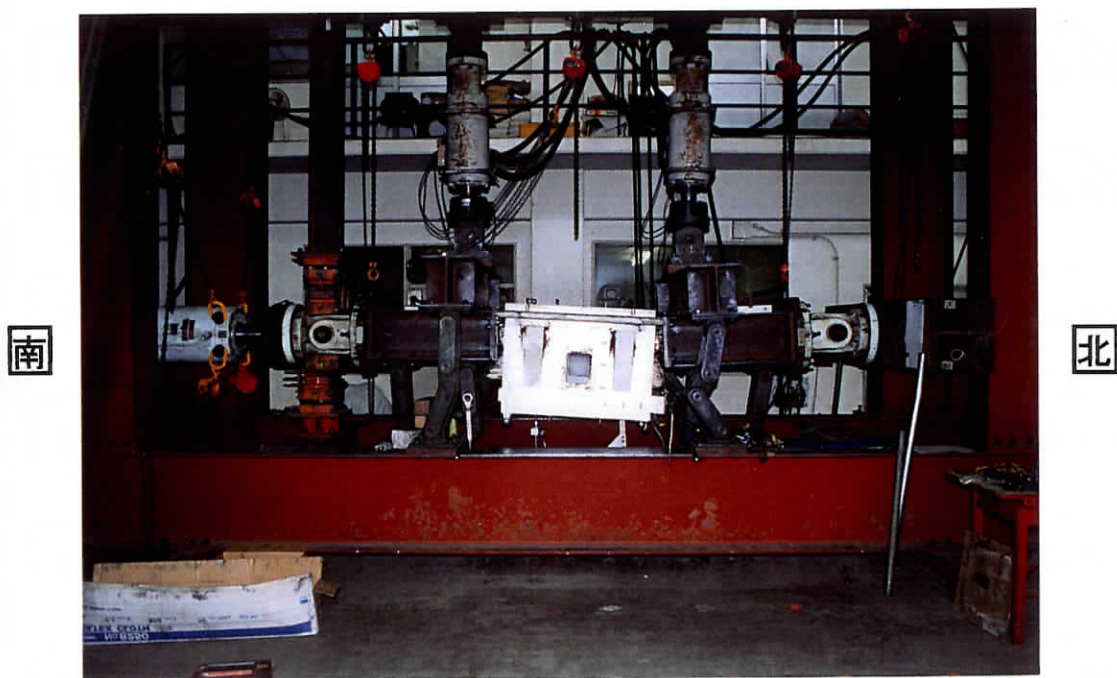


写真 5.1 曲げ圧縮実験の実験装置



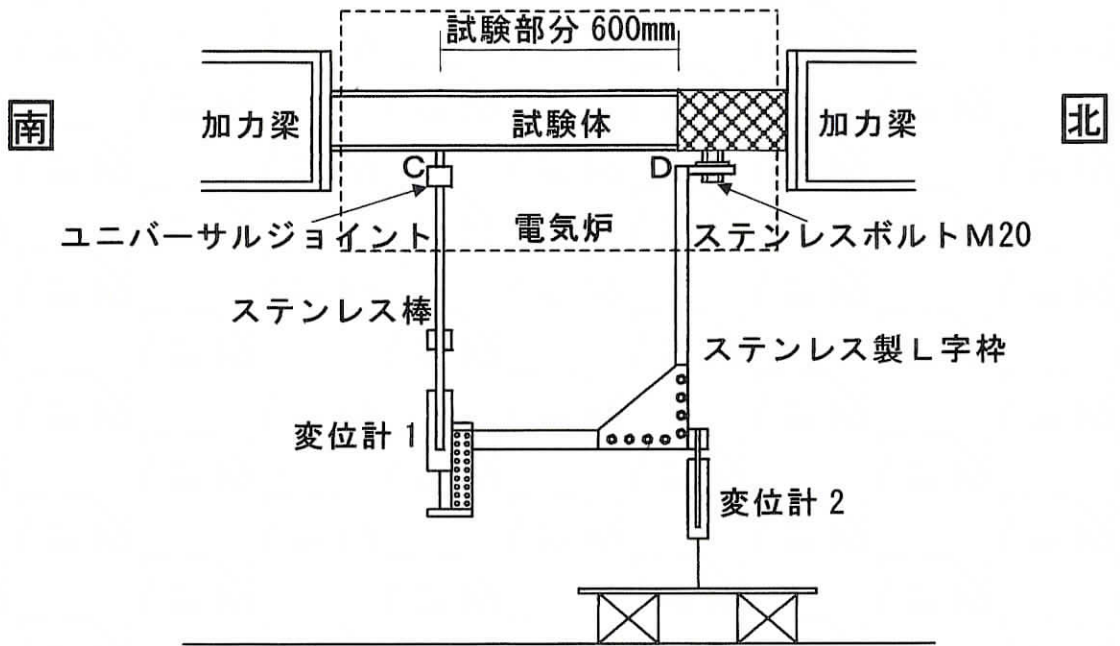


図 5.5 曲げ圧縮実験の変形測定装置

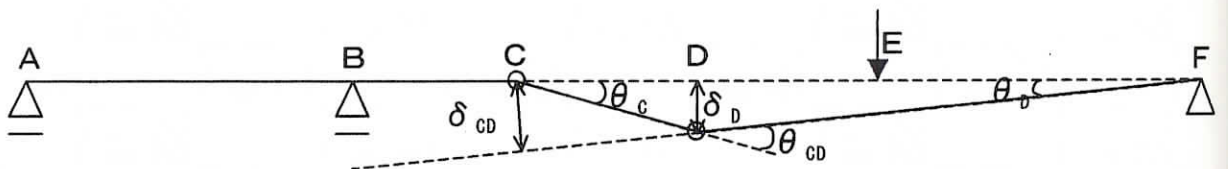


図 5.6 曲げ圧縮実験の変形モデル

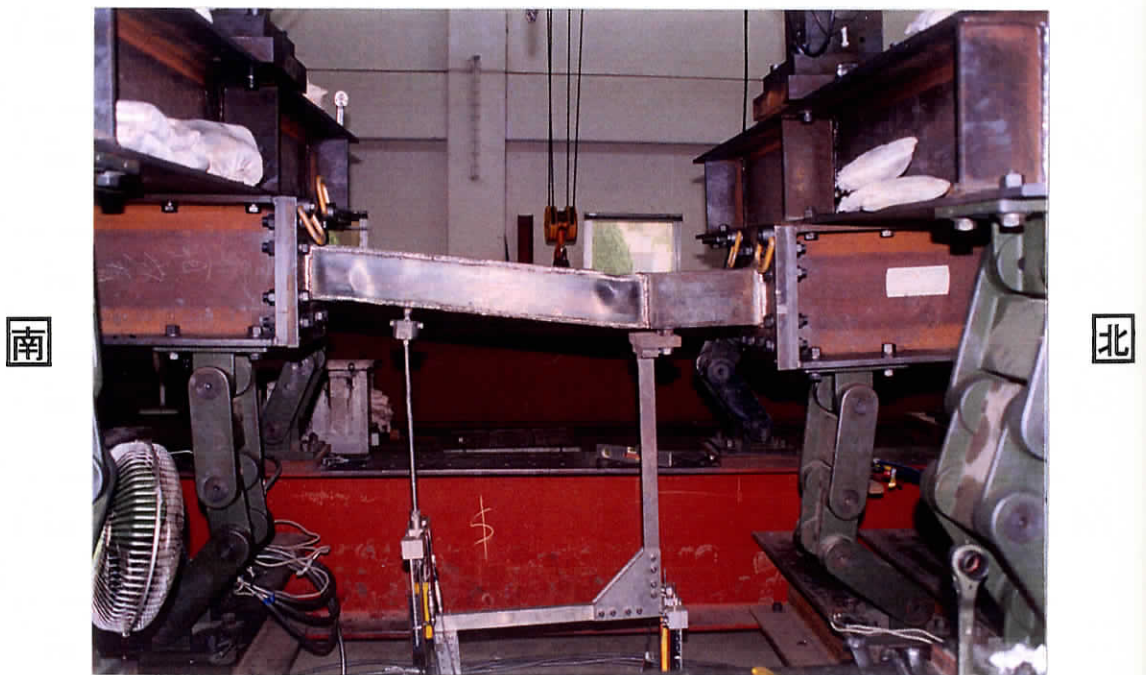


写真 5.2 曲げ圧縮実験の変形測定装置

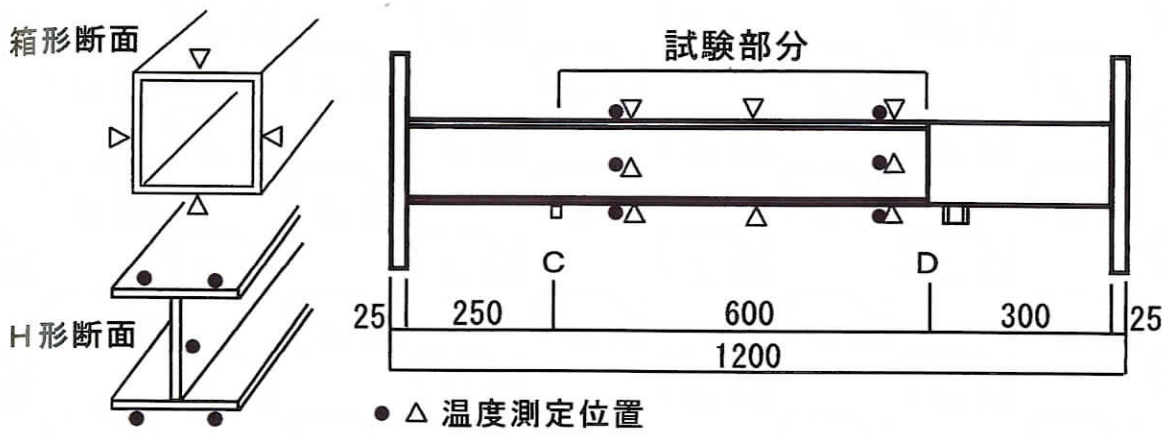


図 5.7 曲げ圧縮実験の温度測定位置

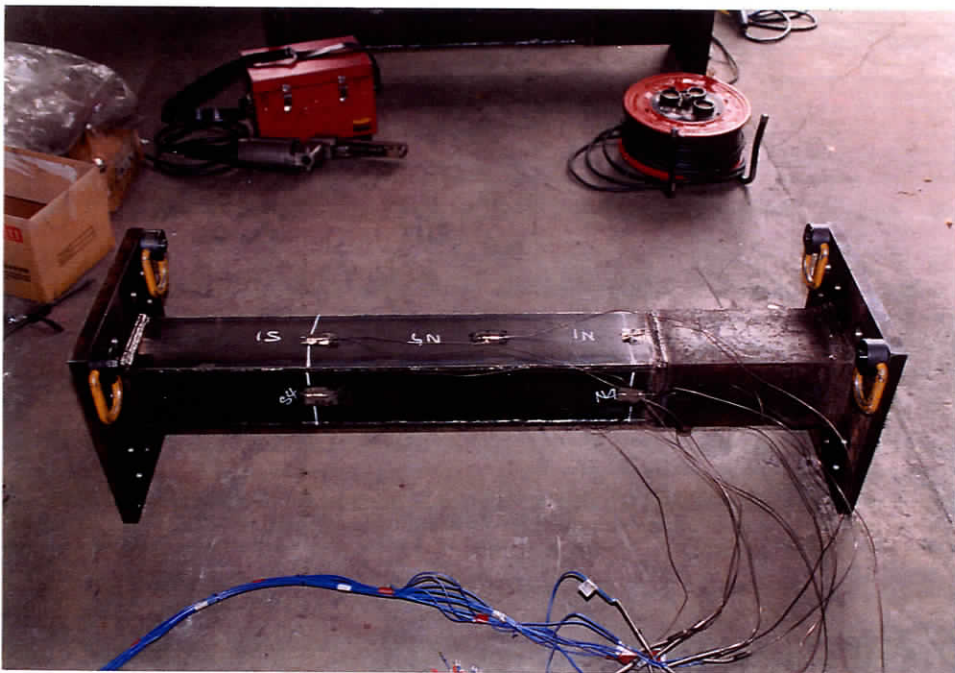


写真 5.3 熱電対取り付け状況 (箱形断面部材)

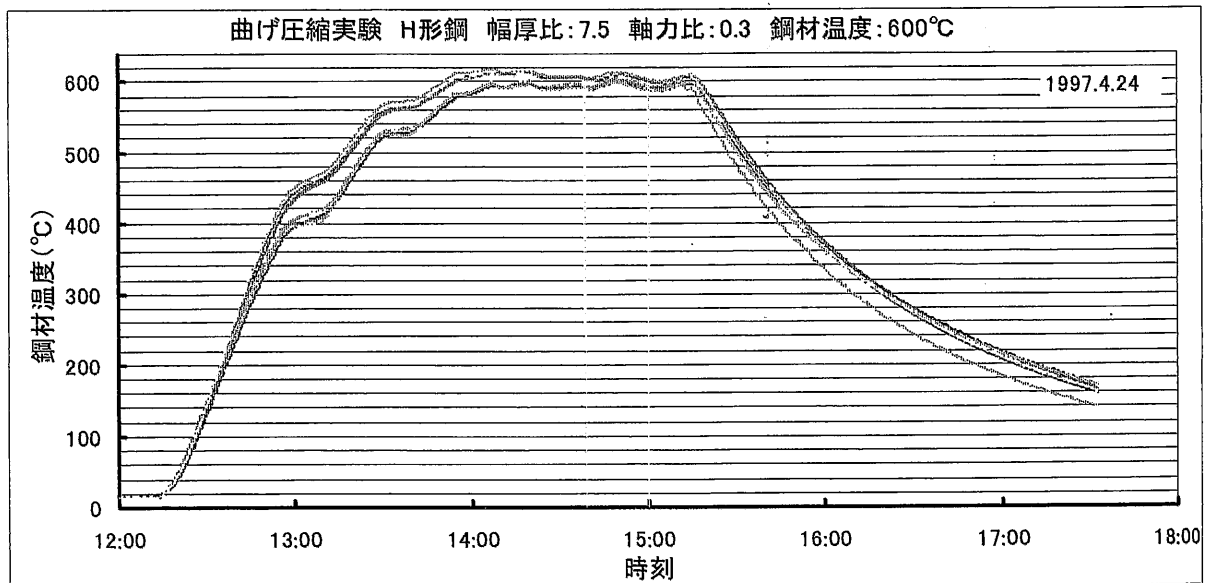
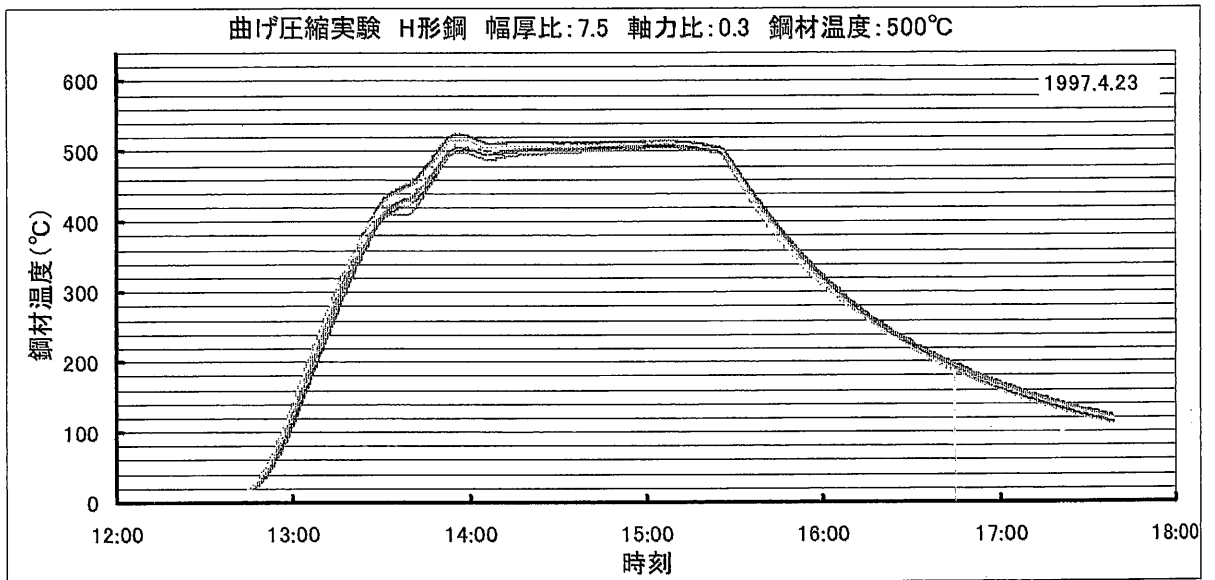
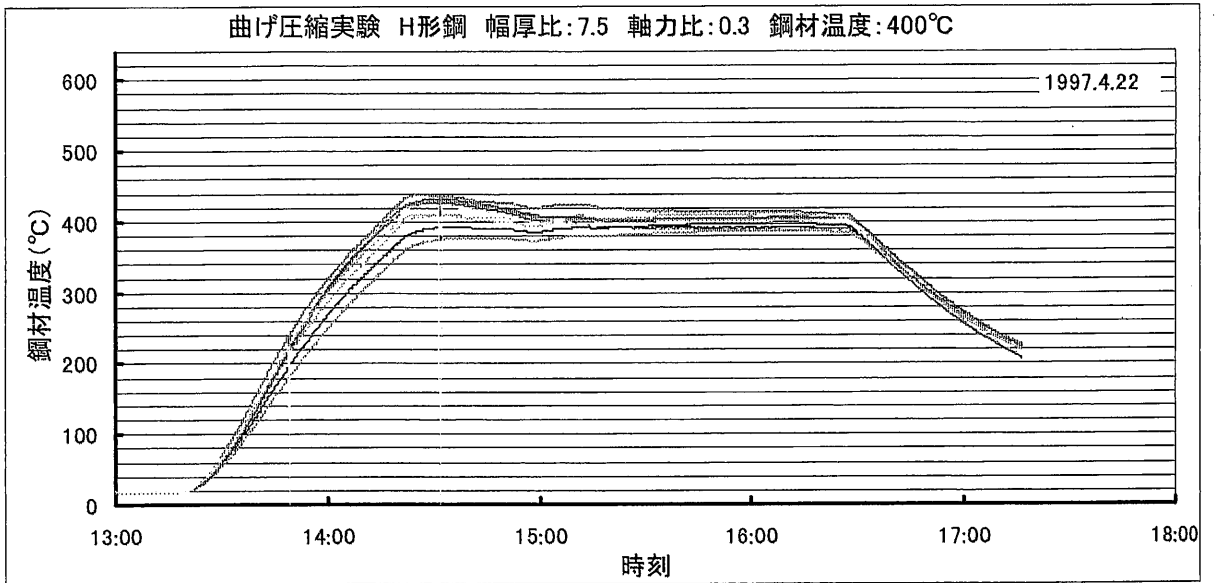


図 5.8(a) 温度測定結果の一部 (H形断面・幅厚比  $b/t=7.5$ ・軸力比 0.3)

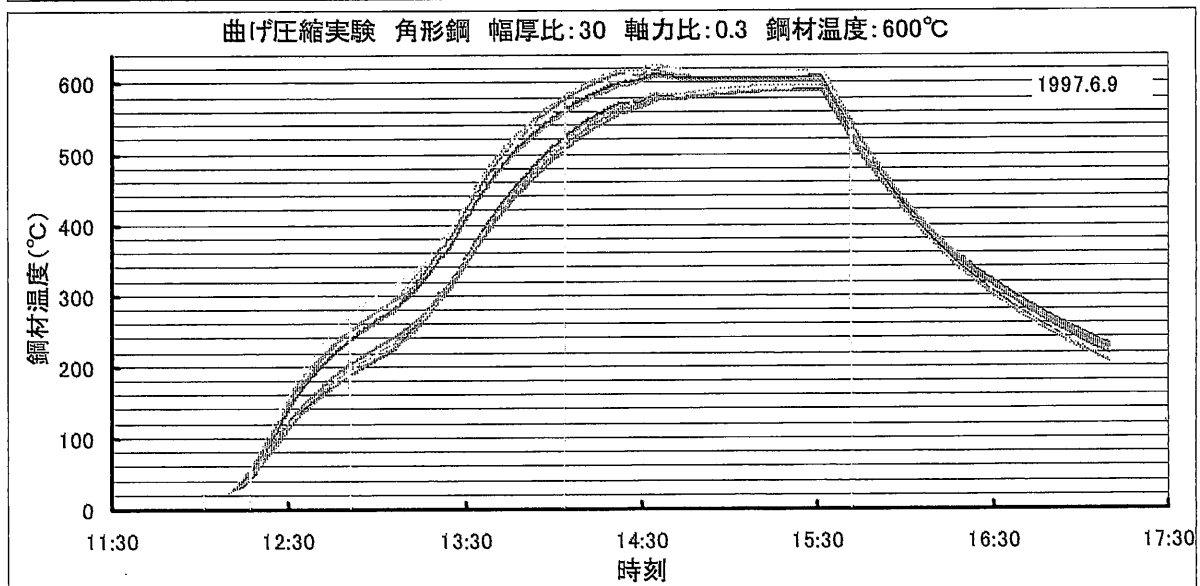
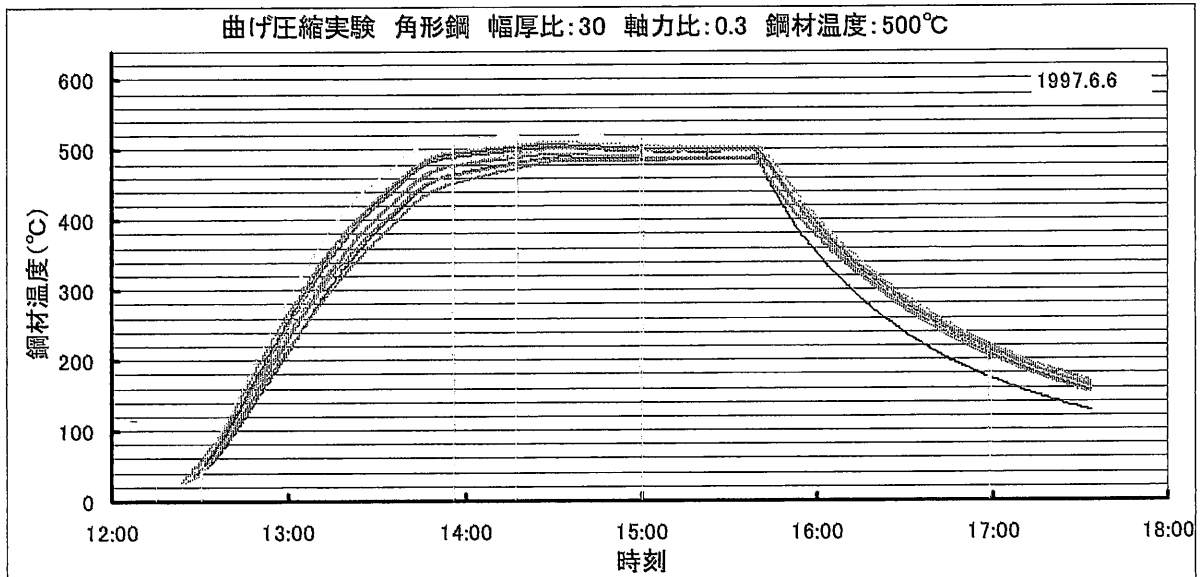
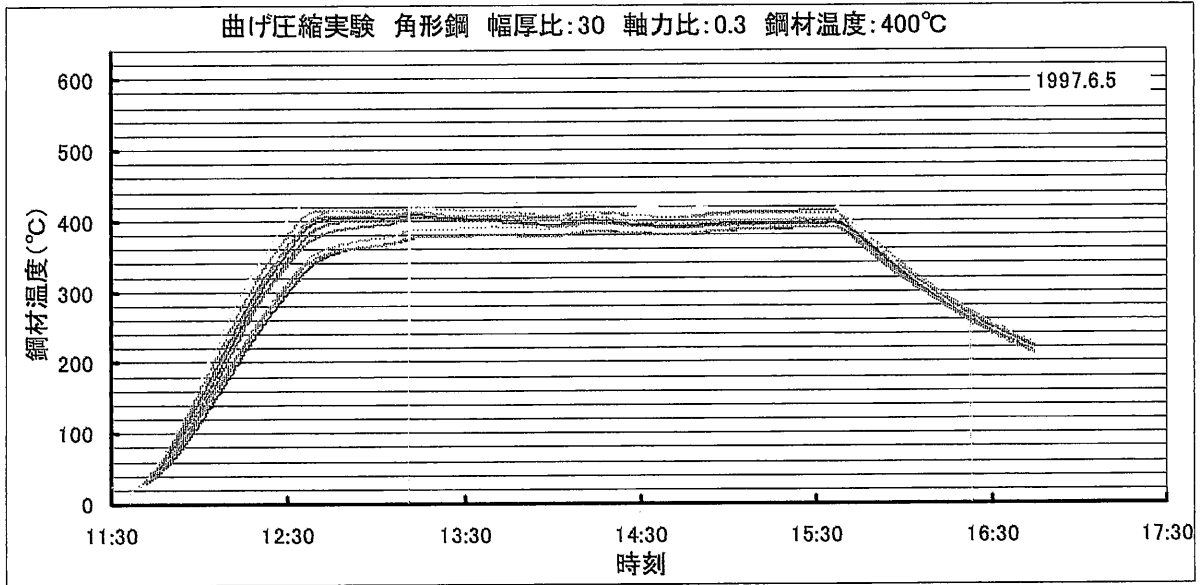


図 5.8(b) 温度測定結果の一部 (箱形断面・幅厚比  $d/t=30$ ・軸力比 0.3)

表 5.2 試験機器の一覧

項目		製造元	型式
荷重	軸力	サギノミヤ	サーボ・パルサ EHF-1000 (能力 100tf, 揚程±150mm)
	曲げ	島津製作所	サーボ・パルサ BHP-30 (能力 45tf, 揚程±100mm)
変形	C-D 間	東京測器研究所	摺動型変位計 SDP-200R (容量 200mm, 感度 0.01mm)
	D 点	東京測器研究所	摺動型変位計 SDP-200R (容量 200mm, 感度 0.01mm)
	軸方向	サギノミヤ	サーボ・パルサ EHF-1000 (能力 100tf, 揚程±150mm)
	B,E 点	島津製作所	サーボ・パルサ BHP-30 (能力 45tf, 揚程±100mm)
加熱	加熱	江島製作所	箱型電気炉 (長さ 1100mm, 幅 800mm, 深さ 700mm)
	制御	江島製作所	電圧調整器 (バリタップス 最高出力 200V)
温度	計測	石川製作所	シース型 K 熱電対 T35 SUS316 径 1.6φmm
記録		東京測器研究所	データロガー TDS-301



写真 5.4 実験準備の様子



写真 5.5 実験中の様子

表 5.3(a) 実験中の覚え書き (H形断面部材)

試験体			試験日	加力時間 (分)	実験記録
断面 幅厚比	軸力比 軸力	温度 (°C)			
H形 b/t=7.5	0.3 304kN	常温	1997.4.21	160	曲げ変形 11mm において、音を伴い、荷重が下がる。曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.4.22	54	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		500	1997.4.23	65	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		600	1997.4.24	40	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
	0.4 405kN	常温	1997.5.16	60	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.5.6	62	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		500	1997.4.25	56	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		550	1997.5.7	55	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
	0.5 507kN	常温	1997.6.27	46	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.5.8	54	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		500	1997.5.9	45	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		550	1997.5.12	30	曲げ変形 46mm で試験体端部が電気炉にぶつかり、実験終了。
H形 b/t=10	0.3 187kN	常温	1997.6.19	45	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.5.13	65	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		500	1997.5.14	45	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		600	1997.5.15	42	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
	0.4 249kN	常温	1997.6.2	63	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.5.26	40	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		500	1997.5.27	43	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		550	1997.5.28	43	曲げ変形 48mm で試験体端部が電気炉にぶつかりそうになり、実験終了。
	0.5 312kN	常温	1997.5.30	78	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.5.29	50	曲げ変形 71mm で試験体端部が電気炉にぶつかりそうになり、実験終了。
		500	1997.6.3	40	曲げ変形 58mm で試験体端部が電気炉にぶつかりそうになり、実験終了。
		550	1997.6.4	30	曲げ変形 23mm で軸力を保持できず、実験終了。

表 5.3(b) 実験中の覚え書き (箱形断面部材・裏当て金あり)

試験体			試験日	加力 時間 (分)	実験記録
断面 幅厚比	軸力比 軸力	温度 (°C)			
箱形 d/t=25	0.3 422kN	常温	1997.6.30	58	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.7.4	45	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		500	1997.7.7	48	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		600	1997.7.8	31	曲げ変形 58mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
	0.4 564kN	常温	1997.6.26	45	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.7.3	54	曲げ変形 73mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
		500	1997.7.2	42	曲げ変形 72mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
		550	1997.7.1	27	曲げ変形 62mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
	0.5 705kN	常温	1997.6.20	39	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.6.23	38	曲げ変形 63mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
		500	1997.6.24	46	曲げ変形 59mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
		550	1997.6.25	30	曲げ変形 45mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
箱形 d/t=30	0.3 316kN	常温	1997.6.27	75	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.6.5	64	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		500	1997.6.6	45	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		600	1997.6.9	30	曲げ変形 64mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
	0.4 420kN	常温	1997.6.20	50	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.6.10	68 (110)	曲げ変形 66mm で水平アクチュエーターのオイル の温度が 60°C を超え、荷重を一時下げる。 曲げ変形 79mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
		500	1997.6.11	60	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		550	1997.6.12	35	曲げ変形 71mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
	0.5 526kN	常温	1997.6.13	40	曲げ変形 80mm を超え、実験終了。
		400	1997.6.16	61	曲げ変形 75mm で試験体端部が電気炉にぶつかり、 実験終了。
		500	1997.6.17	43	曲げ変形 71mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
		550	1997.6.18	34	曲げ変形 53mm で軸力を保持できず、実験終了。



表 5.3(c) 実験中の覚え書き (箱形断面部材・裏当て金なし)

試験体			試験日	加力 時間 (分)	実験記録
断面 幅厚比	軸力比 軸力	温度 (°C)			
箱形 d/t=25	0.3 335kN	600	1997.7.16	40	曲げ変形 44mm で軸力を保持できず、実験終了。
	0.5 559kN	500	1997.7.15	30	曲げ変形 64mm で試験体端部が電気炉にぶつかり そうになり、実験終了。
		550	1997.7.14	5	曲げ変形 15mm で軸力を保持できず、実験終了。
箱形 d/t=30	0.3 228kN	600	1997.7.11	35	曲げ変形 57mm で軸力を保持できず、実験終了。
	0.5 380kN	500	1997.7.10	30	曲げ変形 56mm で軸力を保持できず、実験終了。
		550	1997.7.9	15	曲げ変形 34mm で軸力を保持できず、実験終了。

## 5.2.4 H形断面部材の実験結果

### (1) 実験結果の概要

H形断面部材に関する曲げ圧縮実験は、表 5.1 に示すように、幅厚比・軸力比・鋼材温度を要因として 24 体について行なった。本節では、曲げ圧縮実験より得た生データの一部を図 5.9(a)～図 5.9(c)に示す。全試験体の生データについては資料編に示している。曲げ圧縮実験では、図中の(イ)～(リ)に示す 9 種類の生データを得た。以下に箇条書きで説明する。

- ・ 図中(イ)～(リ)の横軸は、加力を開始してからの経過時間で統一している。ここでは、所定の温度に達して水平アクチュエーターに軸力を与える直前を 0 分としている。
- ・ 図中(イ)の縦軸は、水平アクチュエーターで計測された荷重を示し、図 5.3 に示す A 点における存在軸力 (図 5.4 に示す記号 : P) である。水平アクチュエーターの暴走を避けるため、変位制御によって所定の軸力を維持した。
- ・ 図中(ロ)の縦軸は、加力側垂直アクチュエーターで計測された荷重を示し、図 5.3 に示す E 点における集中荷重 (図 5.4 に示す記号 :  $L_1$ ) である。火災階の加熱梁に生じる軸力に相当する荷重である。
- ・ 図中(ハ)の縦軸は、ピン支持側垂直アクチュエーターで計測された荷重を示し、図 5.3 に示す B 点における支点反力 (図 5.4 に示す記号 :  $L_2$ ) である。火災階の床を支える梁に生じる軸力に相当する荷重である。
- ・ アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として示している。
- ・ 図中(ニ)の縦軸は、水平アクチュエーター自身の変位を示している。この変位は、試験体の圧縮変形のみならず、加力梁の圧縮変形やピンのずれを含んでいる。
- ・ 図中(ホ)の縦軸は、加力側垂直アクチュエーター自身の変位を示している。火災階の加熱梁の伸びだしに相当する変位である。
- ・ 図中(ヘ)の縦軸は、ピン支持側垂直アクチュエーター自身の変位を示している。外柱の柱脚における水平変位をゼロと仮定したことに対応する。
- ・ アクチュエーター自身の変位は、伸びを正とし、縮みを負として示している。
- ・ 図中(ト)の縦軸は、図 5.5 に示す変位計 1 により計測された値であり、C-D 間の相対変位 (図 5.6 に示す記号 :  $\delta_{CD}$ ) である。外柱の柱頭部における折れ曲り量を示すものである。

- ・ 図中(チ)の縦軸は、図 5.5 に示す変位計 2 により計測された値であり、D 点の絶対変位 (図 5.6 に示す記号:  $\delta_D$ ) である。柱の柱頭部における最大の水平変位量に相当する。
- ・ 変位計の値は、伸びを正とし、縮みを負として示している。
- ・ 図中(リ)の縦軸は、図 5.7 に示す位置において計測された鋼材温度である。

まず、十分に軸力を保持できた例として、幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.3、鋼材温度  $400^\circ\text{C}$  の結果を図 5.9(a) に示す。図中の(イ)に示すように、10 分～45 分において曲げ変形を徐々に増加している間、所定の存在軸力を維持している。図中の(ロ)と(ハ)に示すように、加力側垂直アクチュエーターの圧縮荷重の増加・減少に対応し、ピン支持側垂直アクチュエーターの引張荷重が増加・減少している。図中の(ニ)に示すように、軸方向変位は、所定の存在軸力を与える過程において生じ、その後 30 分位まではほぼ一定値を保ち、30 分以降において増加し、45 分より加力側垂直アクチュエーターの除荷過程に入っても一定値を保ち、水平アクチュエーターの除荷により若干減少するが、軸方向変位は残留している。図中の(ホ)に示すように、加力側 E 点に与えた強制変位は最大 55mm 程度であり、除荷後には大きな変形が残った。図中の(ヘ)に示すように、ピン支持側 B 点において変位は殆ど生じていない。図中の(ト)に示すように、試験体が軸力を保持した場合には、C・D 間の相対変位が 80mm に至るまで、加力側 E 点に強制変位を与えた。C・D 間の相対変位が 80mm の時、図中の(チ)に示すように、D 点の絶対変位は 70mm 位を示している。両者ともに残留変位は大きい。図中の(リ)に示すように、目標温度  $400^\circ\text{C}$  の実験において、試験部分の鋼材温度は  $385^\circ\text{C}$  ～ $415^\circ\text{C}$  を示している。

次に、C・D 間の相対変位が 80mm に至るまで軸力を保持し得たもう一つの例として、幅厚比  $b/t=10$ 、軸力比 0.3、鋼材温度  $600^\circ\text{C}$  の結果を図 5.9(b) に示す。図中の(ロ)と(ホ)に示すように、E 点の加力側垂直アクチュエーターの変位が増加するにつれて、このアクチュエーターに生じる圧縮力は増加するが、15 分以降においてその圧縮力は減少し、30 分位には引張に転じる。この現象は、水平アクチュエーターの  $P \cdot \delta$  効果による倒れ込みを加力側垂直アクチュエーターが抑制していることを示している。火災加熱を受ける鋼梁においては、熱膨張に伴い圧縮力が生じるが、熱膨張による変形が極めて増大した場合に、鋼梁の軸力が引張に転じる例もある<sup>13)</sup>。加力側垂直アクチュエーターは、加熱を受ける鋼梁の挙動を模擬していると考えられる。図中の(ニ)に示すように、30 分以

降における軸変位の増加は顕著であり、さらに E 点に強制変位を与え続ければ軸力を保持できなかつた可能性もある。図中の(ト)と(チ)に示すように、C-D 間の相対変位が 80mm の時、D 点の絶対変位は 50mm 位を示している。図 5.9(a) に示した幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.3、鋼材温度  $400^{\circ}\text{C}$  では、C-D 間の相対変位が 80mm の時、D 点の絶対変位が 70mm と大きな値を示していた。鋼材温度  $400^{\circ}\text{C}$  においては、図 5.6 に示す C 点よりも左側の B 点寄りに局部座屈が発生するため、同じ  $\delta_{CD}$  の値を示しても  $\delta_D$  の値が大きくなる。図中の(リ)において、15 分以降における試験部分の鋼材温度が、全体的に若干低下している。試験体の変形に伴い電気炉との間に隙間が生じ、そこから熱が外に逃げたためと考えられる。ただし、加力中は、鋼材温度  $580^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$  を保っている。

最後に、幅厚比  $b/t=10$ 、軸力比 0.5、鋼材温度  $550^{\circ}\text{C}$  の結果を図 5.9(c) に示す。C-D 間の相対変位が 80mm に至る前に、軸力を保持できなくなつた例である。図中の(ニ)に示すように、15 分以降における軸変位の増加は顕著である。20 分以降より、変位制御により所定の存在軸力を維持することが不可能となつた。

## (2) 実験終了後における試験体の変形状況

H 形断面部材における曲げ圧縮実験終了後の変形状況として、軸力比 0.3 の試験体を写真 5.6(a) に、軸力比 0.4 の試験体を写真 5.6(b) に、軸力比 0.5 の試験体を写真 5.6(c) に示す。図中の左段に幅厚比  $b/t=7.5$  の試験体を示し、右段に幅厚比  $b/t=10$  の試験体を示す。

写真 5.6(a) に示す軸力比 0.3 における変形状況を見ると、全ての試験体に共通して、試験体右側の鋼の塊部分に近い試験部分に局部座屈が激しく生じ、試験部分が折れ曲っている。局部座屈幅は部材幅とほぼ同じ位である。この部分の変形に着目して、本実験では結果を整理している。常温および  $400^{\circ}\text{C}$  においては、もう一方の折れ曲り部分が、試験部分の左側端部よりも外側のエンドプレート近傍において生じている。 $400^{\circ}\text{C}$  位までは、鋼材の強度が常温とあまり変わらない。よって、図 5.4 に示す曲げモーメントの大きい外側において、折れ曲りが生じたものと考えられる。 $500^{\circ}\text{C}$  および  $600^{\circ}\text{C}$  においては、試験部分において折れ曲りが生じている。図中の右段に示す幅厚比  $b/t=10$  の方が、局部座屈の発生が激しいようである。

写真 5.6(b) および写真 5.6(c) に示す軸力比 0.4 および軸力比 0.5 の試験体においても、軸力比 0.3 における試験体の変形状況と概ね同じである。写真 5.6(c)

に示す幅厚比  $b/t=10$ 、軸力 0.5、鋼材温度  $550^{\circ}\text{C}$  の試験体は、実験の途中で軸力を保持できなくなった試験体である。写真 3.8 に示した短柱圧縮実験の試験体に見られたような圧縮変形を示している。

### (3) H形断面部材の曲げ圧縮変形性状

曲げ圧縮実験は、大きな水平変位を受ける外柱の柱頭における曲げ圧縮変形性状を明らかにすることを目的として行なったものである。本実験においては、図 5.3 に示す D 点が外柱の柱頭に相当する。図 5.10 の(a)~(f)は、D 点に生じる曲げモーメントと折れ曲り角の関係を示したものである。図中の縦軸に示す無次元化モーメントは、D 点に生じる曲げモーメント  $M$  を常温時の公称全塑性モーメント  $M_p$  で除した値である。D 点に生じる曲げモーメント  $M$  は、図 5.4 の加力モデルと図 5.6 の変形モデルに示すように、下の(5.1)式により算定される。

$$M = \frac{1000}{3600} \times (-2075 \times L_1 - 1525 \times L_2) + P \times \delta_D \quad \dots (5.1) \text{式}$$

記号の意味を以下に示す。

- $L_1$  : 加力側垂直アクチュエーターの荷重 (引張を正)
- $L_2$  : ピン支持側垂直アクチュエーターの荷重 (引張を正)
- $P$  : 水平アクチュエーターの荷重 (引張を正)
- $\delta_D$  : D 点における絶対変位 (変位計 2 の伸び方向を正, mm)

図 5.10 の横軸は、図 5.6 に示したように、C-D 間の相対変位  $\delta_{CD}$  を試験部分の長さ 600mm で除した、折れ曲り角  $\theta_{CD}$  である。

図 5.10 の(a)に示す幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.3 の結果を見ると、折れ曲り角の増加に伴い、曲げモーメントが増加する。最大曲げモーメントに達した後において、折れ曲り角の増大に伴う曲げモーメントの低下はあまり見られない。 $400^{\circ}\text{C}$ において、折れ曲り角  $1/30$  以上では、常温時の曲げモーメントを上回っている。試験部分より外側にできた折れ曲り部分の鋼材温度が  $200^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$  に低下して、靱熱脆性の効果があらわれたものと思われる。

図 5.10 の(b)に示す幅厚比  $b/t=10$ 、軸力比 0.3 においては、折れ曲り角が  $1/30$  位に至るまでに最大曲げモーメントに達して、折れ曲り角の増大に伴う曲げモーメントの低下が見られる。常温と  $500^{\circ}\text{C}$  と  $600^{\circ}\text{C}$  では、曲げモーメントの低下

がほぼ同じである。600℃においては、最大曲げモーメントが小さく、折れ曲り角 2/30 位から曲げモーメントが負に転じている。軸力比 0.3 においては、600℃の実験においても折れ曲り角が 4/30 に達するまで存在軸力を保持した。図 3.10(b)に示したように、幅厚比  $b/t=10$  の 600℃における短柱圧縮実験より得た最大圧縮耐力は、基準強度に対して 0.37 倍であった。よって、600℃における軸力比 0.3 は、最大圧縮耐力の約 8 割に相当する値である。図 5.10 の(b)において、この最大圧縮耐力の 8 割にも相当する軸力を折れ曲り角 4/30 位まで維持できたのは、加力側垂直アクチュエーターによる引張込みが影響したと考えられる。加熱梁の伸びだしを受ける外柱に局部座屈が発生しても、加熱梁を含む周辺架構に外柱の倒れ込みを防止する効果が働けば、外柱の荷重支持能力が向上する可能性が考えられる。

図 5.10 の(c)に示す幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.4 においては、図 5.10 の(a)に示す幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.3 に比べて、500℃までは大きな差が見られない。軸力比 0.4 においては、550℃までは折れ曲り角 4/30 まで所定の存在軸力を維持できているが、3章に示す短柱圧縮実験の結果より 600℃では曲げ圧縮実験の遂行が無理であると判断した。

図 5.10 の(d)に示す幅厚比  $b/t=10$ 、軸力比 0.4 においては、図 5.10 の(b)に示す幅厚比  $b/t=10$ 、軸力比 0.3 に比べて、最大曲げモーメントが小さな値を示していることがわかる。550℃において折れ曲り角 1/15 位で加力を終了したのは、表 5.3(a)に記したように、軸方向変形の増大により試験体の端部が電気炉にぶつかりそうになったためである。鋼材温度 550℃の結果では、所定の軸力を与える過程において負の曲げモーメントが生じた。この傾向は、幅厚比・軸力比が大きく温度が高い実験において顕著であった。不均一に鋼材が温度上昇することや加力治具の自重などの影響により、偏心载荷を受けたものと考えられる。

図 5.10 の(e)に示す幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.5 においては、図 5.10 の(a)に示す幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.3 に比べ、高温実験では最大曲げモーメントが低下している。550℃において折れ曲り角 2/30～3/30 で加力を終了しているのは、軸方向変形の増大により試験体の端部が電気炉にぶつかったためである。

図 5.10 の(f)に示す幅厚比  $b/t=10$ 、軸力比 0.5 においては、幅厚比  $b/t=10$  の軸力比 0.3 や軸力比 0.4 に比べて、最大曲げモーメントは低下し、その後における曲げモーメントの低下の度合いもやや大きい。550℃においては、折れ曲り角 1/30 位で所定の軸力を維持できなくなり、加力を終了した。

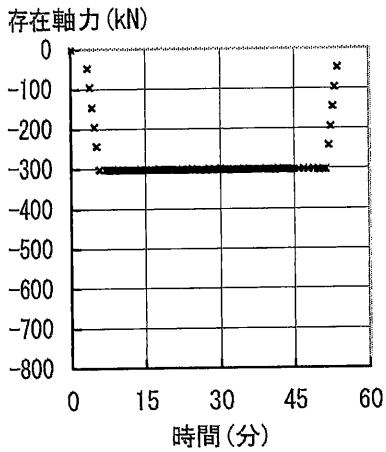
#### (4) H形断面部材の荷重支持能力

48棟の高層鉄骨架構において600℃までの熱応力変形解析を行なった結果より、柱の水平変位は階高の1/30を超えないことが確認されている<sup>1)</sup>。また、ヨーロッパ鋼構造協会連合(ECCS)による規準では、柱に許容される水平変位として階高の1/30が推奨されている<sup>14)</sup>。柱の層間変位が1/30に達する頃には、柱頭・柱脚に局部座屈が発生する。ただし、局部座屈が発生した場合でも、柱が存在軸力を保持できれば架構の安定性は保たれる。本研究においては、階高の1/30の水平変位が生じた場合に所定の存在軸力を維持できる柱を、荷重支持能力ありと見なした。

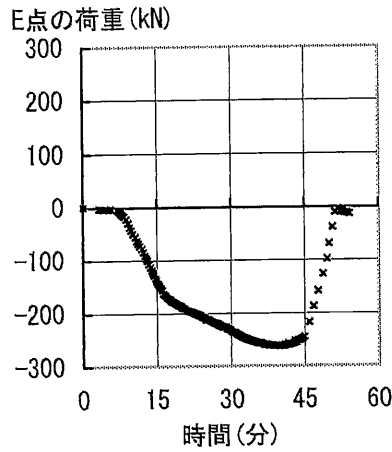
火災加熱を受ける梁の伸びだしによって、外柱は外側へと押し出される。この水平変位が階高の1/30に達したとき、外柱の柱頭における折れ曲り角は大略 $2/30\text{rad}$ となる。この外柱の柱頭における折れ曲り角は、図5.3に示した曲げ圧縮実験の試験部分D点における折れ曲り角に相当する。この折れ曲り角 $2/30$ に達した状態において存在軸力を保持する柱を、荷重支持能力ありと見なした。

H形断面部材の曲げ圧縮実験より得た折れ曲り角と軸方向変位の関係を図5.11-Aの(a)~(f)に示す。縦軸の軸方向変位は、図5.3に示す水平アクチュエーターの内部変位である。図5.11-Aの(a)における幅厚比 $b/t=7.5$ 、軸力比0.3の結果を見ると、鋼材温度500℃においては、折れ曲り角 $4/30$ 位に達するまでの軸方向変位が、徐々に増加しているが急増はしていない。このような状態においては、柱は軸力を保持しているといえる。図5.11-Aの(f)における幅厚比 $b/t=10$ 、軸力比0.5の結果を見ると、鋼材温度550℃においては、折れ曲り角 $1/30$ 位より軸方向変位が急増している。このような状態においては、柱は軸力を保持していないといえる。部材に生じる折れ曲り角と荷重支持能力の関係を整理した結果を、図5.11-Bの(a)と(b)に示す。幅厚比 $b/t=7.5$ については図5.11-Bの(a)に、幅厚比 $b/t=10$ については図5.11-Bの(b)に示す。図中に示す棒グラフが折れ曲り角 $2/30$ を超えているものは、荷重支持能力ありと見なせるものである。これより、軸力比および鋼材温度を要因とするH形断面鋼柱の荷重支持能力が、以下のように確認された。

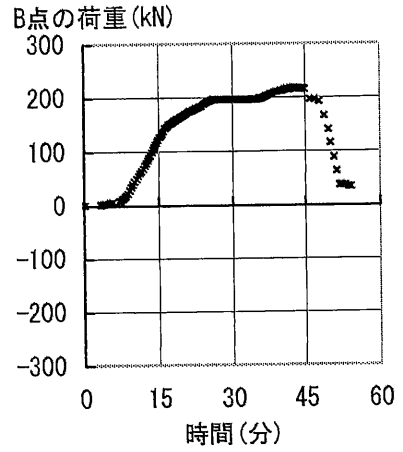
- 軸力比0.3以下の柱については、鋼材温度600℃まで荷重支持能力を有する。
- 軸力比0.3~0.4の柱については、鋼材温度550℃まで荷重支持能力を有する。
- 軸力比0.4~0.5の柱については、鋼材温度500℃まで荷重支持能力を有する。



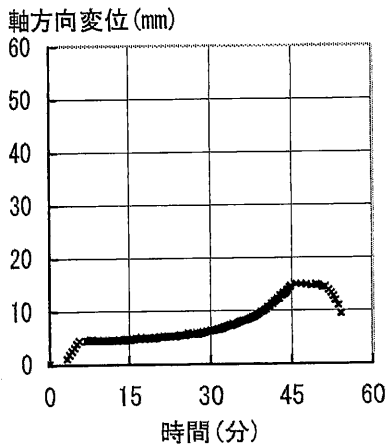
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



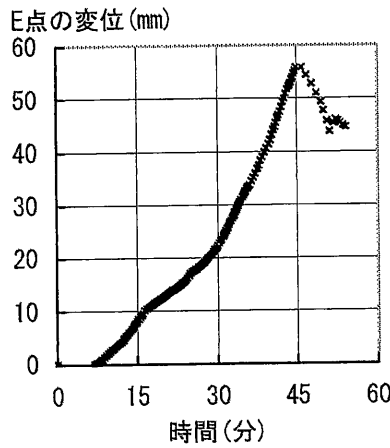
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_1$ )



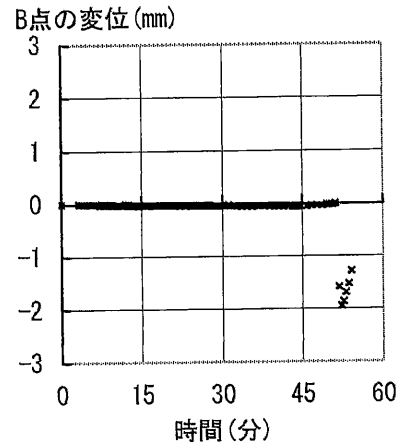
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_2$ )



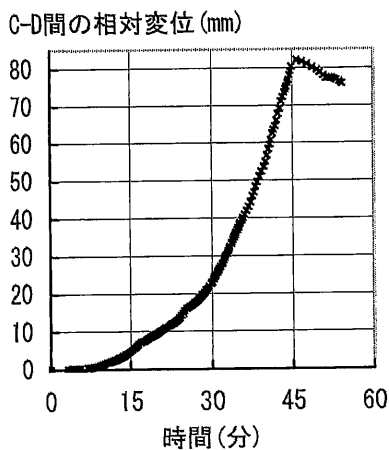
(ニ) 水平アクチュエーター変位



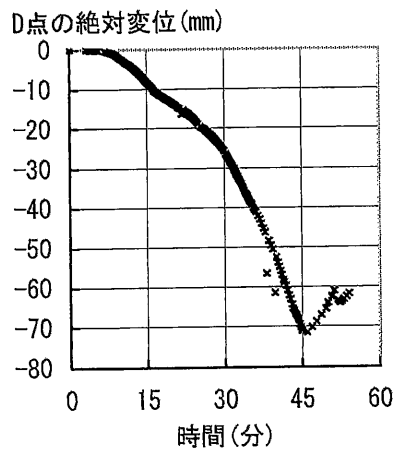
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



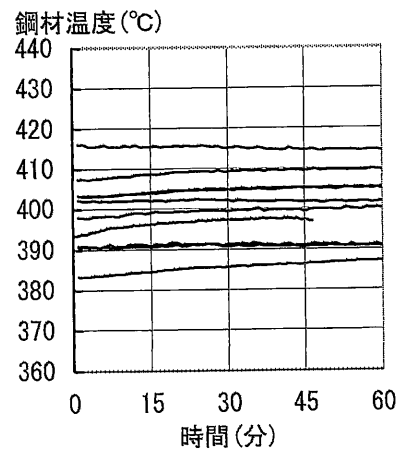
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 ( $\delta_{CD}$ )



(チ) 変位計2の値 ( $\delta_D$ )

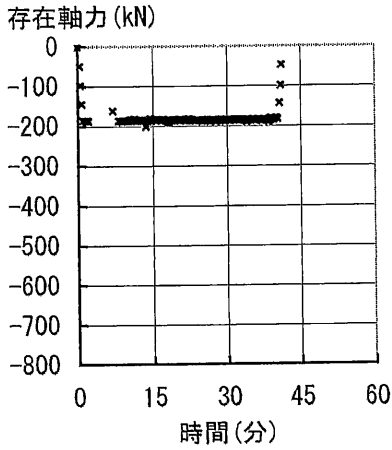


(リ) 鋼材温度

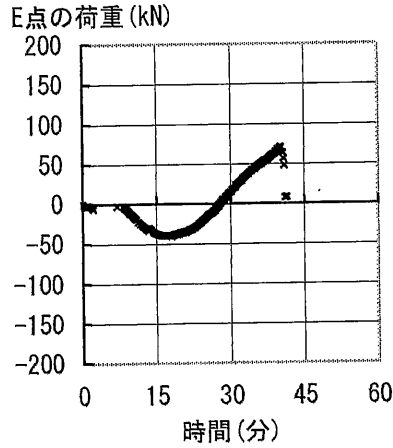
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。  
 注2) アクチュエーターの変位および変位計の値は、伸びを正とし、縮みを負として表示している。

図 5.9(a) H形断面部材における曲げ圧縮実験の結果  
 (幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.3, 鋼材温度  $400^\circ\text{C}$ )

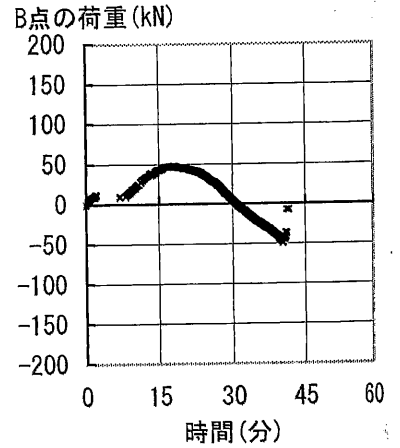




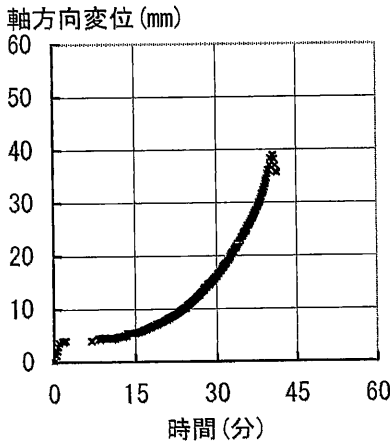
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



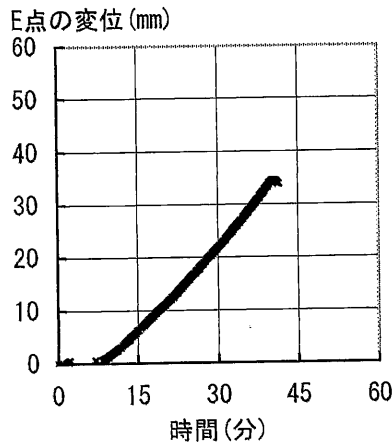
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_1$ )



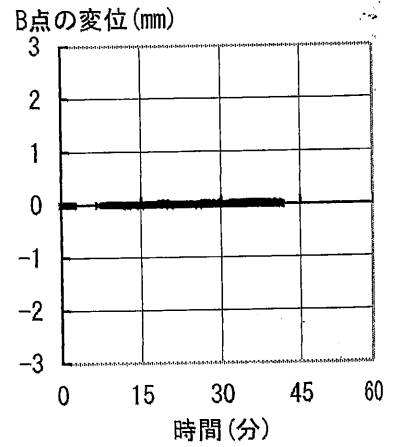
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_2$ )



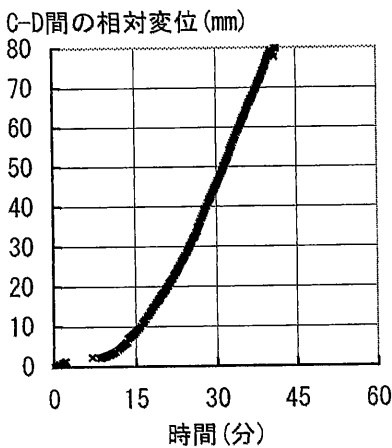
(ニ) 水平アクチュエーター変位



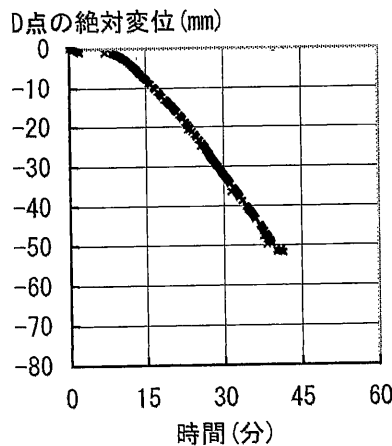
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



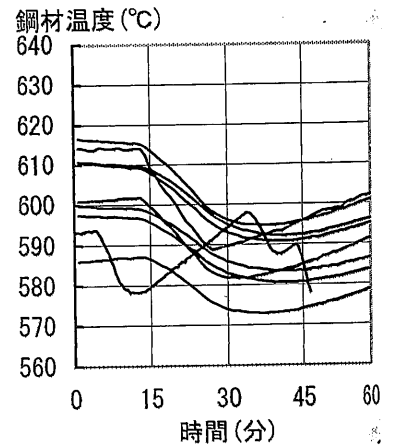
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 ( $\delta_{CD}$ )



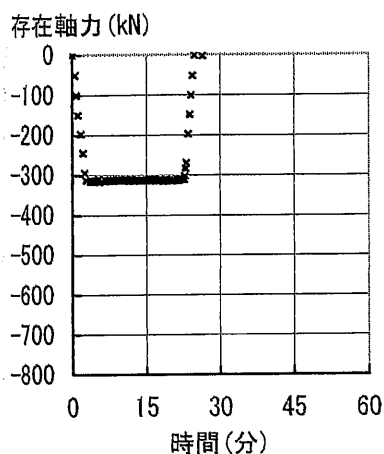
(フ) 変位計2の値 ( $\delta_D$ )



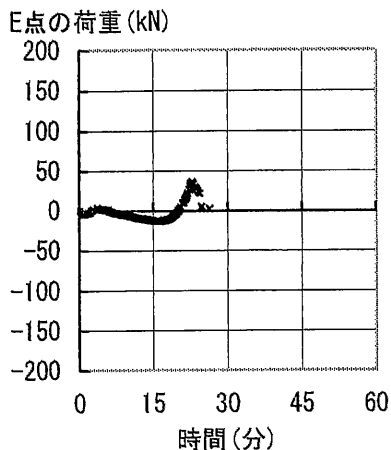
(リ) 鋼材温度

注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。  
 注2) アクチュエーターの変位および変位計の値は、伸びを正とし、縮みを負として表示している。

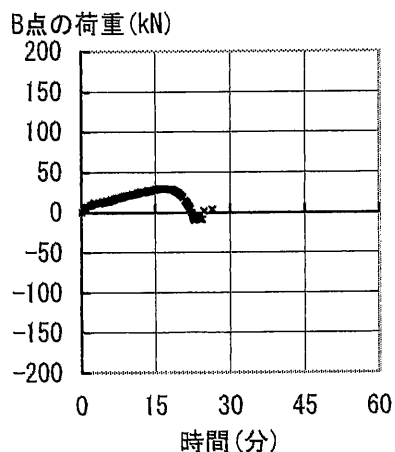
図 5.9(b) H形断面部材における曲げ圧縮実験の結果  
 (幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.3, 鋼材温度  $600^\circ\text{C}$ )



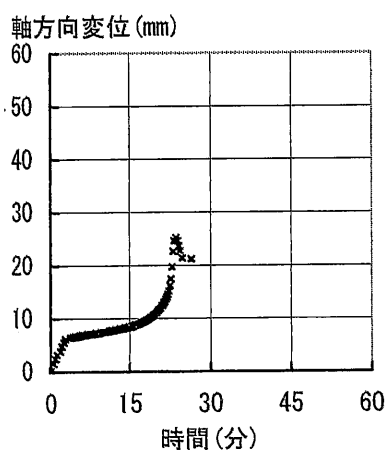
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



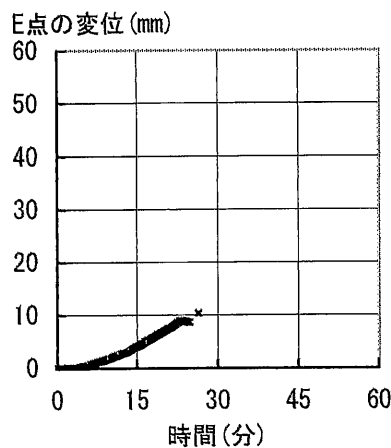
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_1$ )



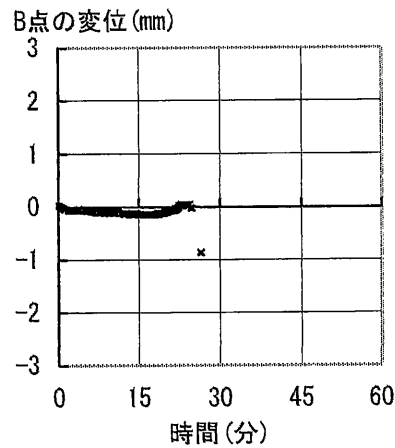
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_2$ )



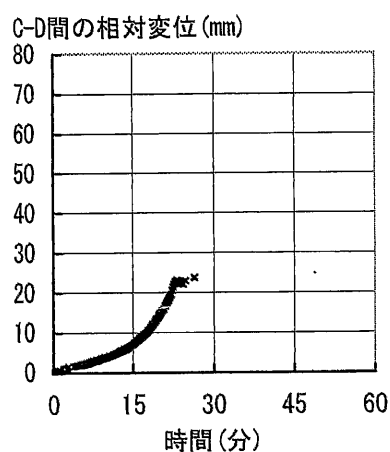
(ニ) 水平アクチュエーター変位



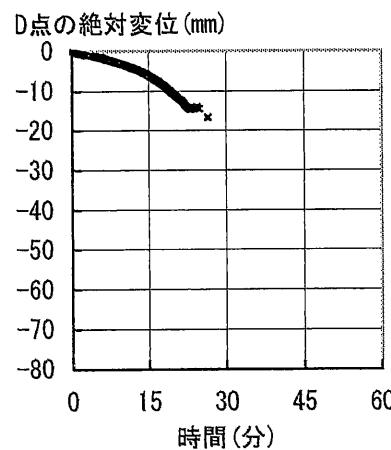
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



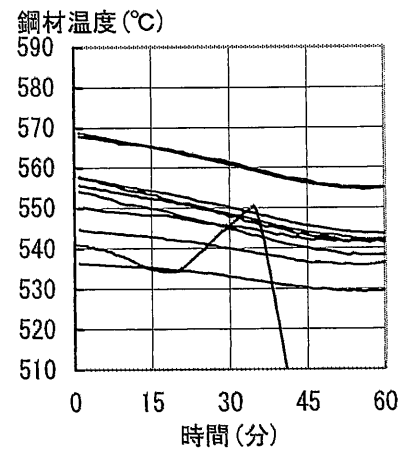
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 ( $\delta_{c0}$ )



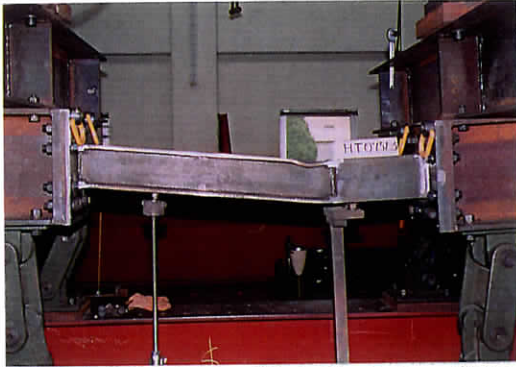
(チ) 変位計2の値 ( $\delta_D$ )



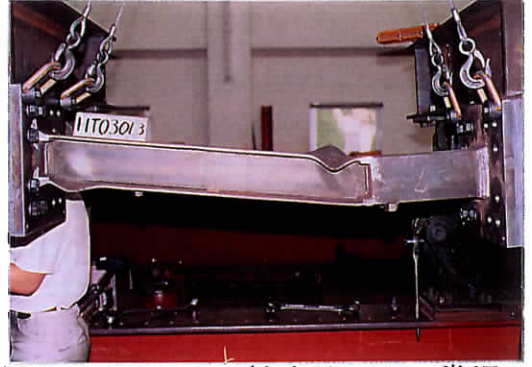
(リ) 鋼材温度

注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。  
 注2) アクチュエーターの変位および変位計の値は、伸びを正とし、縮みを負として表示している。

図 5.9(c) H形断面部材における曲げ圧縮実験の結果  
 (幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.5, 鋼材温度  $550^\circ\text{C}$ )



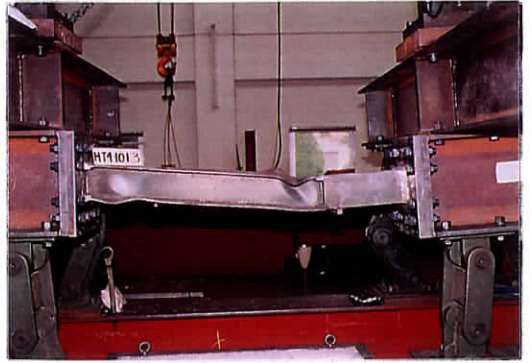
幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.3, 常温



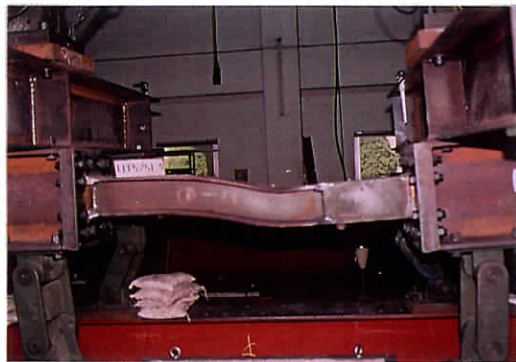
幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.3, 常温



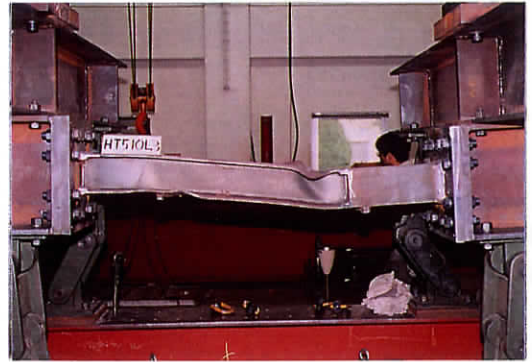
幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.3, 400°C



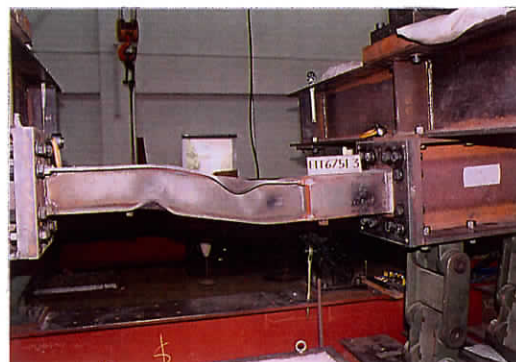
幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.3, 400°C



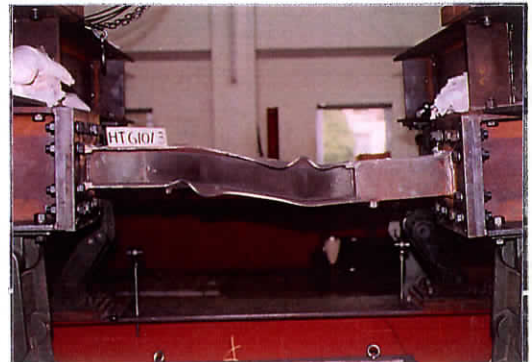
幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.3, 500°C



幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.3, 500°C



幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.3, 600°C



幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.3, 600°C

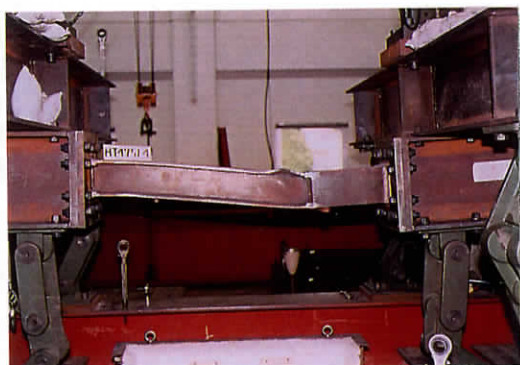
写真 5.6(a) H形断面部材の実験終了後の写真 (軸力比 0.3)



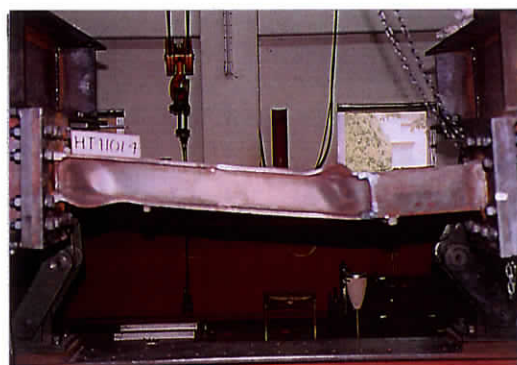
幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.4, 常温



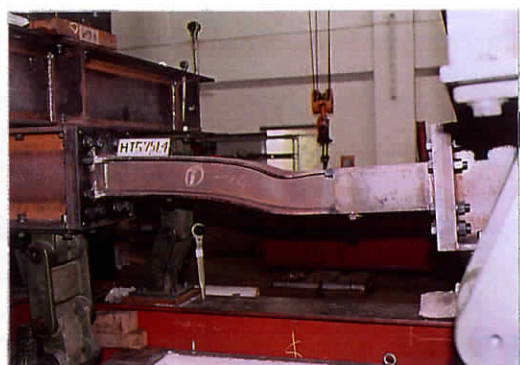
幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.4, 常温



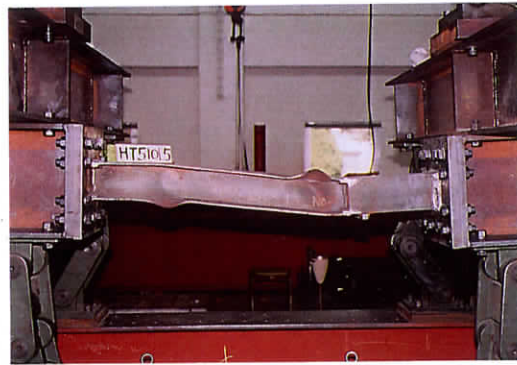
幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.4, 400°C



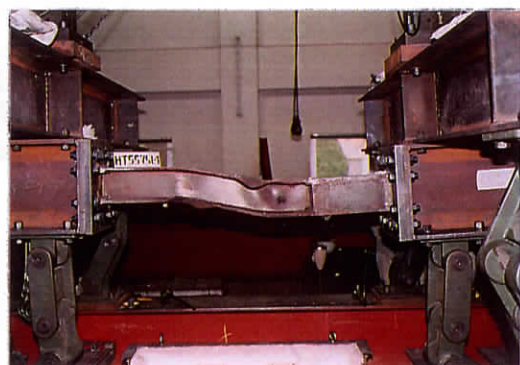
幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.4, 400°C



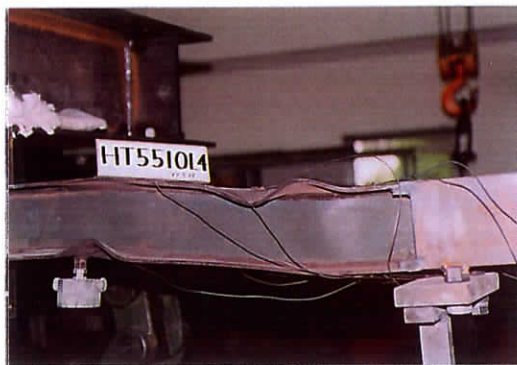
幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.4, 500°C



幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.4, 500°C

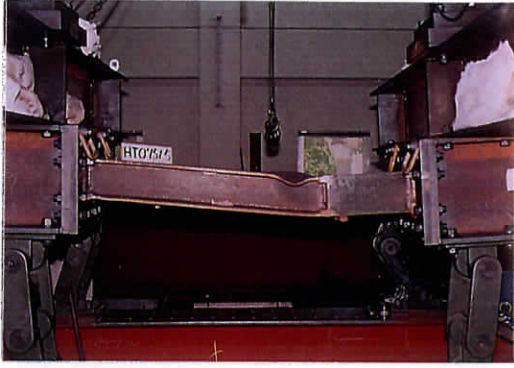


幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.4, 550°C

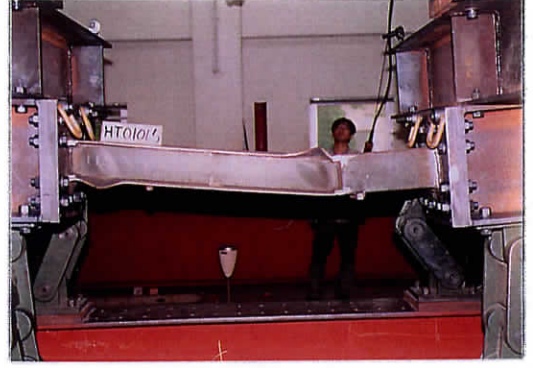


幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.4, 550°C

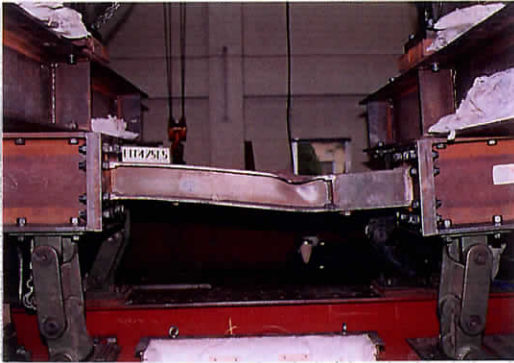
写真 5.6(b) H形断面部材の実験終了後の写真 (軸力比 0.4)



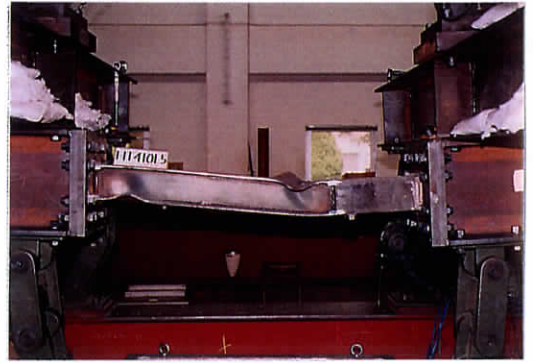
幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.5, 常温



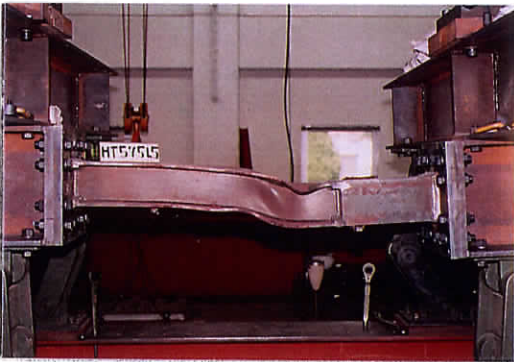
幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.5, 常温



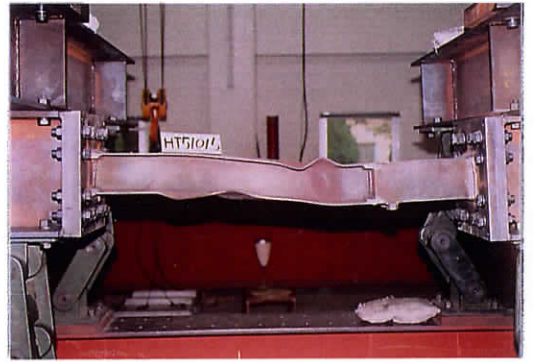
幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.5, 400°C



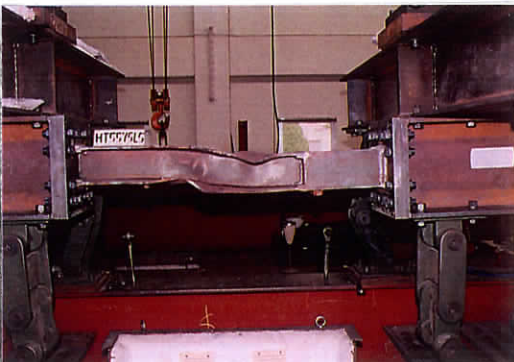
幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.5, 400°C



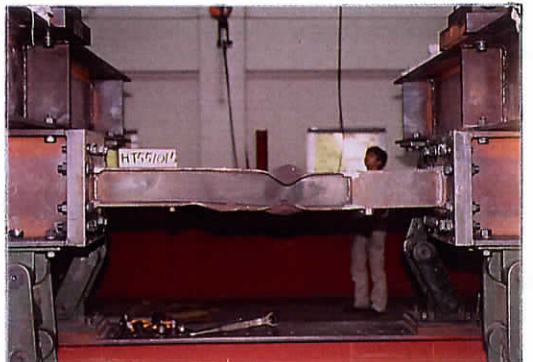
幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.5, 500°C



幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.5, 500°C

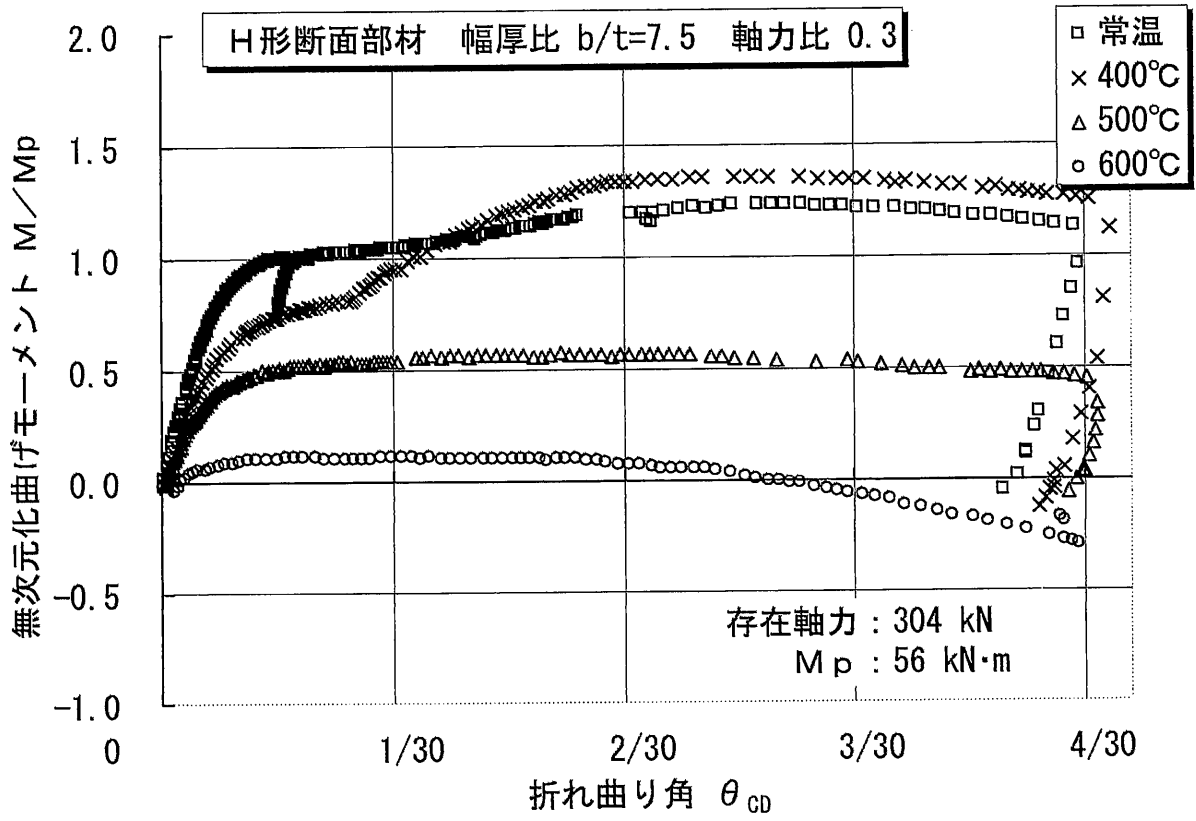


幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.5, 550°C

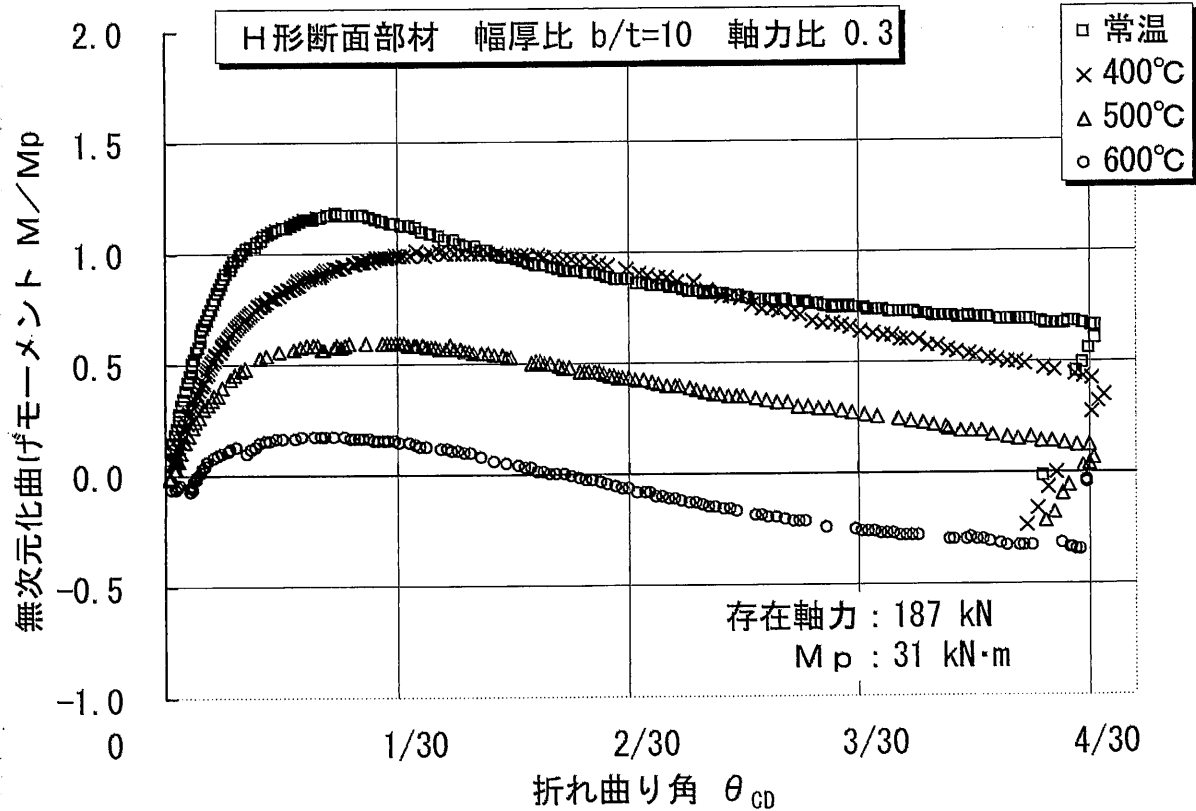


幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.5, 550°C

写真 5.6(c) H形断面部材の実験終了後の写真 (軸力比 0.5)

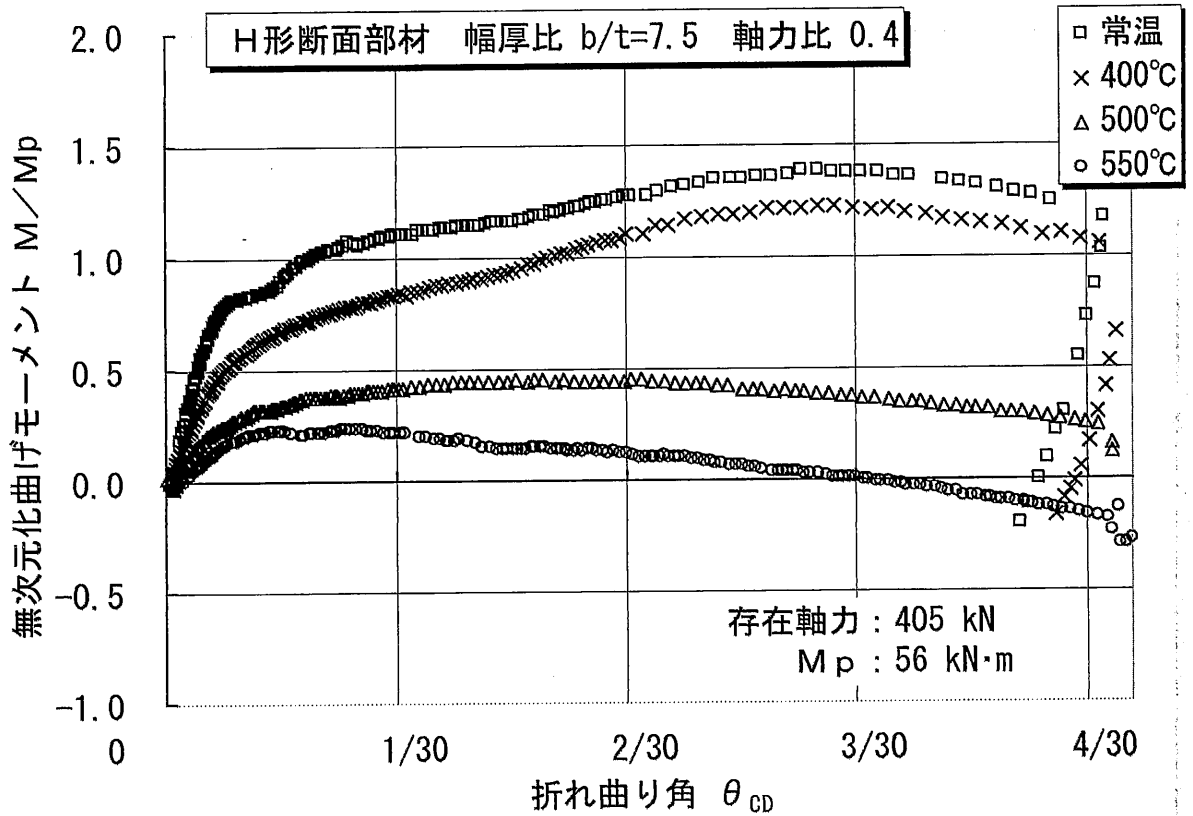


(a) 幅厚比  $b/t=7.5$  (H-135×135×6×9), 軸力比 0.3

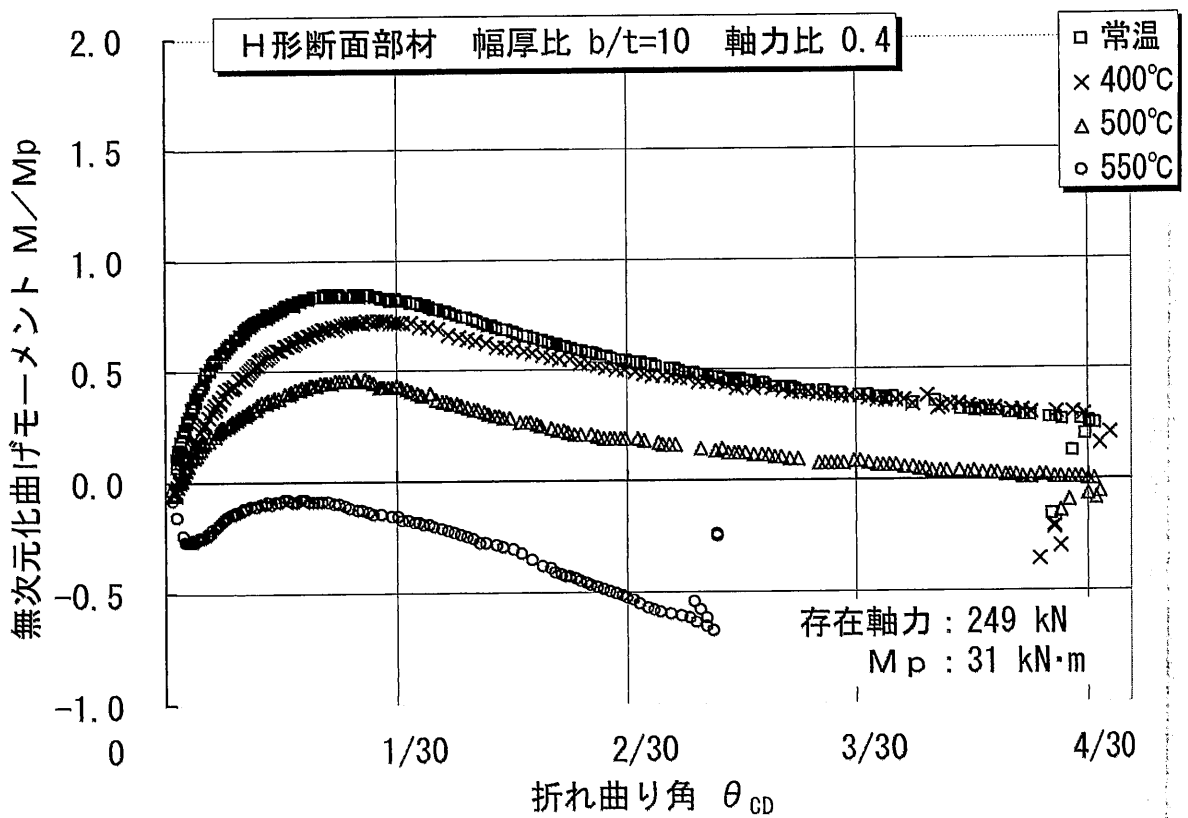


(b) 幅厚比  $b/t=10$  (H-120×120×4.5×6), 軸力比 0.3

図 5.10 H形断面部材の曲げ圧縮変形性状

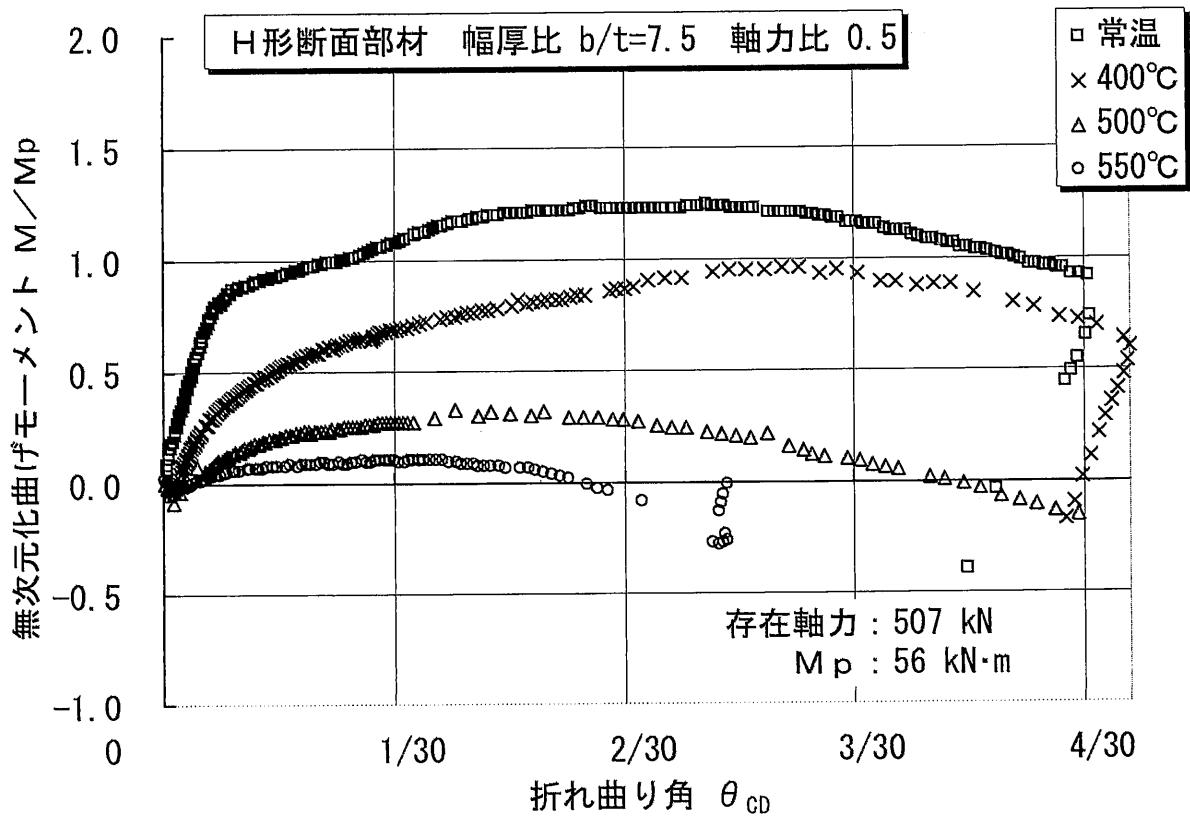


(c) 幅厚比  $b/t=7.5$  (H-135×135×6×9), 軸力比 0.4

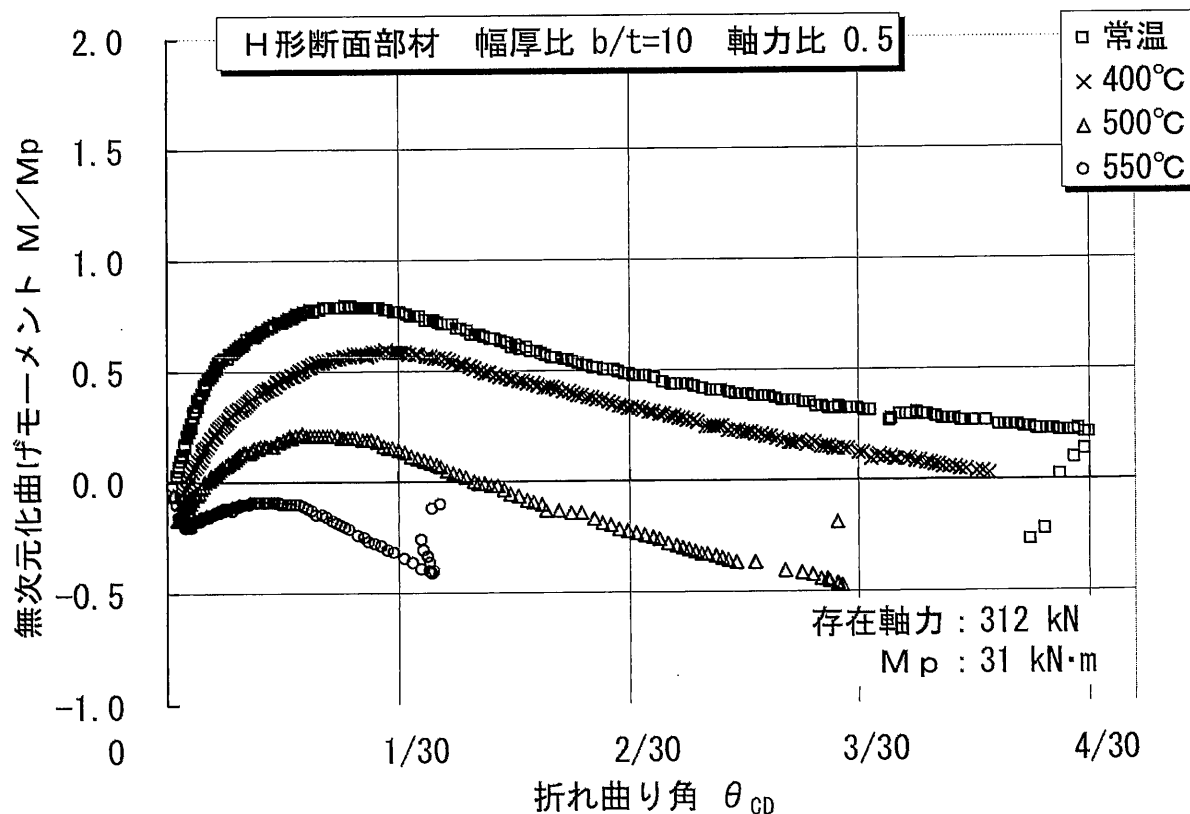


(d) 幅厚比  $b/t=10$  (H-120×120×4.5×6), 軸力比 0.4

図 5.10 H形断面部材の曲げ圧縮変形性状



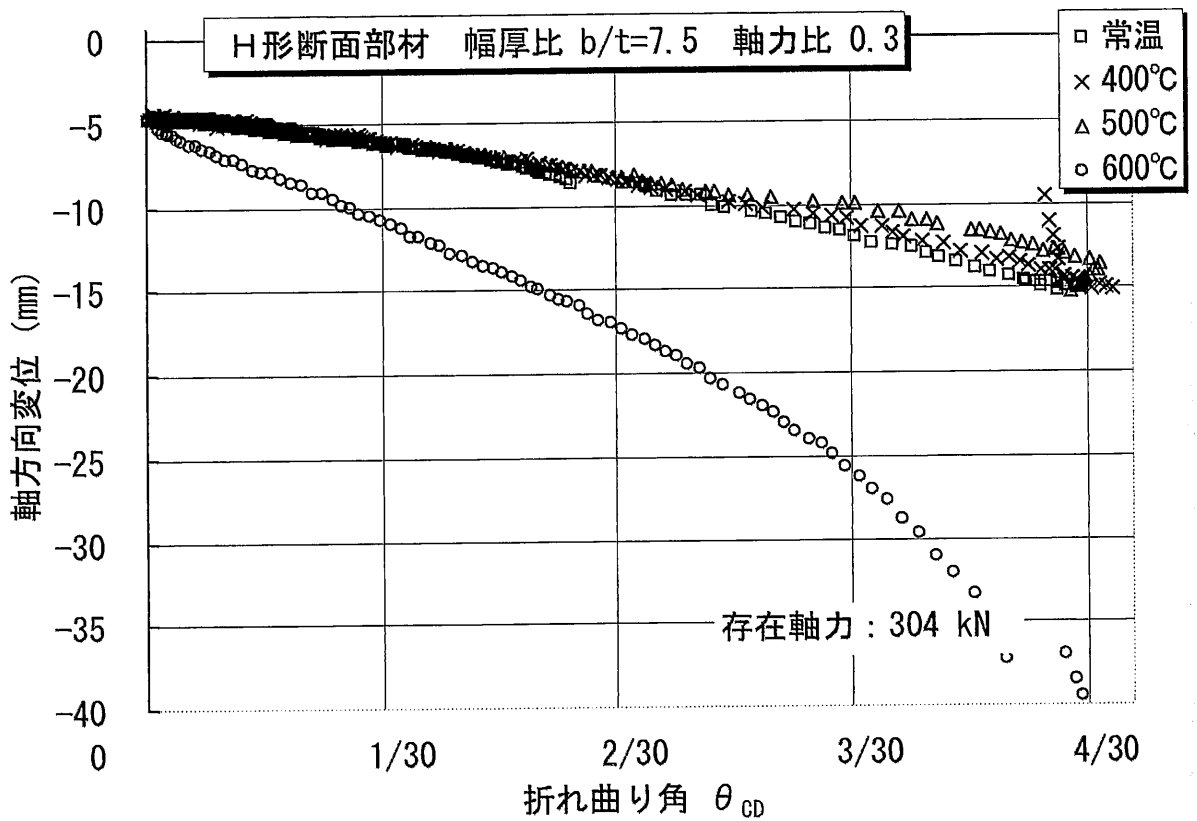
(e) 幅厚比  $b/t=7.5$  (H-135×135×6×9), 軸力比 0.5



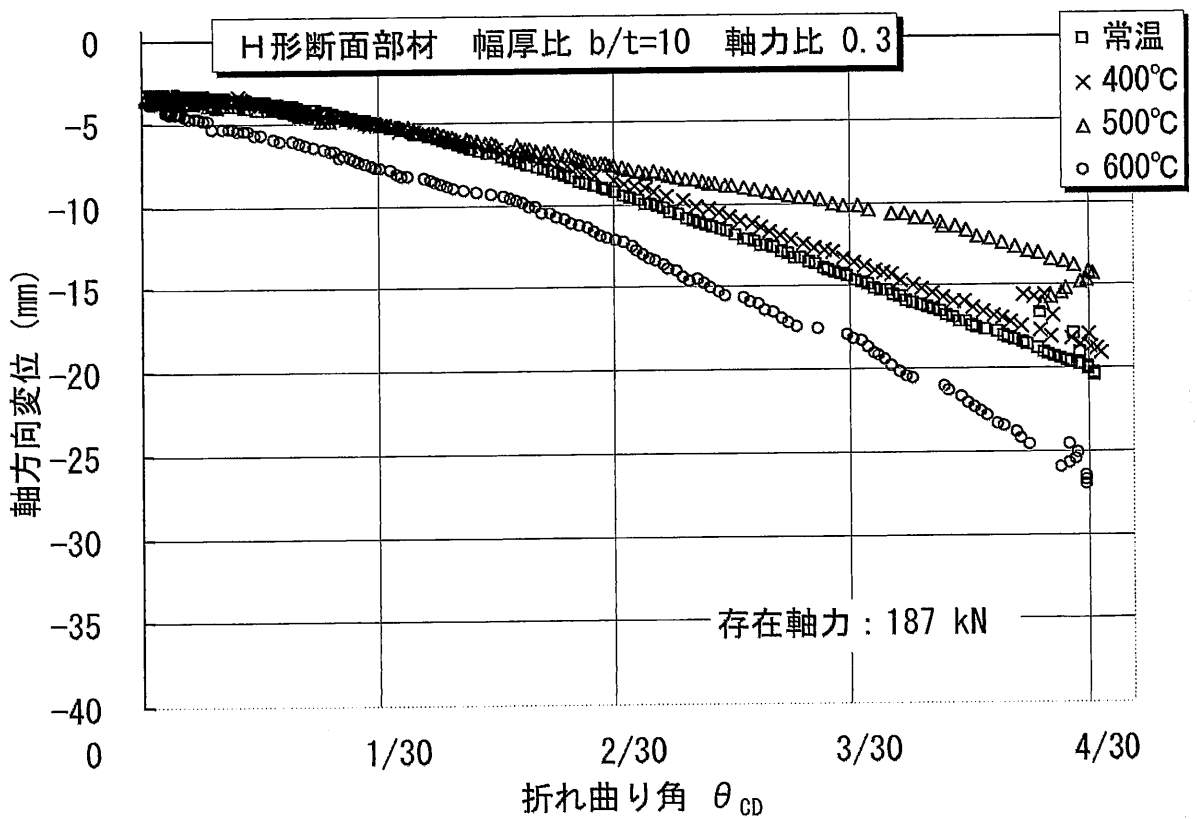
(f) 幅厚比  $b/t=10$  (H-120×120×4.5×6), 軸力比 0.5

図 5.10 H形断面部材の曲げ圧縮変形性状



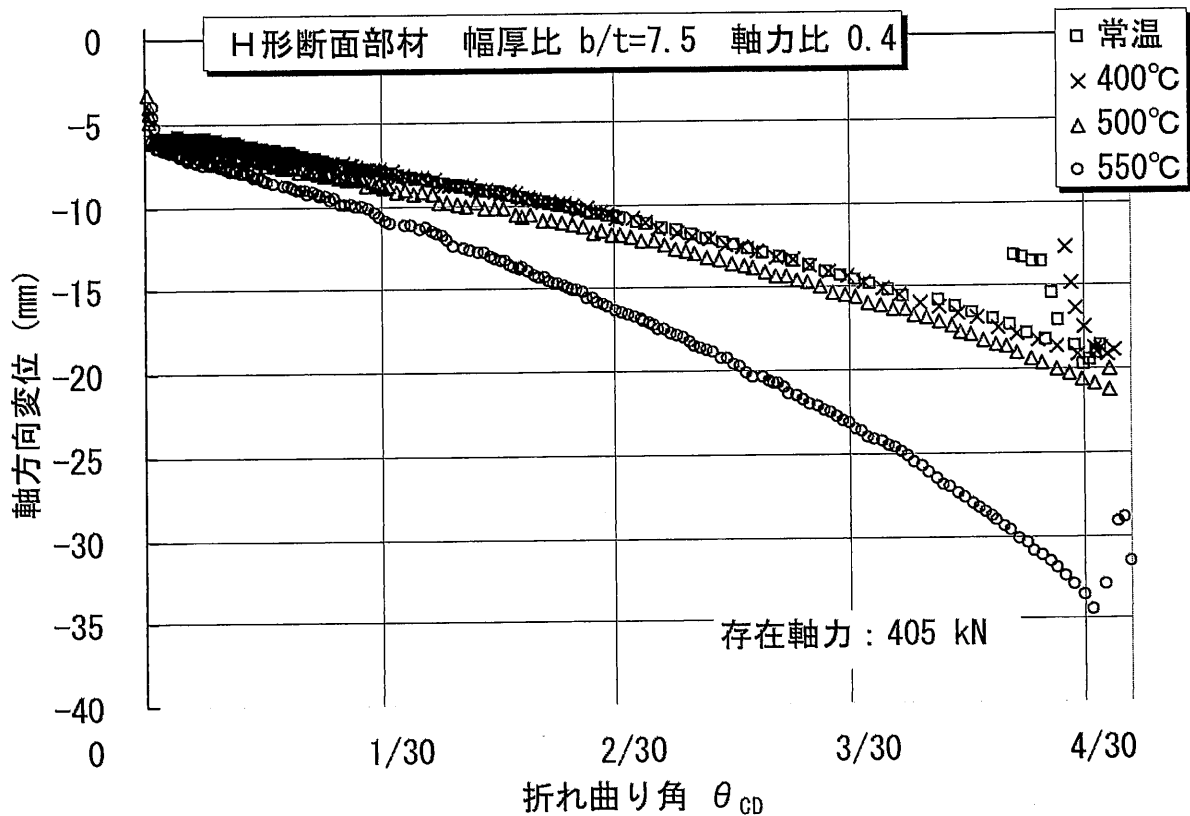


(a) 幅厚比  $b/t=7.5$  (H-135×135×6×9), 軸力比 0.3

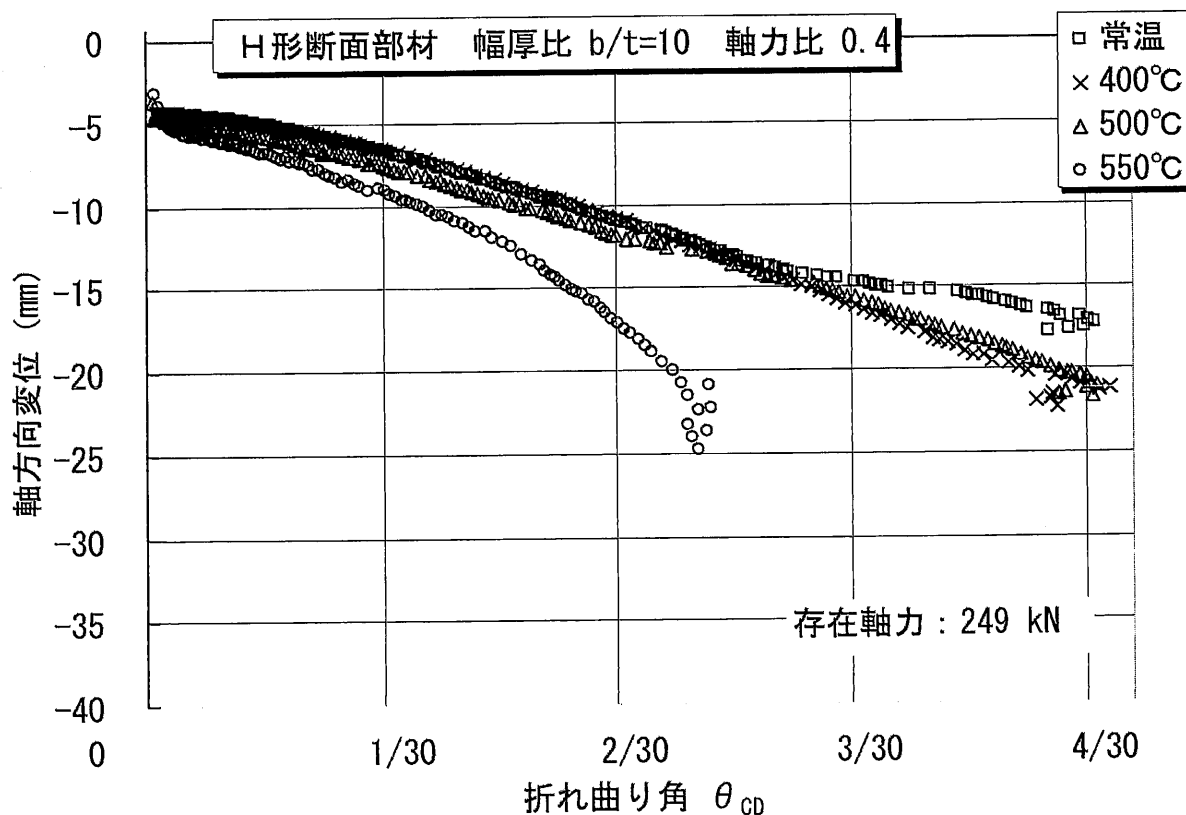


(b) 幅厚比  $b/t=10$  (H-120×120×4.5×6), 軸力比 0.3

図 5.11-A H形断面部材の荷重支持能力

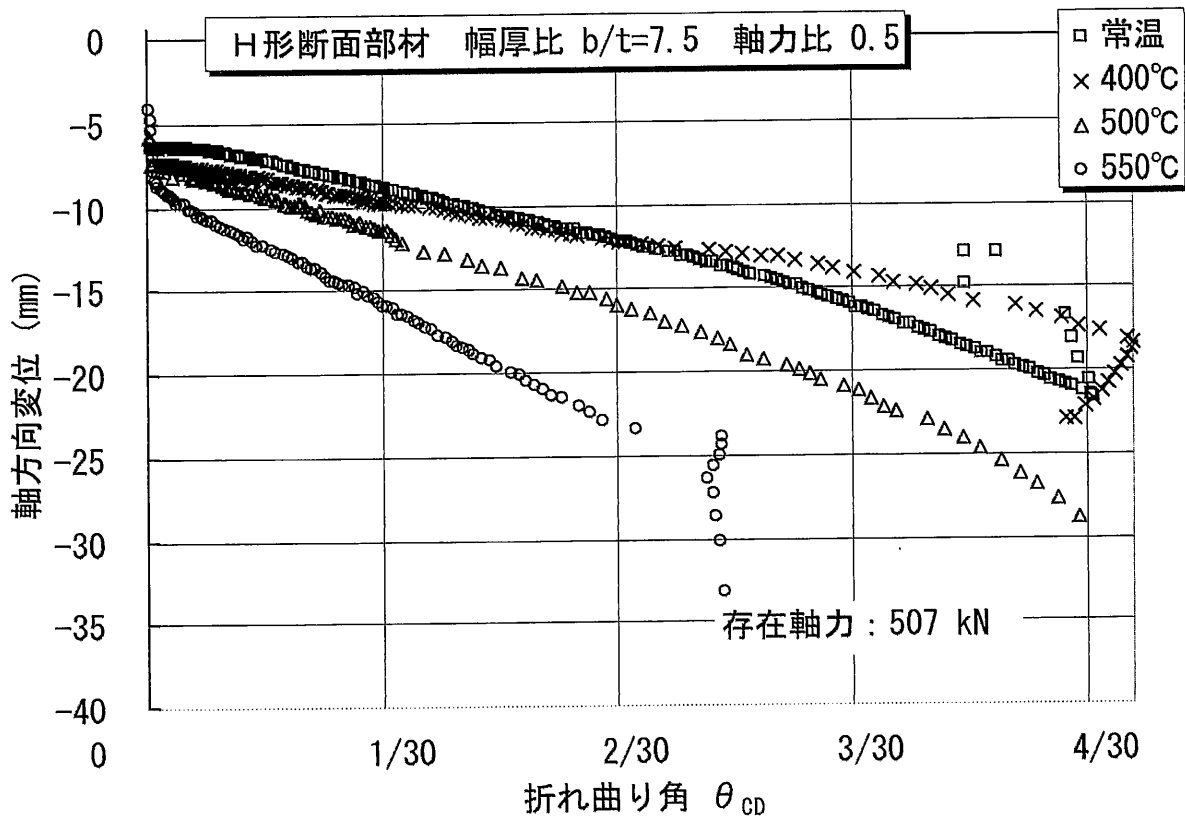


(c) 幅厚比  $b/t=7.5$  (H-135×135×6×9), 軸力比 0.4

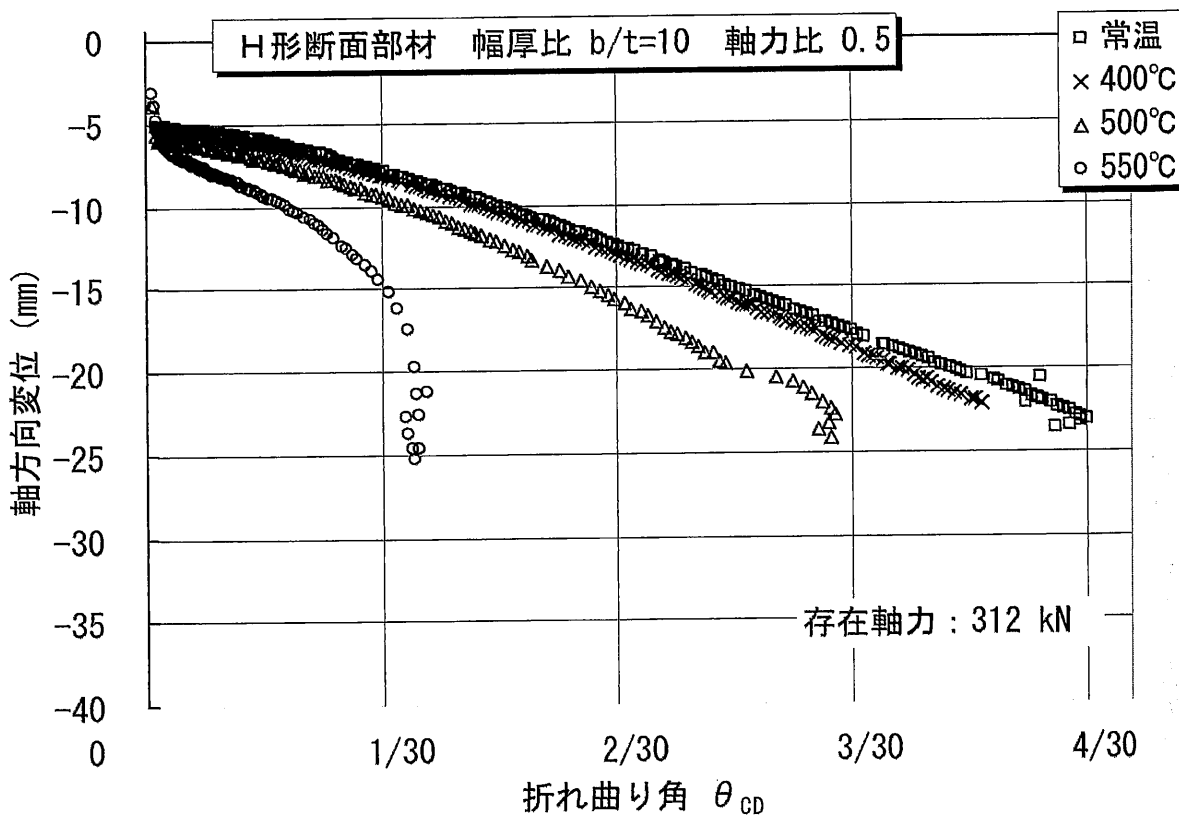


(d) 幅厚比  $b/t=10$  (H-120×120×4.5×6), 軸力比 0.4

図 5.11-A H形断面部材の荷重支持能力

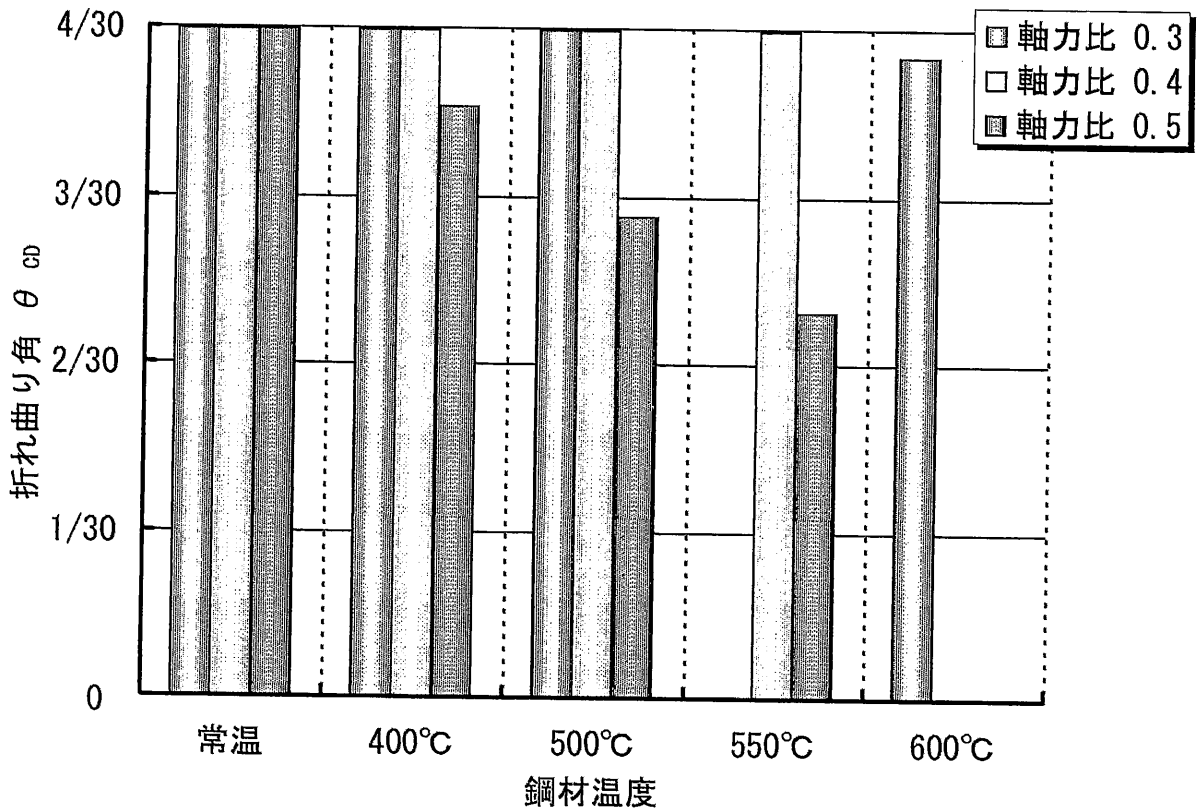


(e) 幅厚比  $b/t=7.5$  (H-135×135×6×9), 軸力比 0.5

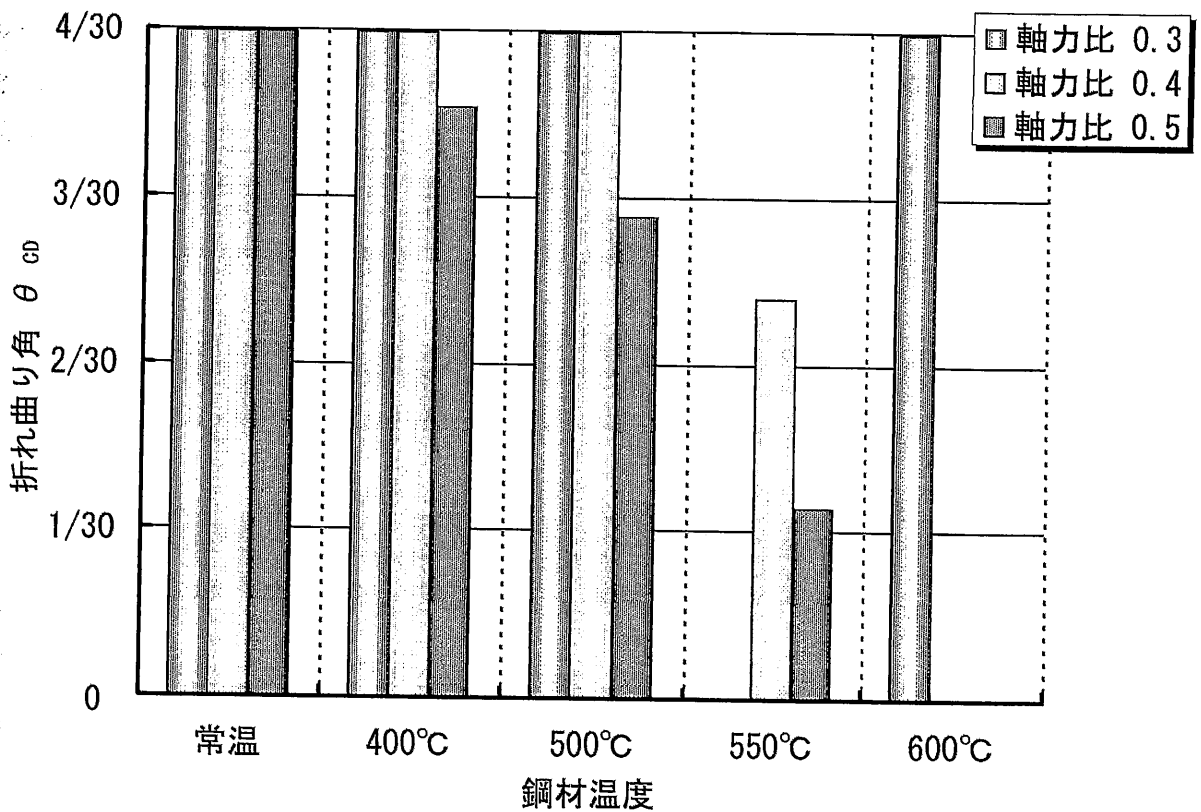


(f) 幅厚比  $b/t=10$  (H-120×120×4.5×6), 軸力比 0.5

図 5.11-A H形断面部材の荷重支持能力



(a) 幅厚比  $b/t=7.5$  (H-135×135×6×9)



(b) 幅厚比  $b/t=10$  (H-120×120×4.5×6)

図 5.11-B H形断面部材の荷重支持能力

## 5.2.5 箱形断面部材の実験結果

### (1) 実験結果の概要

箱形断面部材に関する曲げ圧縮実験は、表 5.1 に示すように、幅厚比・軸力比・鋼材温度・裏当て金の有無を要因として、30 体行なった。本節では、これらの結果の一部を図 5.12(a)～図 5.12(c)に示す。全試験体の結果については、資料編に示している。曲げ圧縮実験においては、図中の(イ)～(リ)に示す 9 種類の生データを得た。これらのデータの説明は、「5.2.4 H形断面部材の実験結果」の(1)において記したので、ここでは割愛する。

十分に軸力を保持できた例として、幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3, 鋼材温度  $400^{\circ}\text{C}$ , 裏当て金ありの結果を図 5.12(a)に示す。図中の(イ)に示すように、45 分位までの曲げ変形を徐々に増加している間は、所定の存在軸力を維持している。軸方向変位は、図中の(ニ)に示すように、所定の存在軸力を与える過程において生じ、その後 15 分位まではほぼ一定値を保ち、15 分以降において徐々に増加し、45 分位における水平アクチュエーターの除荷により若干減少するが、軸方向変位は残留している。図中の(ロ)と(ハ)に示すように、加力側垂直アクチュエーターの圧縮荷重の増加・減少に対応し、ピン支持側垂直アクチュエーターの引張荷重が増加・減少している。ピン支持側垂直アクチュエーターは、変位をゼロに制御することを試みたものであるが、図中の(ヘ)に示すように、荷重の増加に伴い若干の変位が生じている。図中の(ト)に示すように、図 5.5 と図 5.6 に示す C-D 間の相対変位が 80mm に至るまで、本実験においては所定の軸力を維持することができた。C-D 間の相対変位が 80mm の時、図中の(チ)に示すように、D 点の絶対変位は 90mm 位に達している。除荷後においても、両者の残留変位は大きな値を示している。

次に、幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.5, 鋼材温度  $550^{\circ}\text{C}$  の実験において、裏当て金ありの試験体による結果を図 5.12(b)に示し、裏当て金なしの試験体による結果を図 5.12(c)に示し、裏当て金の有無による比較を行なう。短柱圧縮実験において裏当て金が大きく影響したことを考慮して、裏当て金ありの曲げ圧縮実験においては、裏当て金部分の断面積を含めて所定の存在軸力を定めた。図 5.12(b)の(イ)に示す裏当て金ありの所定の存在軸力が、図 5.12(c)の(イ)に示す裏当て金なしの存在軸力より大きいのは、裏当て金の面積分を割り増して軸力を与えたためである。図 5.12(b)および図 5.12(c)の(ニ)において、両者とも軸方向変位の

急増が見られる。実験の途中において、両者ともに変位制御により所定の存在軸力を維持することが不可能となった。所定の軸力を維持できなくなった時における C-D 間の相対変位は、図 5.12(b)の(ト)に示すように裏当て金ありでは約 50mm、図 5.12(c)の(ト)に示すように裏当て金なしでは約 30mm であった。裏当て金ありの試験体の方が大きな値を示している。

なお、図 5.12(b)および図 5.12(c)の(リ)に示す鋼材温度について両者とも  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  位のバラツキが見られるのは、部材の材軸方向におけるバラツキである。目標温度  $550^{\circ}\text{C}$  の実験において、試験部分の中央部では  $570^{\circ}\text{C}$  位、試験部分の左端部(図 5.7 に示す C 点側)では  $540^{\circ}\text{C}\sim 550^{\circ}\text{C}$ 、試験部分の右端部(図 5.7 に示す D 点側)では  $530^{\circ}\text{C}\sim 540^{\circ}\text{C}$  の温度が計測された。

## (2) 実験終了後における試験体の変形状況

箱形断面部材における曲げ圧縮実験終了後の変形状況として、軸力比 0.3 の試験体を写真 5.7(a)に、軸力比 0.4 の試験体を写真 5.7(b)に、軸力比 0.5 の試験体を写真 5.7(c)に示す。図中の左段に幅厚比  $d/t=25$  の試験体を示し、右段に幅厚比  $d/t=30$  の試験体を示す。写真 5.7(a)～写真 5.7(c)に示す試験体は、全て裏当て金ありの試験体である。

写真 5.7(a)に示す軸力比 0.3 における変形状況を見ると、全ての試験体に共通して、試験体右側の鋼の塊部分に近い試験部分に局部座屈が生じ、試験部分が折れ曲っている。常温および  $400^{\circ}\text{C}$  においては、もう一方の折れ曲り部分が、試験部分の左側端部よりも外側のエンドプレート近傍において生じている。 $400^{\circ}\text{C}$  位までは、鋼材の強度が常温とあまり変わらないので、図 5.4 に示すように、曲げモーメントの大きい試験部分の外側において折れ曲りが生じたものと考えられる。 $500^{\circ}\text{C}$  および  $600^{\circ}\text{C}$  においては、この折れ曲りが試験部分に生じている。幅厚比  $d/t=25$  と幅厚比  $d/t=30$  では、両者とも同じような変形を示している。

写真 5.7(b)および写真 5.7(c)に示す軸力比 0.4 および軸力比 0.5 の試験体においても、軸力比 0.3 における試験体の変形状況と概ね同じである。H 形断面部材と同様に、軸力比の違いによる変形状況の違いは顕著ではなかった。

裏当て金の有無による比較として、幅厚比  $d/t=25$  の試験体を写真 5.8(a)に、幅厚比  $d/t=30$  の試験体を写真 5.8(b)に示す。図中の左段に裏当て金ありの試験体を示し、右段に裏当て金なしの試験体を示す。図中の左段と右段において、

軸力比と鋼材温度は同条件としている。写真 5.8(a)の上段に示す軸力比 0.3, 鋼材温度 600°Cの試験体においては、裏当て金の有無による違いがあまり見られない。写真 5.8(a)の中段に示す軸力比 0.5, 鋼材温度 500°Cの試験体においては、裏当て金なしの方が、局部座屈の発生が激しいようである。写真 5.8(a)の下段右側に示す軸力 0.5, 鋼材温度 550°C, 裏当て金なしの試験体においては、試験部分の中央部において激しい局部座屈が見られ、短柱圧縮実験において見られたような圧縮変形を示している。写真 5.8(b)に示す幅厚比  $d/t=30$  の試験体においても、前述した幅厚比  $d/t=25$  の試験体と同じように、裏当て金なし方が局部座屈の発生が激しいようである。

### (3) 箱形断面部材の曲げ圧縮変形状

曲げ圧縮実験の目的は、大きな水平変位を受ける外柱の柱頭における曲げ圧縮変形状を明らかにすることである。本実験においては図 5.3 に示す D 点が外柱の柱頭に相当する。図 5.13 の(a)~(f)および図 5.14 の(a)~(d)は、D 点に生じる曲げモーメントと折れ曲り角の関係を示したものである。縦軸の無次元化曲げモーメントと横軸の折れ曲り角については、H形断面部材の結果において述べたので、説明を割愛する。なお、図中に示す存在軸力の値は、裏当て金ありの実験においては、裏当て金を含む断面積より算定した値である。

図 5.13 の(a)に示す幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3, 裏当て金ありの結果を見ると、折れ曲り角の増加に伴い曲げモーメントが増加している。常温と 400°Cにおいては、一度は緩やかになった曲げモーメントの勾配が再び増加し、両者ともに折れ曲り角  $2/30$  位において最大曲げモーメントに達し、その後は折れ曲り角の増加に伴い曲げモーメントは若干減少している。500°Cと 600°Cにおいては、両者ともに折れ曲り角  $1/30$  位において最大曲げモーメントに達し、その後は折れ曲り角の増加に伴い曲げモーメントは緩やかに減少している。600°Cにおいて折れ曲り角  $3/30$  位で加力を終了したのは、表 5.3(b)に記したように、軸変形の増大により試験体の端部が電気炉にぶつかりそうになったためである。図 3.15(a)に示したように、幅厚比  $d/t=25$  の 600°Cにおける短柱圧縮実験より得た最大圧縮耐力は、基準強度に対して 0.32 倍であった。よって、600°Cにおける軸力比 0.3 は、最大圧縮耐力に相当する値である。図 5.10 の(b)において、この最大圧縮耐力にも相当する軸力を折れ曲り角  $3/30$  位まで維持できたのは、加力側垂直アクチュエーターによる引張込みが影響したと考えられる。加熱梁の伸びだし

を受ける外柱に局部座屈が発生しても、加熱梁を含む周辺架構に外柱の倒れ込みを防止する効果が働けば、外柱の荷重支持能力が向上することも考えられる。

図 5.13 の(b)に示す幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.3, 裏当て金ありの結果を見ると、400℃と 500℃においては、一度は緩やかになった曲げモーメントの勾配が再び増加する様子が見られる。常温と 600℃においては、再び曲げモーメントの勾配が増加するような様子は見られない。このように再び曲げモーメントの勾配が増加する理由はわからないが、図 5.13 の(a)~(f)に示す他の結果を見ると、400℃の実験において顕著に増加する例が多い。

図 5.13 の(c)に示す幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.4, 裏当て金ありの結果を見ると、図 5.13 の(a)に示す軸力比 0.3 に比べて、曲げモーメントの値が、常温では若干小さく、400℃と 500℃ではあまり差が見られない。軸力比 0.4 においては、550℃までは折れ曲り角  $3/30$  まで所定の存在軸力を維持できているが、3章に示す短柱圧縮実験の結果より 600℃では曲げ圧縮実験の遂行が無理であると判断した。

図 5.13 の(d)に示す幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.4, 裏当て金ありの結果を見ると、図 5.13 の(b)に示す軸力比 0.3 に比べて、400℃と 500℃において最大曲げモーメントは小さな値を示しており、その後における曲げモーメントの低下の度合いも若干大きい。

図 5.13 の(e)に示す幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.5, 裏当て金ありの結果を見ると、図 5.13 の(a)に示す軸力比 0.3 に比べて、最大曲げモーメントが顕著に低下していることがわかる。500℃と 550℃において折れ曲り角  $2/30 \sim 3/30$  で加力を終了しているのは、軸方向変形の増大により試験体の端部が電気炉にぶつかりそうになったためである。

図 5.13 の(f)に示す幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.5, 裏当て金ありの結果を見ると、幅厚比  $d/t=30$  の軸力比 0.3 や軸力比 0.4 に比べて、最大曲げモーメントは低下し、その後における曲げモーメントの低下の度合いもやや大きい。しかし、軸力比 0.5 の 550℃においても、折れ曲り角  $2/30$  位に達するまで、所定の軸力は維持されている。

図 5.14 の(a)に示す幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3, 600℃の結果より、裏当て金の有無による比較を行なうと、最大曲げモーメントに達するまでは両者に違いは見られない。その後における曲げモーメントの低下の度合いは、裏当て金なしの方が大きい。また、裏当て金なしの方が、折れ曲り角が小さい時点において、所定の存在軸力を維持できなくなっている。この傾向は、図 5.14 の(b)にお



ける幅厚比  $d/t=30$  についても同様である。

図 5.14 の(c)に示す幅厚比  $d/t=25$ 、軸力比 0.5 の結果より、裏当て金の影響を比較すると、 $500^{\circ}\text{C}$ においては、最大曲げモーメントに達するまで両者ともほぼ同じである。その後における曲げモーメントの低下の度合いは、裏当て金なしの方が大きい。両者とも、折れ曲り角  $3/30$  位までは所定の軸力を維持している。一方、 $550^{\circ}\text{C}$ においては、裏当て金なしの試験体では、折れ曲り角  $1/30$  に至る前に、所定の軸力を維持できなくなっている。両者に大きな違いが見られる。図 5.14 の(d)に示す幅厚比  $d/t=30$  の結果を見ると、 $550^{\circ}\text{C}$ の裏当て金なしでは、折れ曲り角  $2/30$  に至る前に、所定の軸力を維持できなくなっている。

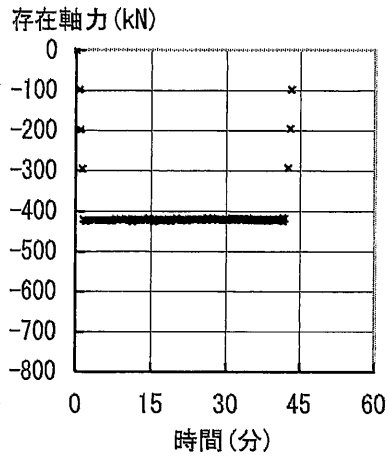
#### (4) 箱形断面部材の荷重支持能力

「5.2.4 H形断面部材の実験結果」(5)において記した理由から、箱形断面部材についても、折れ曲り角  $2/30$  に達した状態において存在軸力を保持する柱を、荷重支持能力ありと見なす。

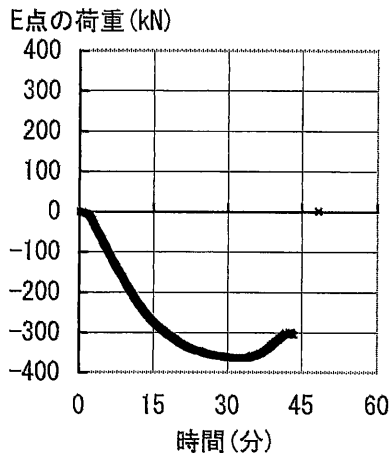
箱形断面部材の曲げ圧縮実験より得た、折れ曲り角と軸方向変位の関係を図 5.15-A の(a)~(f)に示す。縦軸の軸方向変位は、図 5.3 に示す水平アクチュエーターの内部変位である。図中の凡例に示す「有」は裏当て金ありの試験体を示し、「無」は裏当て金なしの試験体を示す。記載のないものは裏当て金ありの試験体である。図 5.15-A の(a)における幅厚比  $d/t=25$ 、軸力比 0.3 の結果を見ると、常温・ $400^{\circ}\text{C}$ ・ $500^{\circ}\text{C}$ においては、折れ曲り角  $4/30$  位に達するまでの軸方向変位が、徐々には増加しているが急増はしていない。このような状態においては、柱は軸力を保持しているといえる。図 5.15-A の(e)における幅厚比  $d/t=25$ 、軸力比 0.5 の結果を見ると、鋼材温度  $550^{\circ}\text{C}$ ・裏当て金なしの結果においては、折れ曲り角  $1/30$  に達する前に、軸方向変位が急増している。このような状態においては、柱は軸力を保持していないといえる。部材に生じる折れ曲り角と荷重支持能力の関係を整理した結果を、図 5.15-B の(a)と(b)に示す。幅厚比  $d/t=25$  については図 5.15-B の(a)に、幅厚比  $d/t=30$  については図 5.15-B の(b)に示す。図中に示す棒グラフが折れ曲り角  $2/30$  を超えているものは、荷重支持能力ありと見なせるものである。これより、軸力比および鋼材温度を要因とする箱形断面鋼柱の荷重支持能力が、以下のように確認された。

○ 軸力比 0.3 以下の柱については、鋼材温度  $600^{\circ}\text{C}$  まで荷重支持能力を有する。

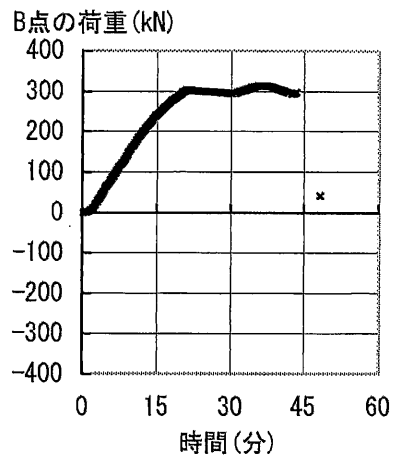
○ 軸力比 0.3~0.5 の柱については、鋼材温度  $500^{\circ}\text{C}$  まで荷重支持能力を有する。



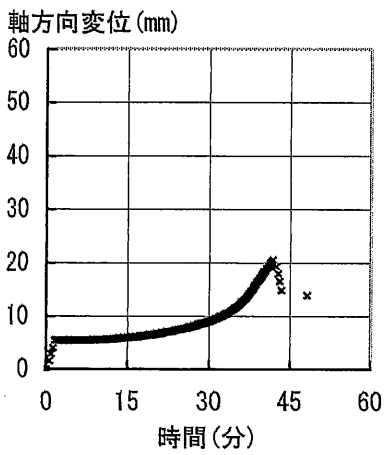
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



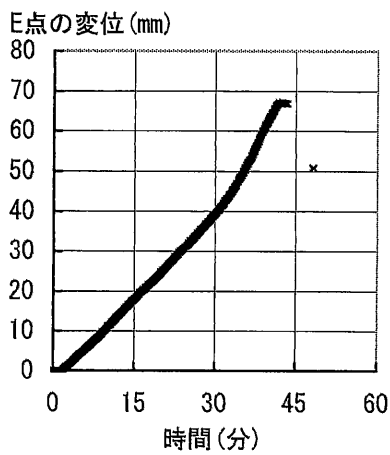
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_1$ )



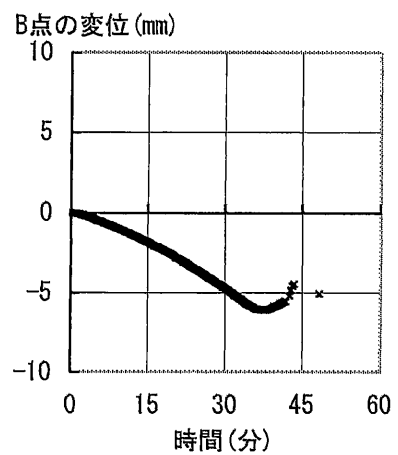
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_2$ )



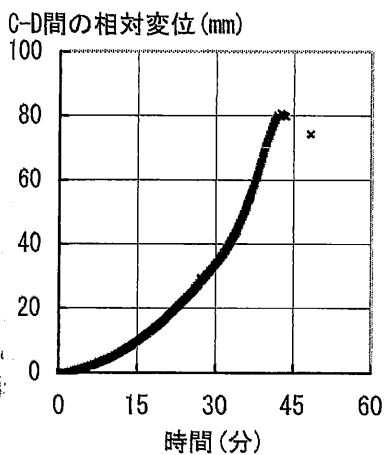
(ニ) 水平アクチュエーター変位



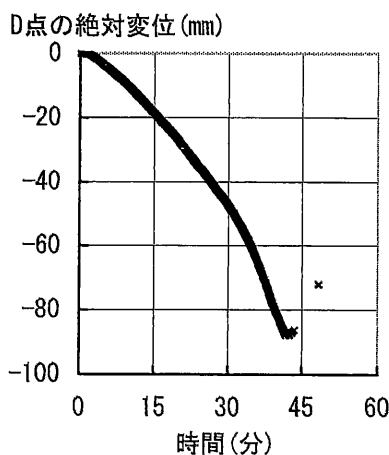
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



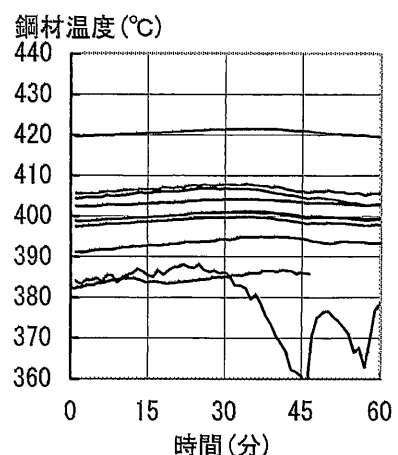
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 ( $\delta_{CD}$ )



(フ) 変位計2の値 ( $\delta_D$ )

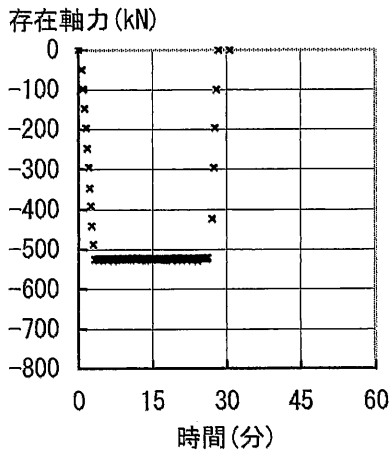


(リ) 鋼材温度

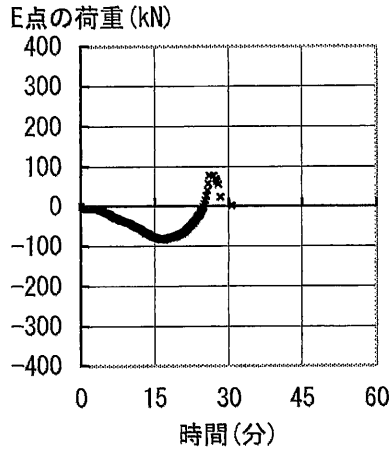
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。  
 注2) アクチュエーターの変位および変位計の値は、伸びを正とし、縮みを負として表示している。

図 5.12(a) 箱形断面部材における曲げ圧縮実験の結果

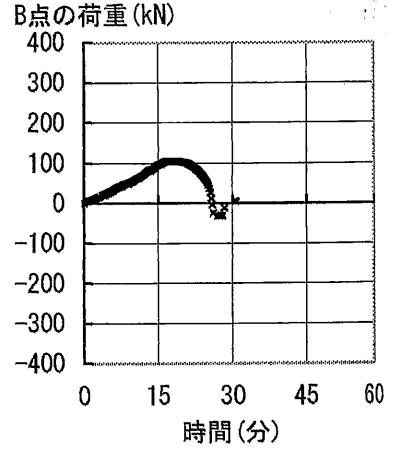
(幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3, 温度  $400^\circ\text{C}$ , 裏当て金あり)



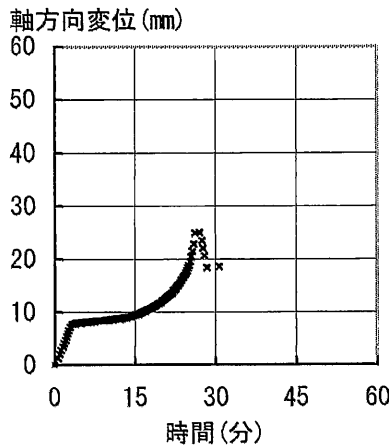
(i) 水平アクチュエーター荷重 (P)



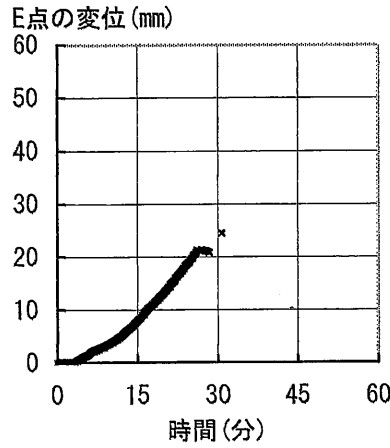
(ii) 加力側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_1$ )



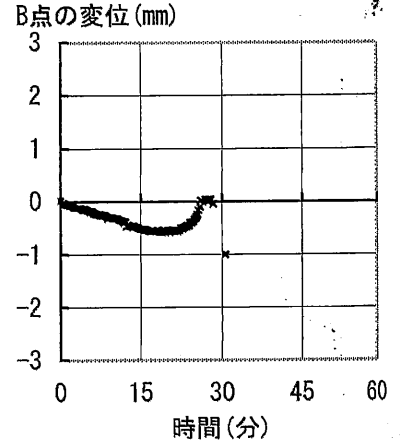
(iii) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_2$ )



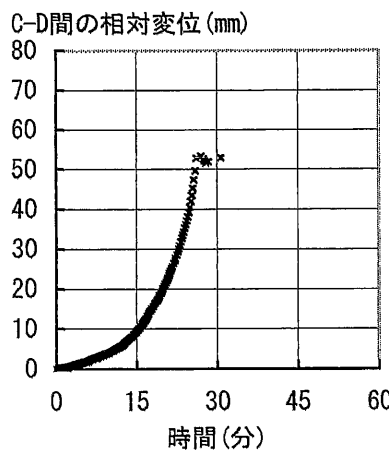
(iv) 水平アクチュエーター変位



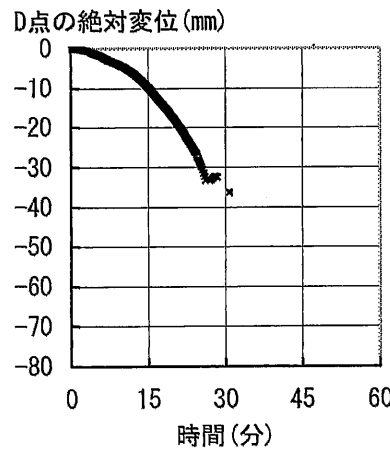
(v) 加力側垂直アクチュエーター変位



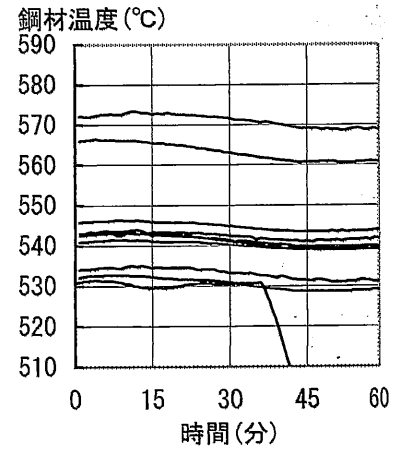
(vi) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(vii) 変位計1の値 ( $\delta_{CD}$ )



(viii) 変位計2の値 ( $\delta_D$ )

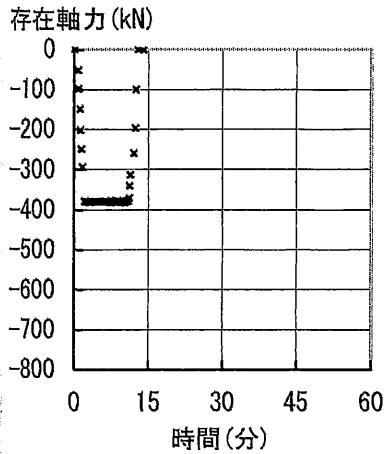


(ix) 鋼材温度

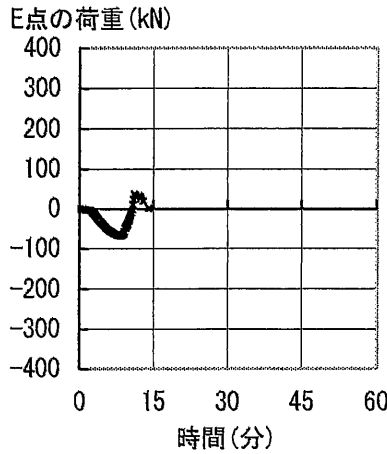
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。  
 注2) アクチュエーターの変位および変位計の値は、伸びを正とし、縮みを負として表示している。

図 5.12(b) 箱形断面部材における曲げ圧縮実験の結果

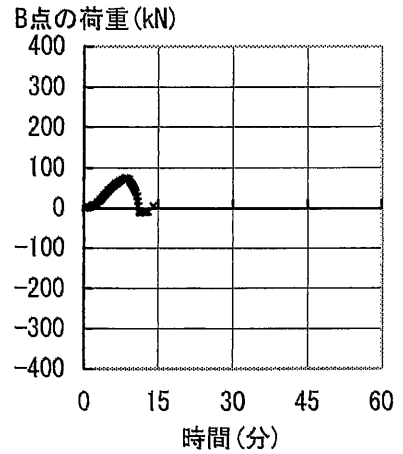
(幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.5, 温度  $550^{\circ}\text{C}$ , 裏当て金あり)



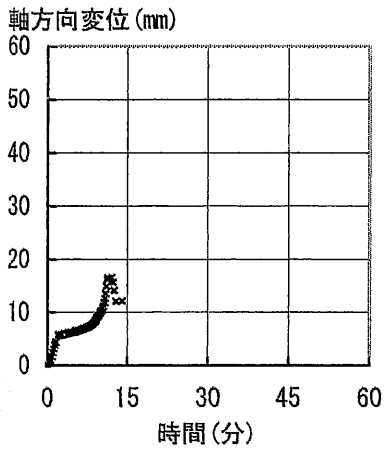
(i) 水平アクチュエーター荷重 (P)



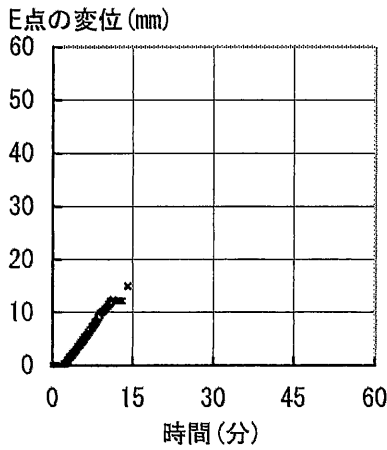
(o) 加力側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_1$ )



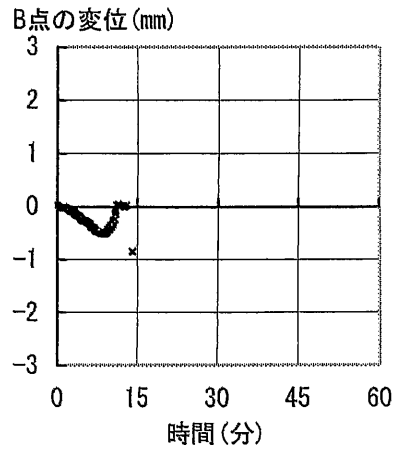
(h) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 ( $L_2$ )



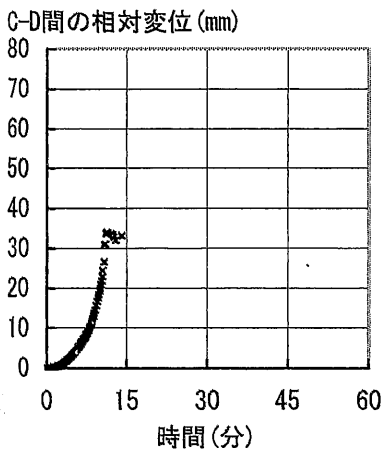
(ni) 水平アクチュエーター変位



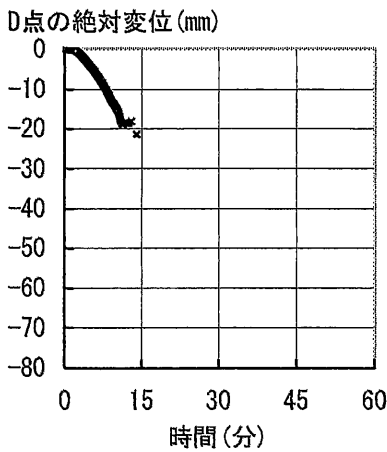
(o) 加力側垂直アクチュエーター変位



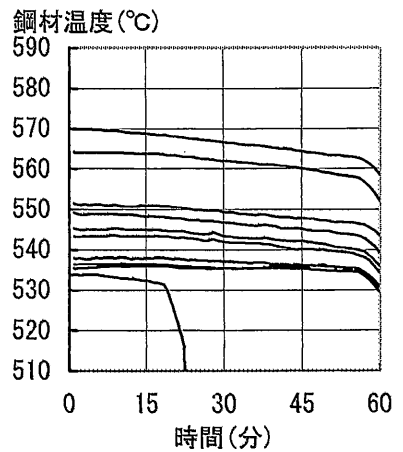
(h) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(t) 変位計1の値 ( $\delta_{CD}$ )



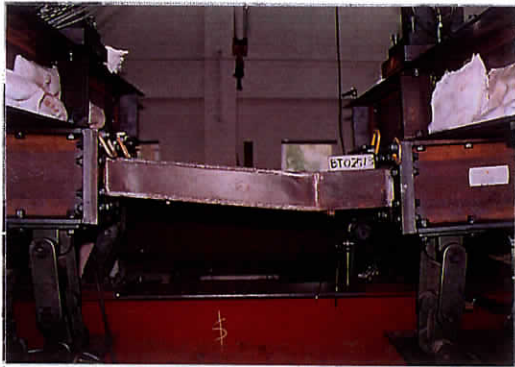
(f) 変位計2の値 ( $\delta_D$ )



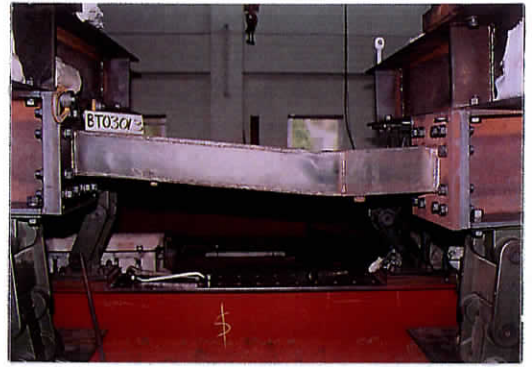
(r) 鋼材温度

注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。  
 注2) アクチュエーターの変位および変位計の値は、伸びを正とし、縮みを負として表示している。

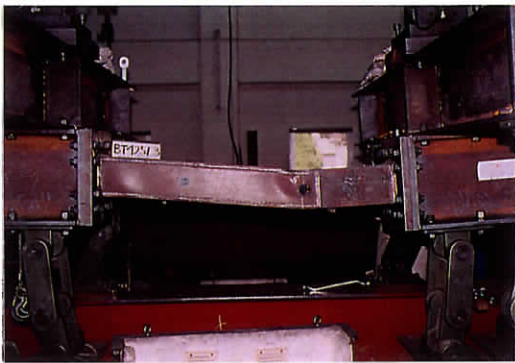
図 5.12(c) 箱形断面部材における曲げ圧縮実験の結果  
 (幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.5, 温度  $550^\circ\text{C}$ , 裏当て金なし)



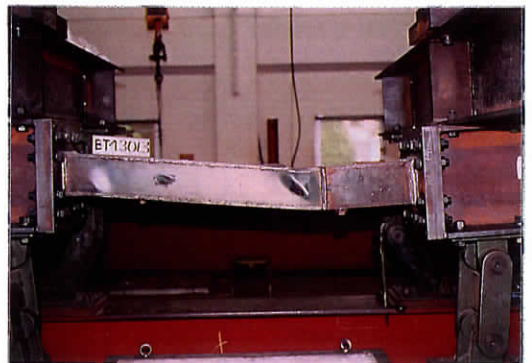
幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3, 常温



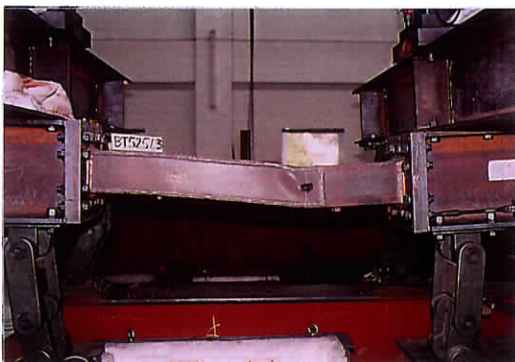
幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.3, 常温



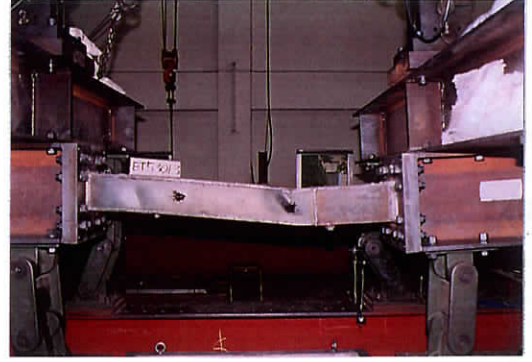
幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3, 400°C



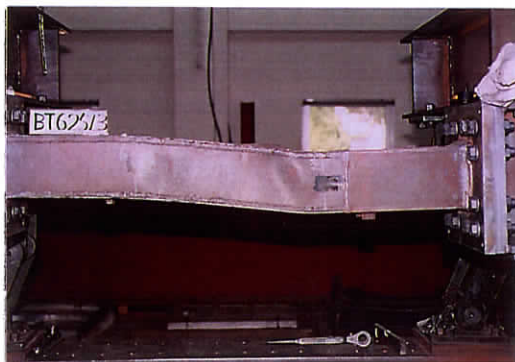
幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.3, 400°C



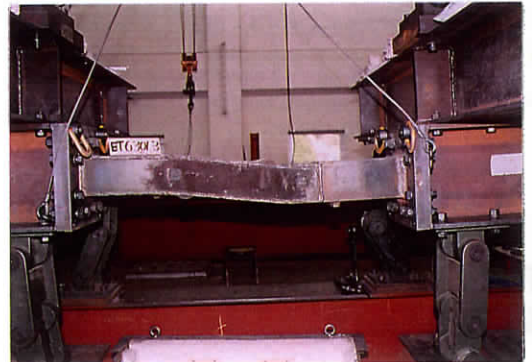
幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3, 500°C



幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.3, 500°C

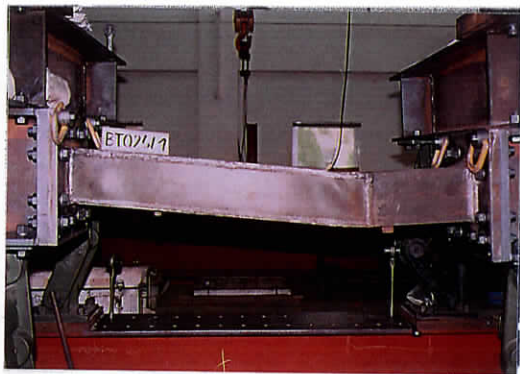


幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3, 600°C

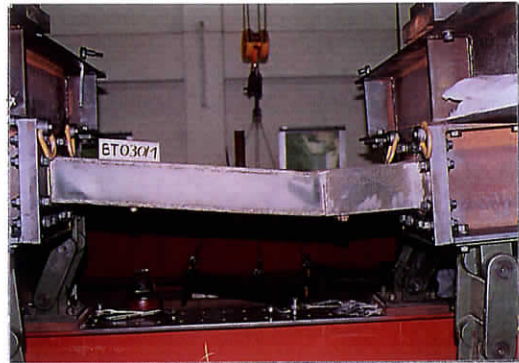


幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.3, 600°C

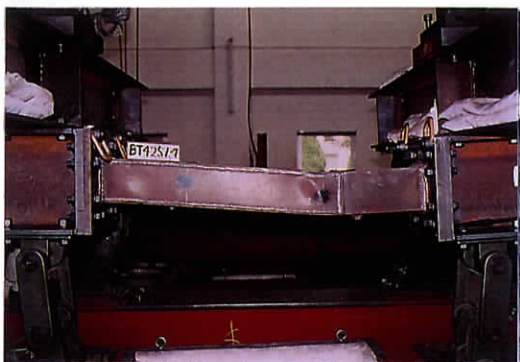
写真 5.7(a) 箱形断面部材の実験終了後の写真 (軸力比 0.3, 裏当て金あり)



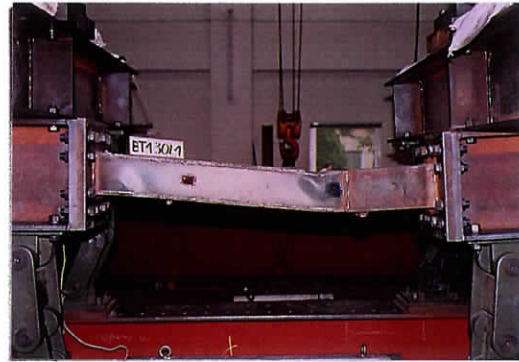
幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.4, 常温



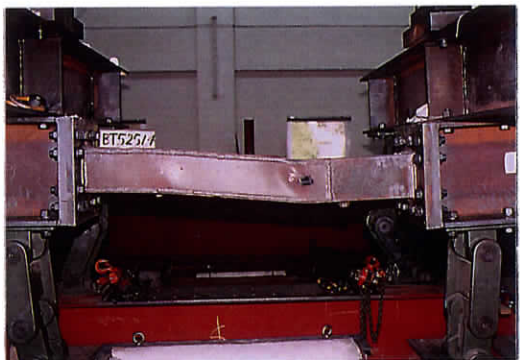
幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.4, 常温



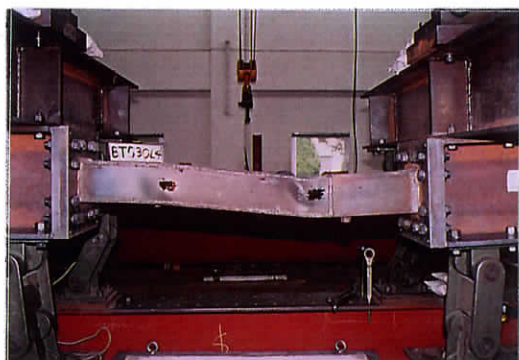
幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.4, 400°C



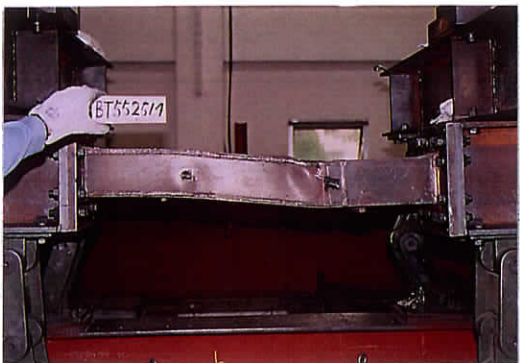
幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.4, 400°C



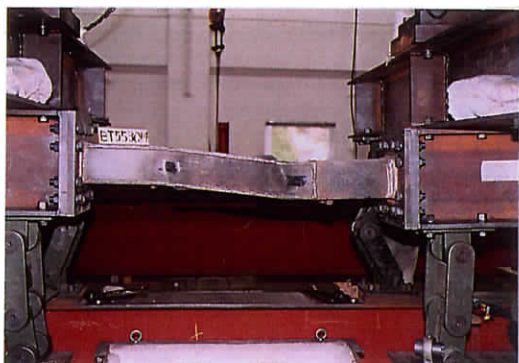
幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.4, 500°C



幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.4, 500°C

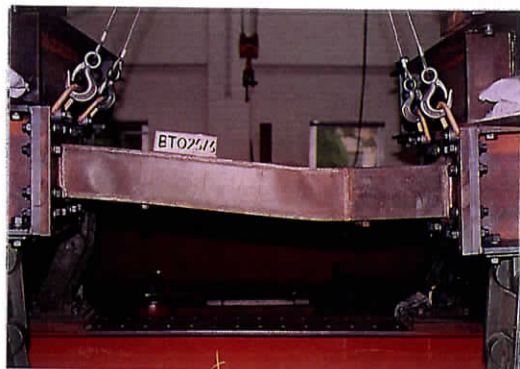


幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.4, 550°C



幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.4, 550°C

写真 5.7(b) 箱形断面部材の実験終了後の写真 (軸力比 0.4, 裏当て金あり)



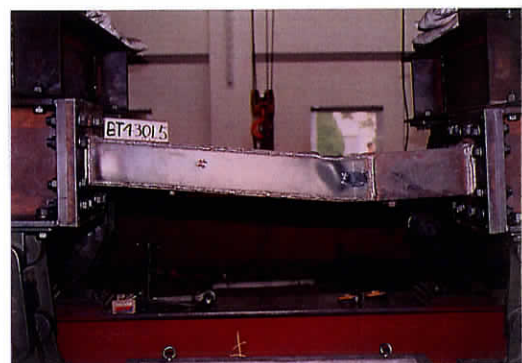
幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.5, 常温



幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.5, 常温



幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.5, 400°C



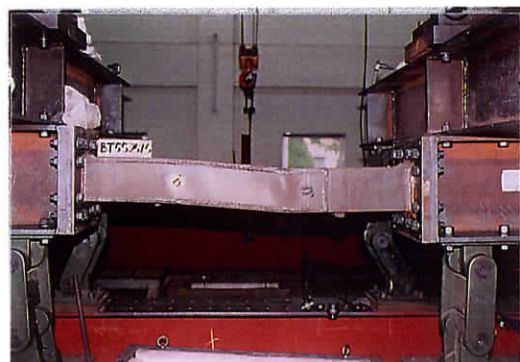
幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.5, 400°C



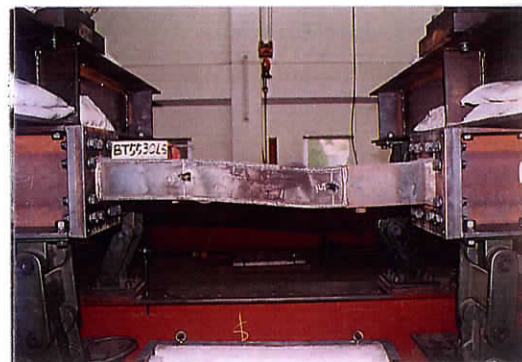
幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.5, 500°C



幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.5, 500°C

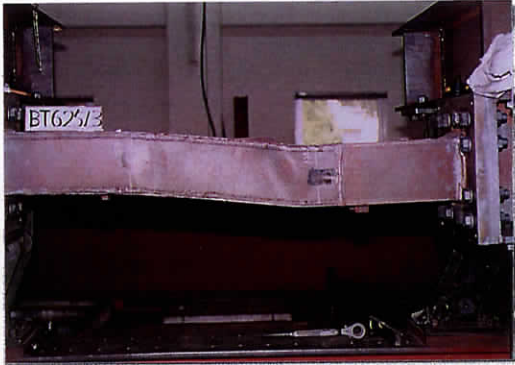


幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.5, 550°C

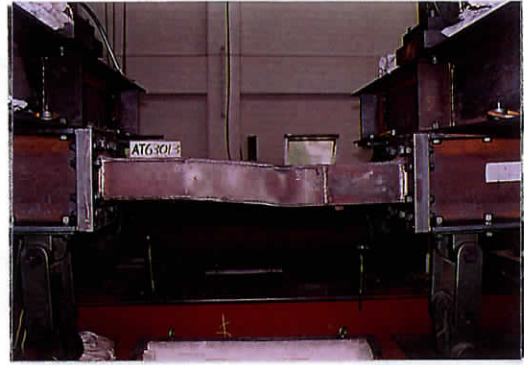


幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.5, 550°C

写真 5.7(c) 箱形断面部材の実験終了後の写真 (軸力比 0.5, 裏当て金あり)



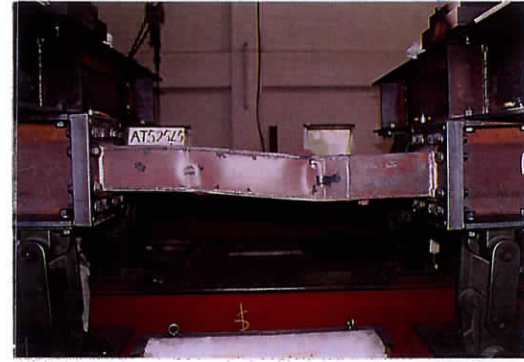
軸力比 0.3, 600°C, 裏当て金あり



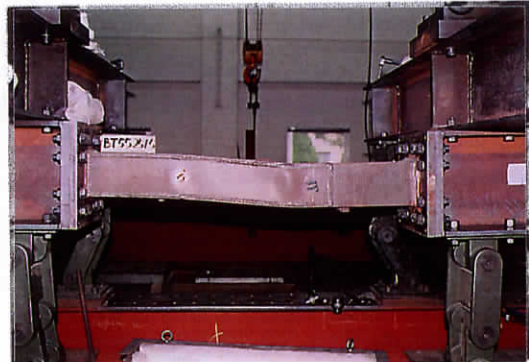
軸力比 0.3, 600°C, 裏当て金なし



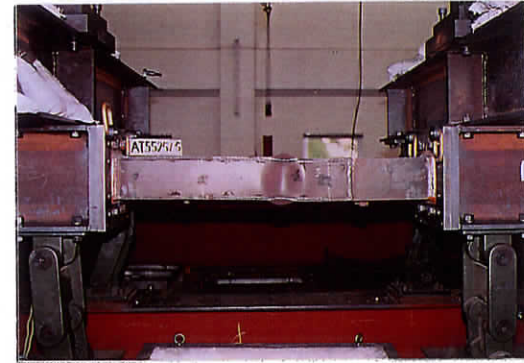
軸力比 0.5, 500°C, 裏当て金あり



軸力比 0.5, 500°C, 裏当て金なし



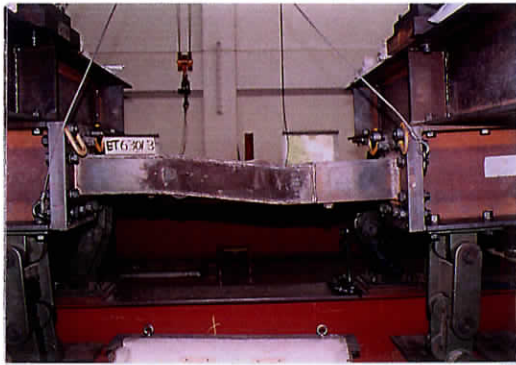
軸力比 0.5, 550°C, 裏当て金あり



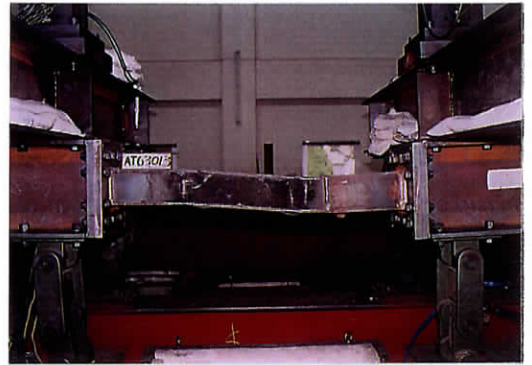
軸力比 0.5, 550°C, 裏当て金なし

写真 5.8(a) 裏当て金の有無による比較 (幅厚比  $d/t=25$  試験体の変形状況)





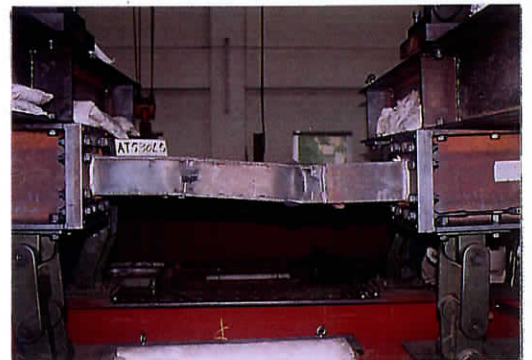
軸力比 0.3, 600°C, 裏当て金あり



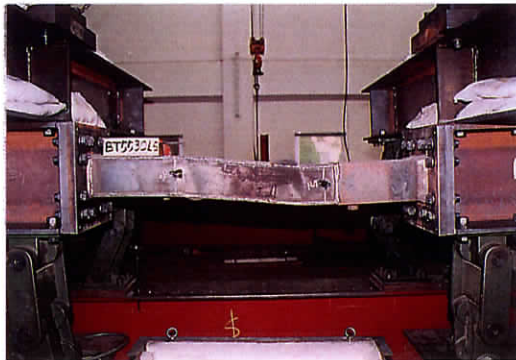
軸力比 0.3, 600°C, 裏当て金なし



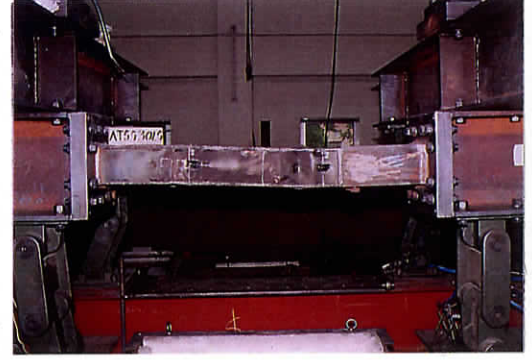
軸力比 0.5, 500°C, 裏当て金あり



軸力比 0.5, 500°C, 裏当て金なし

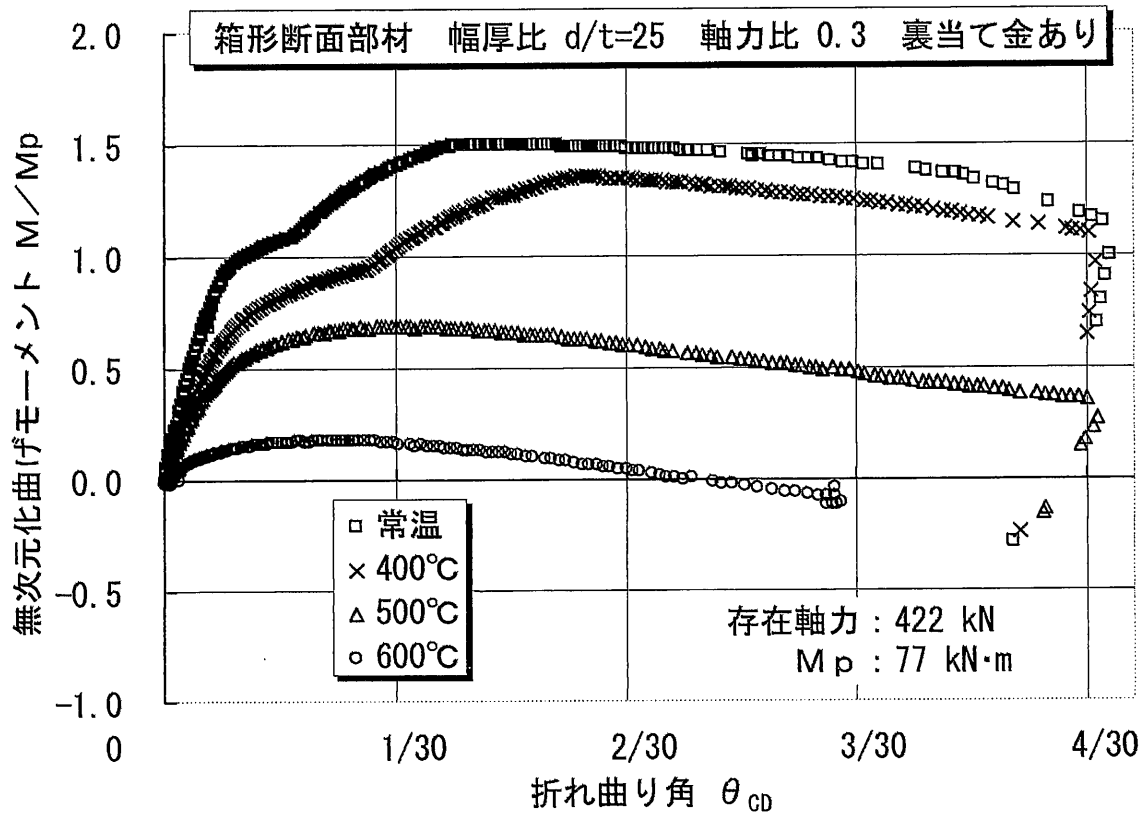


軸力比 0.5, 550°C, 裏当て金あり

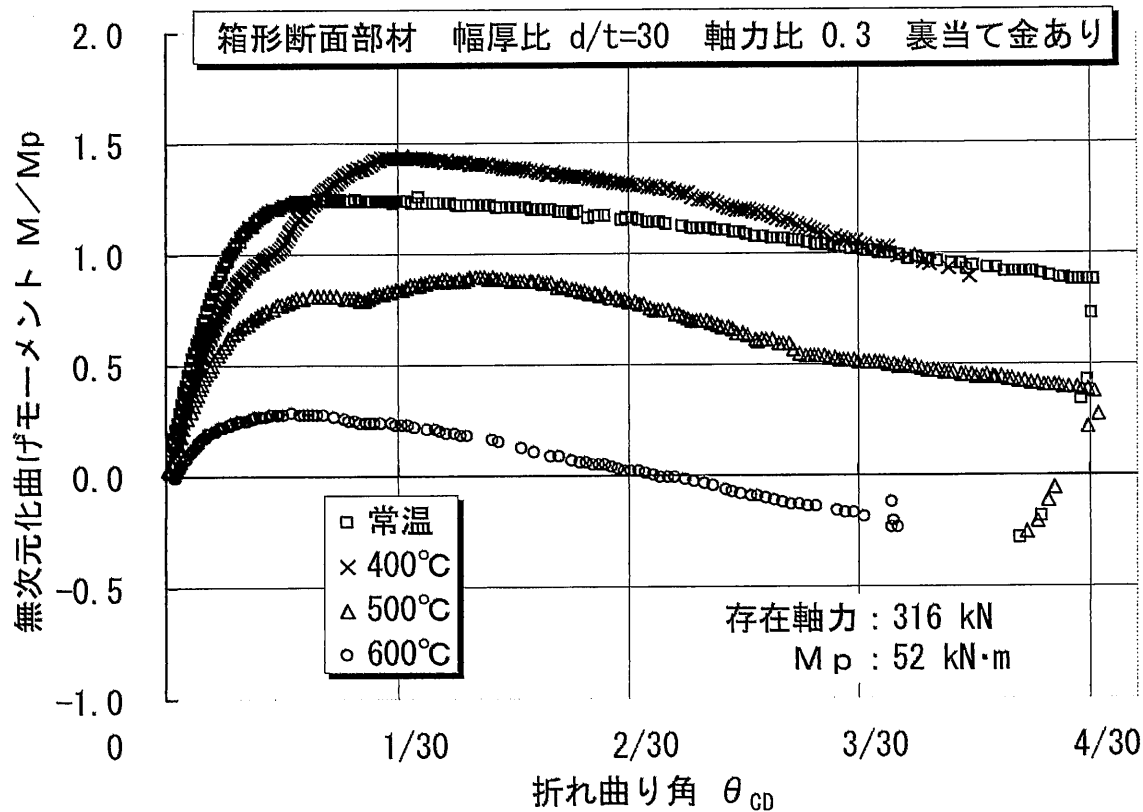


軸力比 0.5, 550°C, 裏当て金なし

写真 5.8(b) 裏当て金の有無による比較 (幅厚比  $d/t=30$  試験体の変形状況)

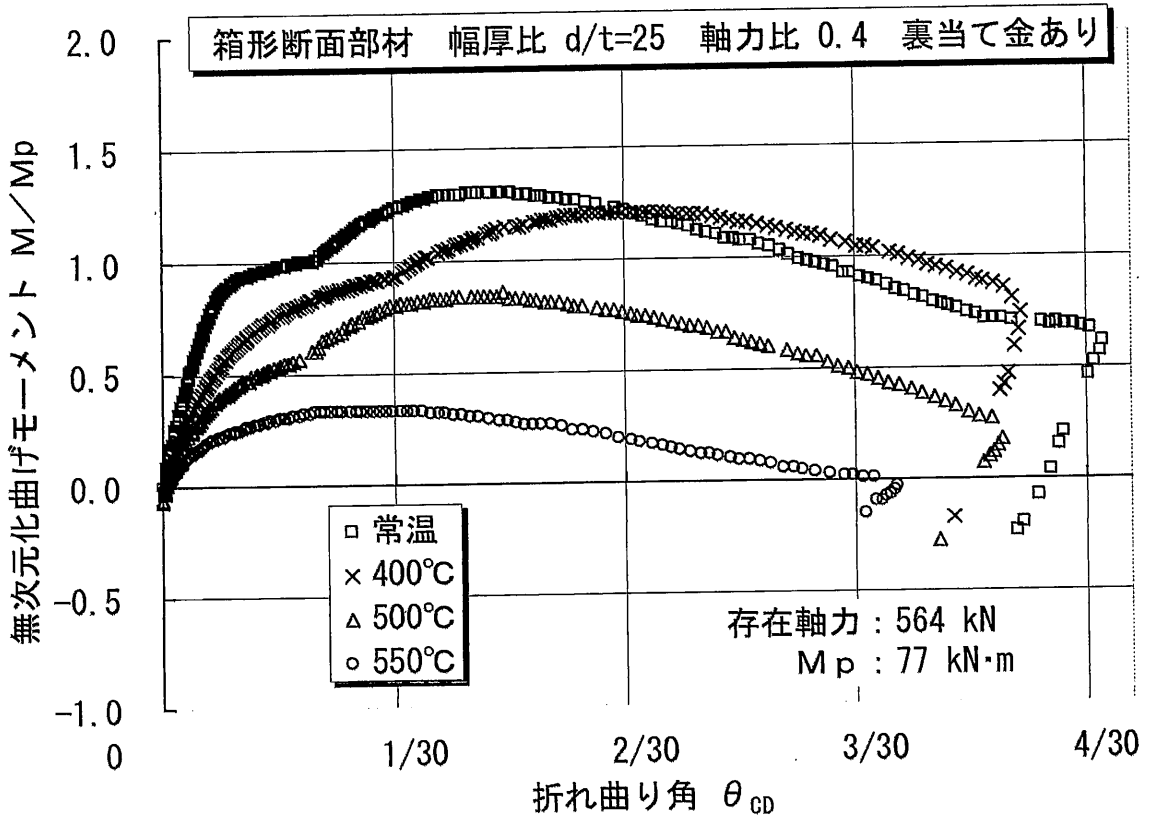


(a) 幅厚比  $d/t=25$  (□-150×150×6), 軸力比 0.3, 裏当て金あり

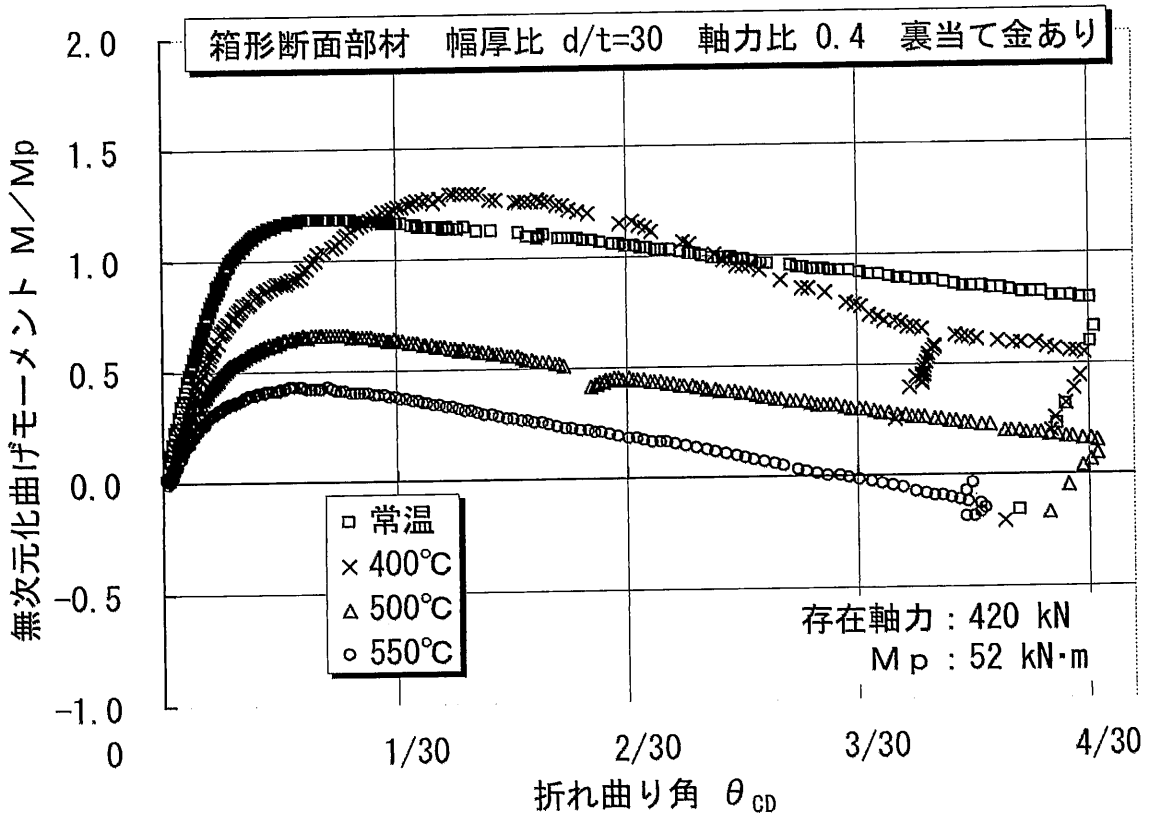


(b) 幅厚比  $d/t=30$  (□-135×135×4.5), 軸力比 0.3, 裏当て金あり

図 5.13 箱形断面部材の曲げ圧縮変形性状

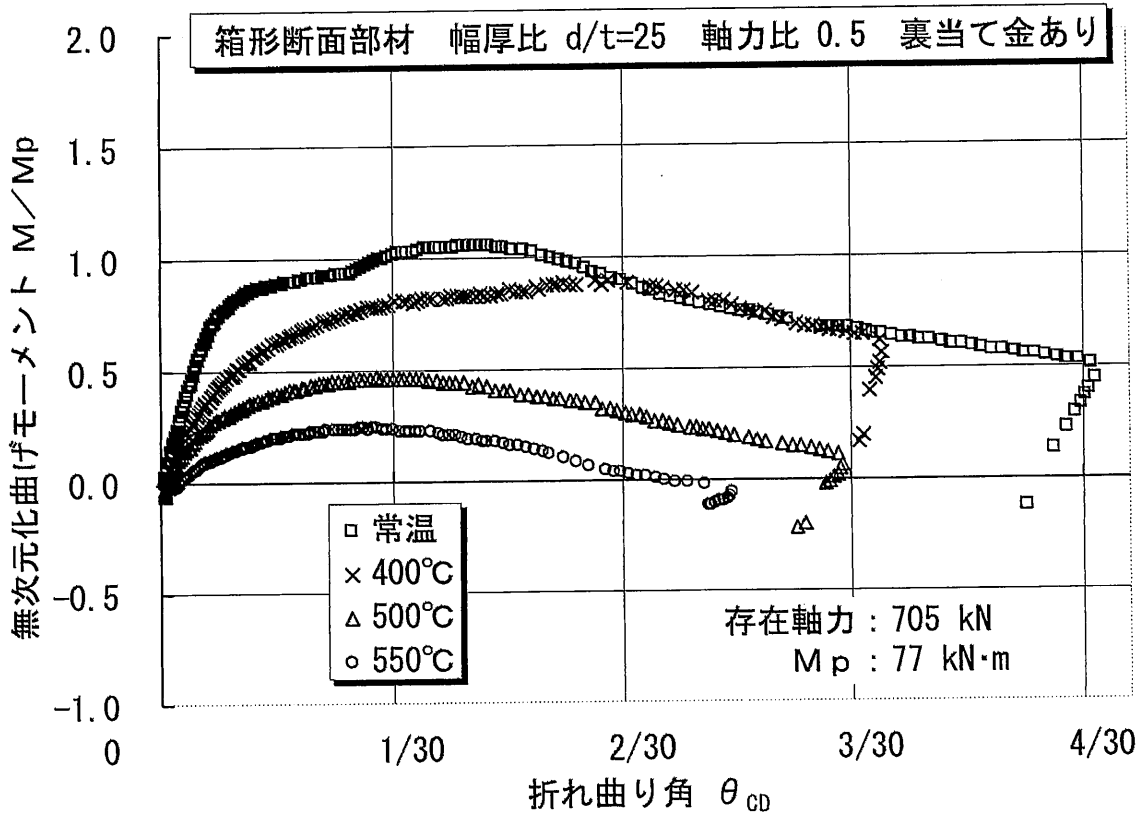


(c) 幅厚比  $d/t=25$  (□-150×150×6), 軸力比 0.4, 裏当て金あり

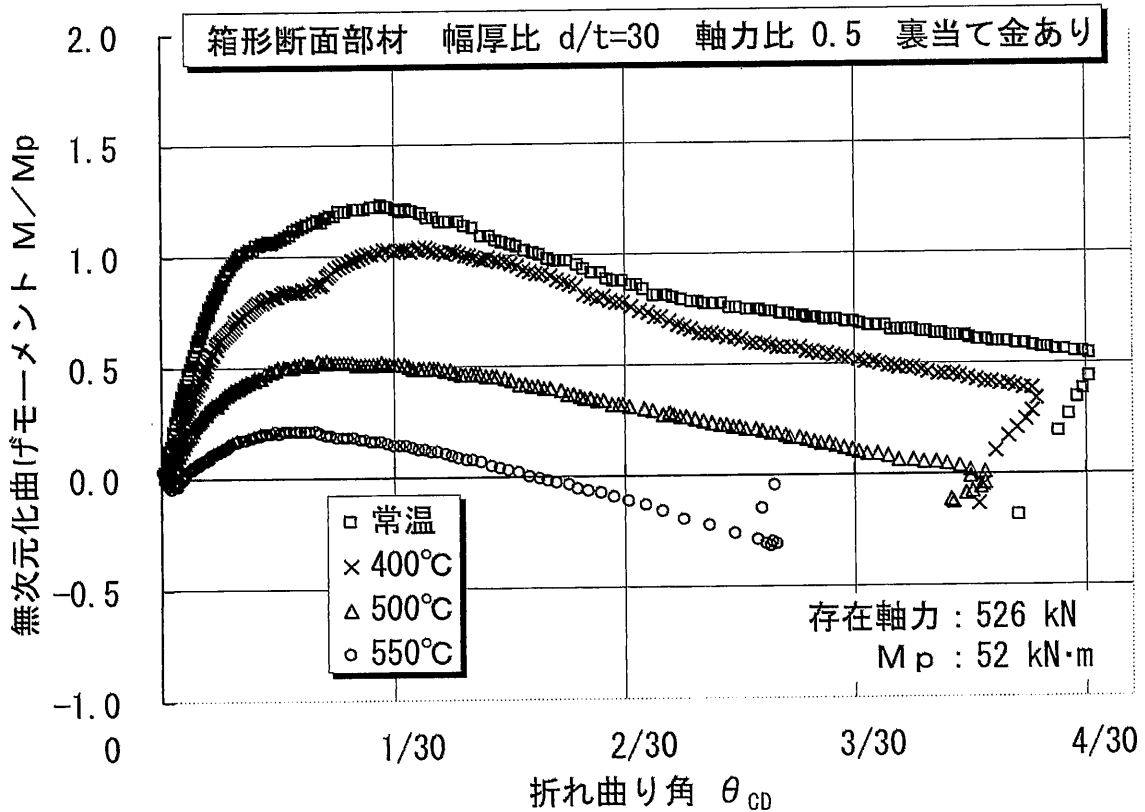


(d) 幅厚比  $d/t=30$  (□-135×135×4.5), 軸力比 0.4, 裏当て金あり

図 5.13 箱形断面部材の曲げ圧縮変形性状

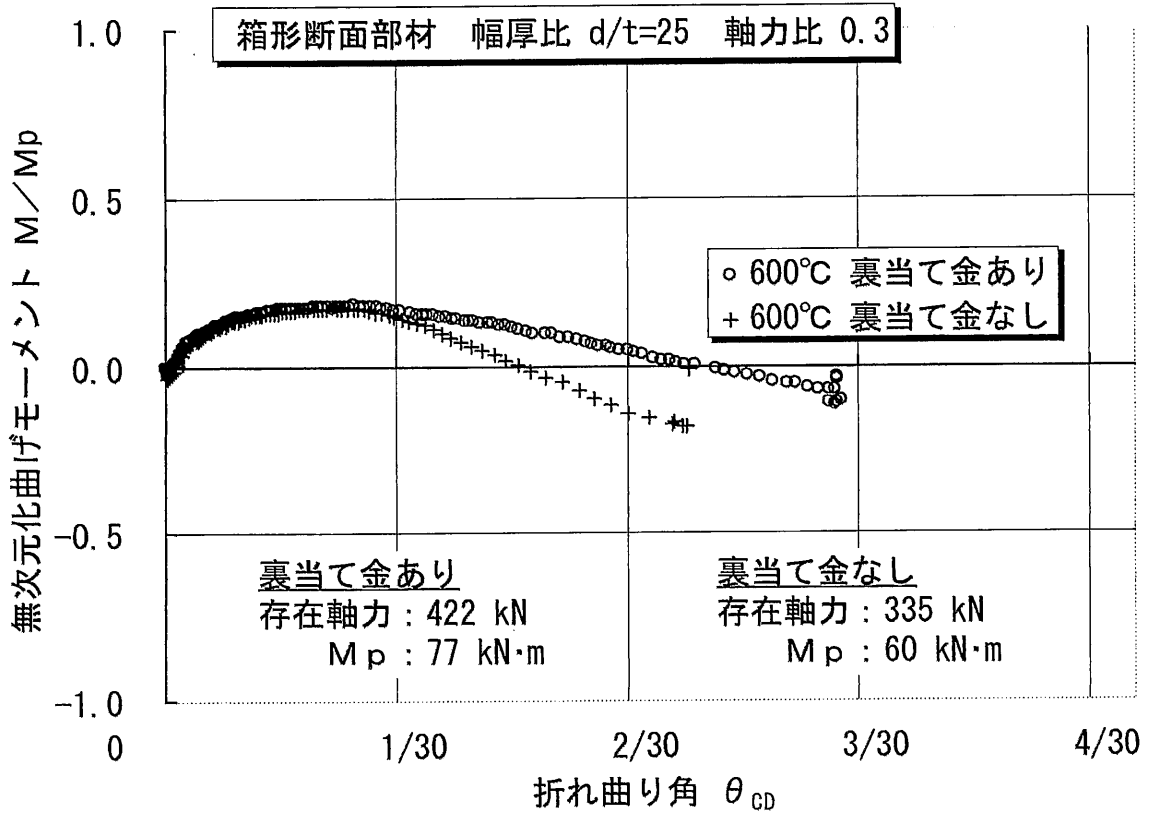


(e) 幅厚比  $d/t=25$  (□・150×150×6), 軸力比 0.5, 裏当て金あり

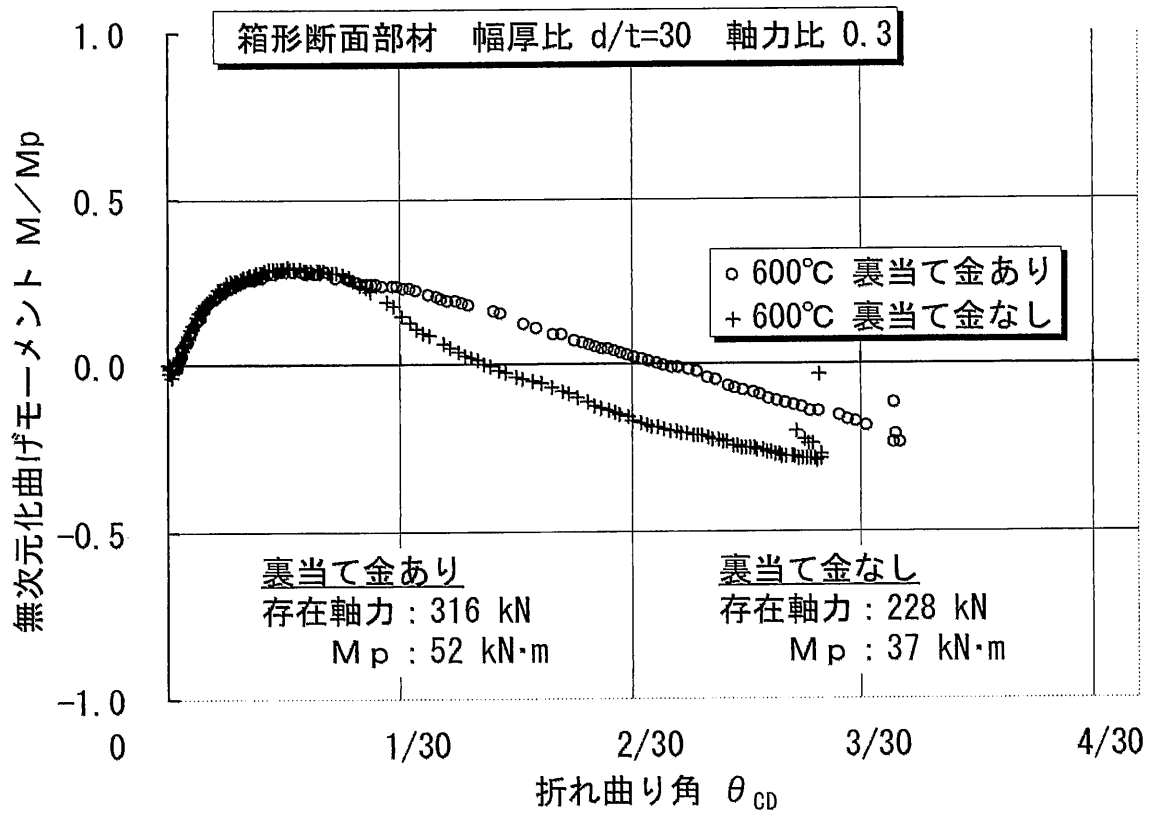


(f) 幅厚比  $d/t=30$  (□・135×135×4.5), 軸力比 0.5, 裏当て金あり

図 5.13 箱形断面部材の曲げ圧縮変形性状

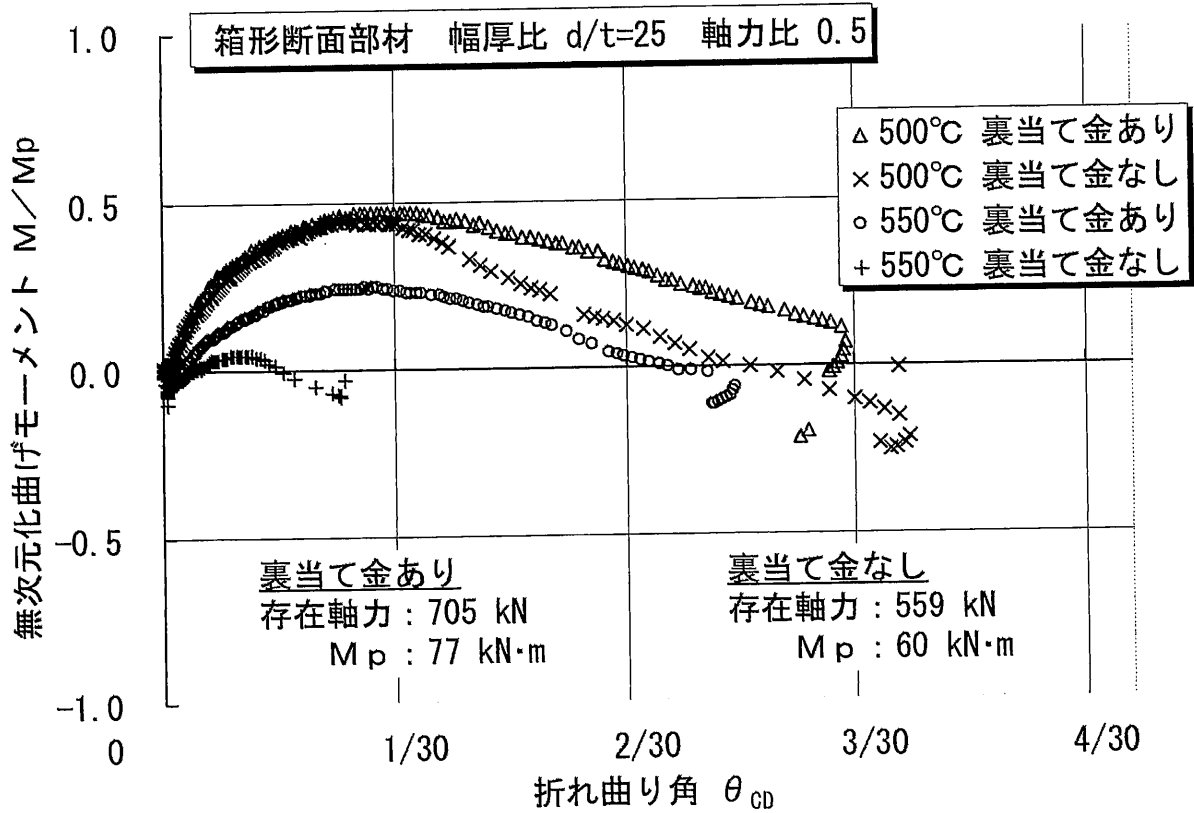


(a) 幅厚比  $d/t=25$  (□ $\cdot 150 \times 150 \times 6$ ), 軸力比 0.3

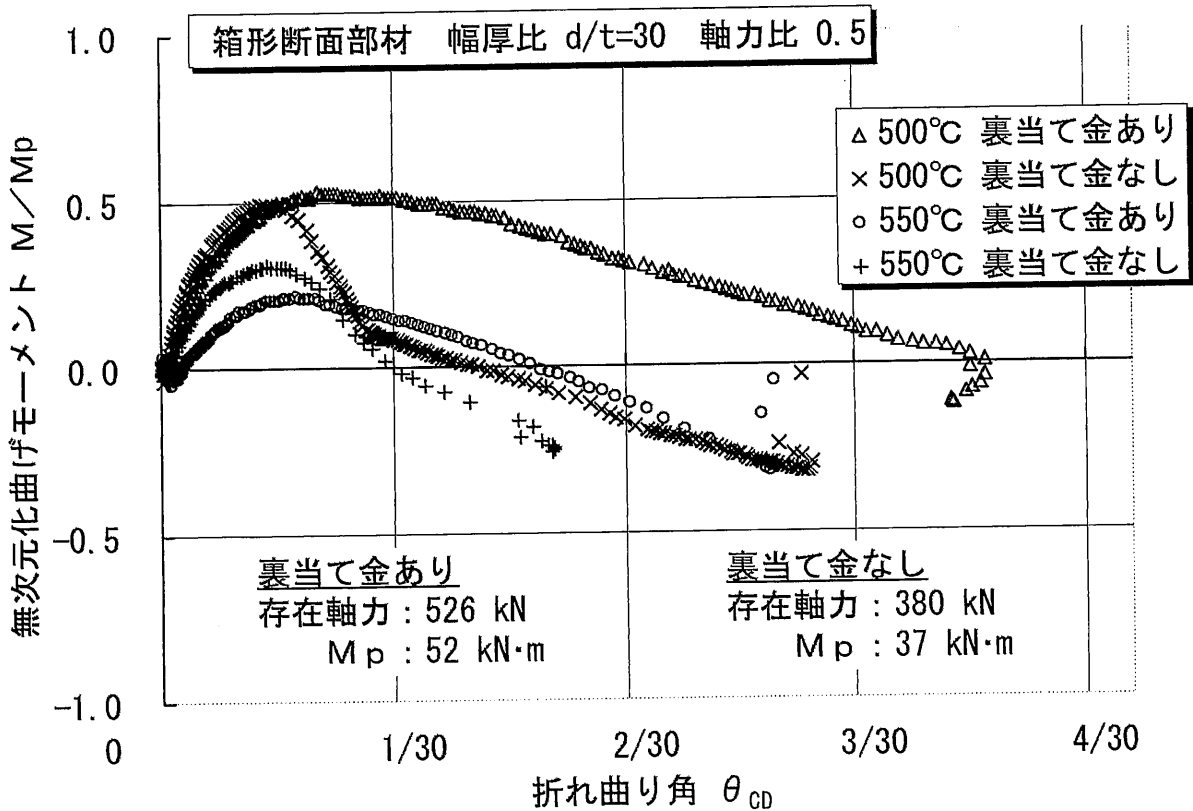


(b) 幅厚比  $d/t=30$  (□ $\cdot 135 \times 135 \times 4.5$ ), 軸力比 0.3

図 5.14 箱形断面部材の曲げ圧縮変形性状 (裏当て金の有無による比較)

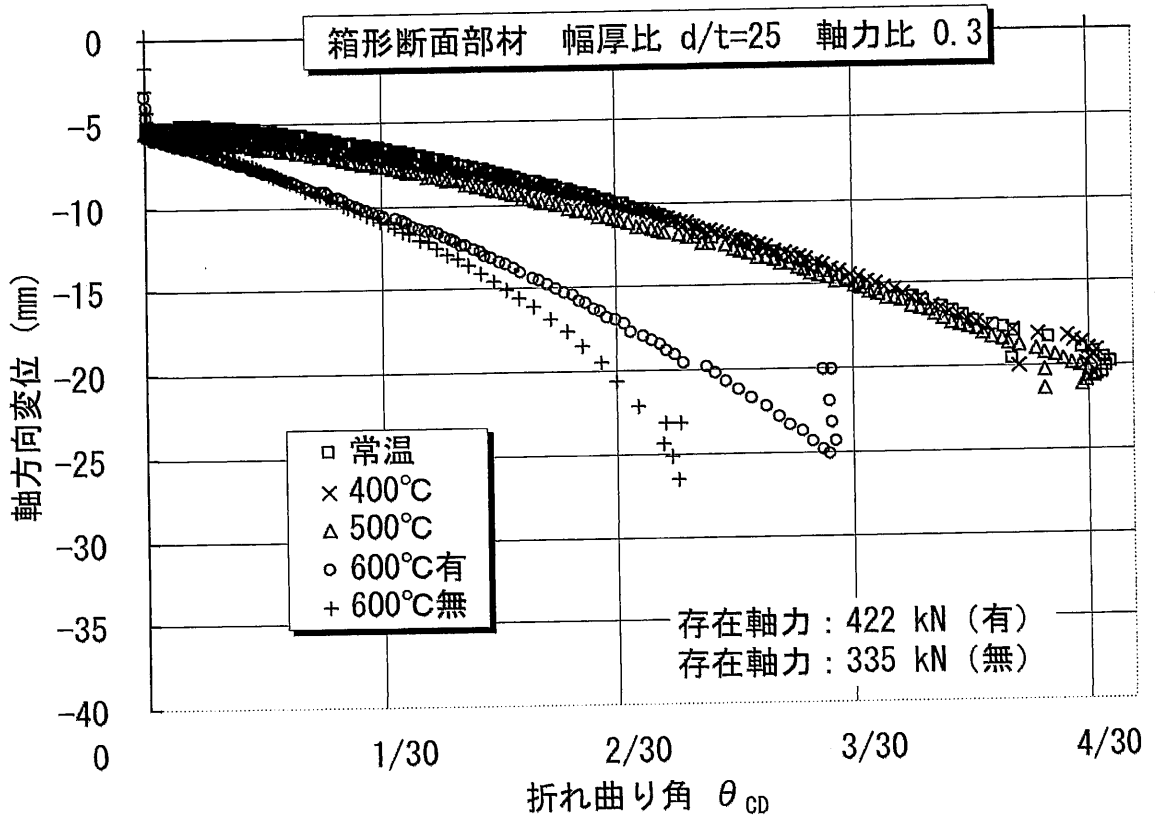


(c) 幅厚比  $d/t=25$  ( $\square$ -150×150×6), 軸力比 0.5

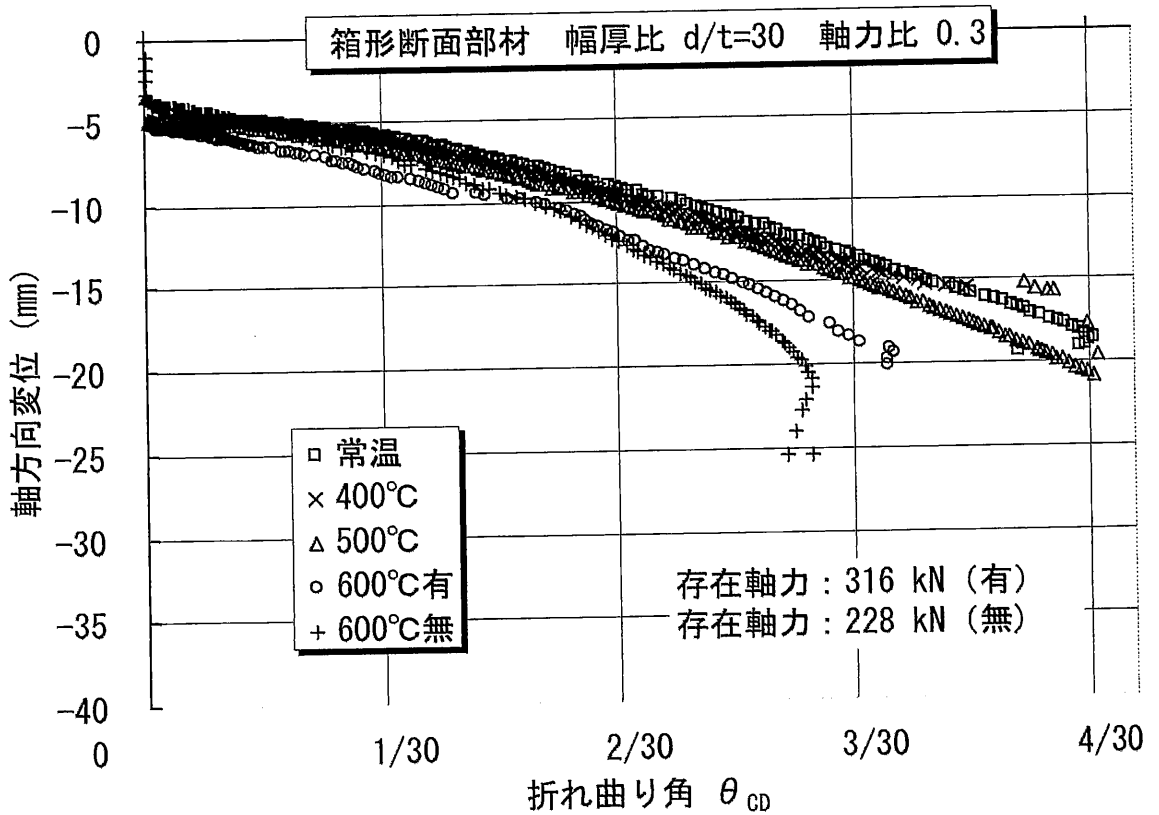


(d) 幅厚比  $d/t=30$  ( $\square$ -135×135×4.5), 軸力比 0.5

図 5.14 箱形断面部材の曲げ圧縮変形性状 (裏当て金の有無による比較)

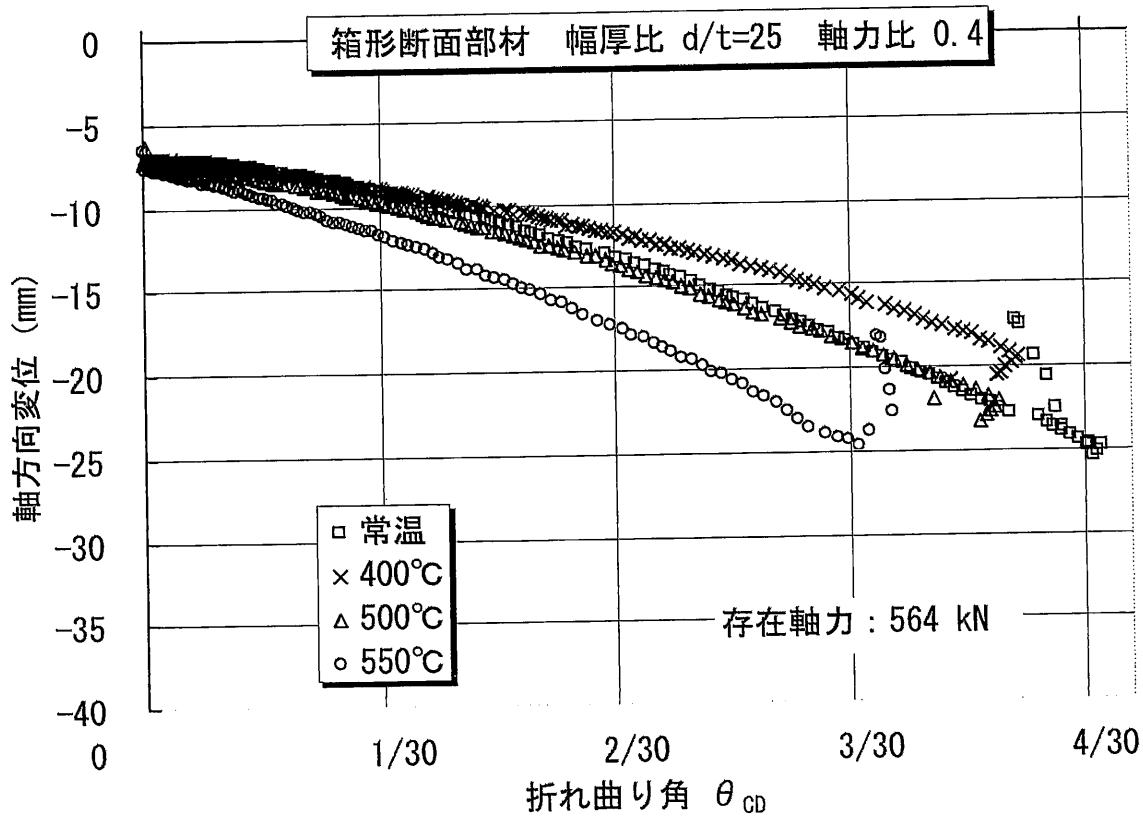


(a) 幅厚比  $d/t=25$  (□-150×150×6), 軸力比 0.3

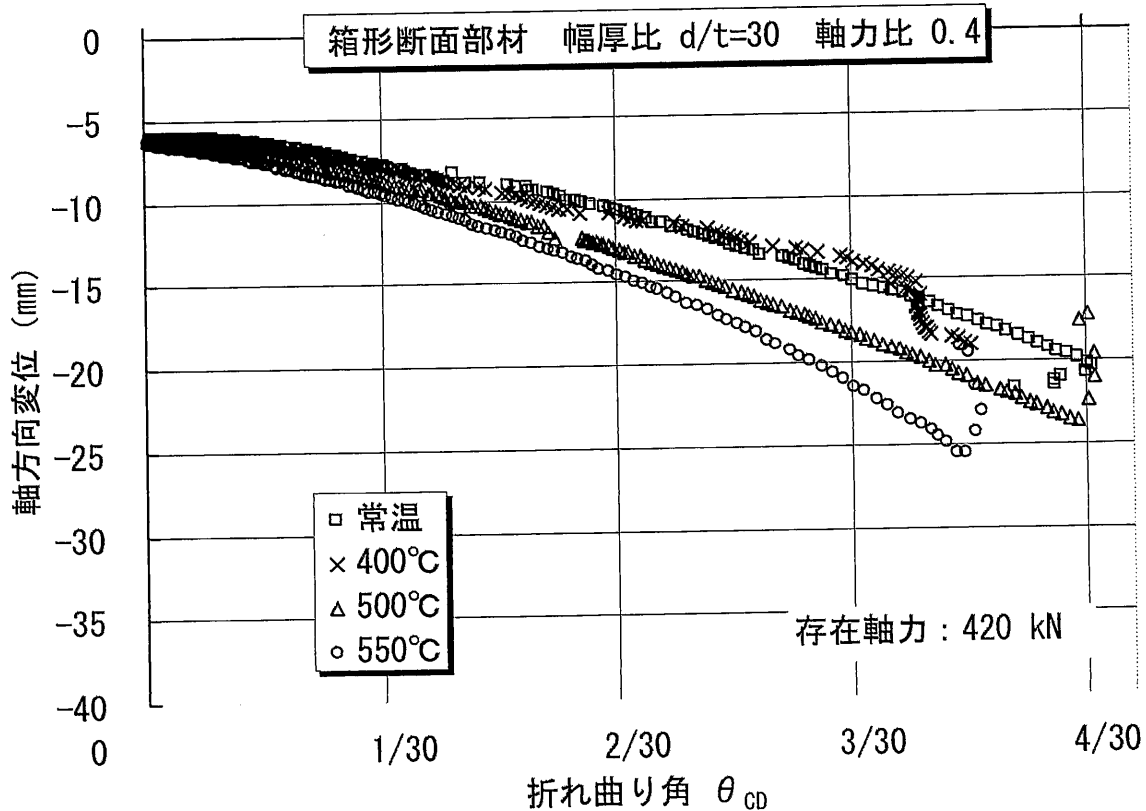


(b) 幅厚比  $d/t=30$  (□-135×135×4.5), 軸力比 0.3

図 5.15-A 箱形断面部材の曲げ圧縮変形性状



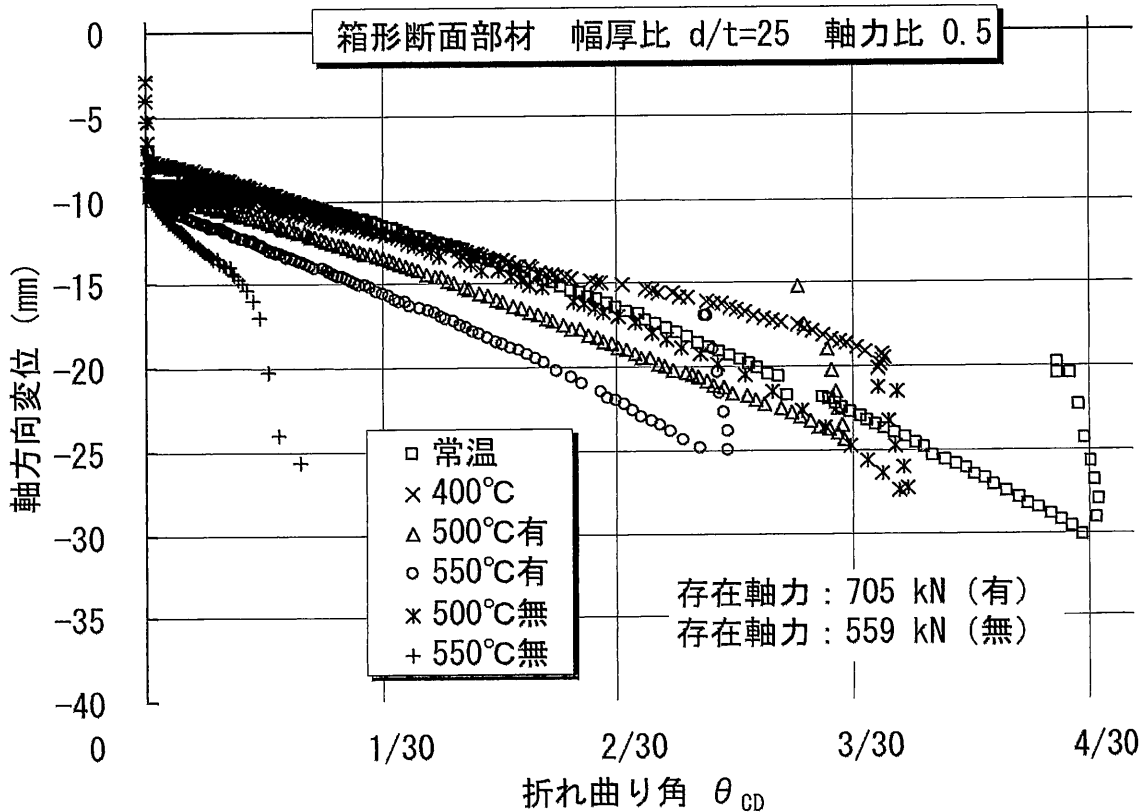
(c) 幅厚比  $d/t=25$  (□・150×150×6), 軸力比 0.4



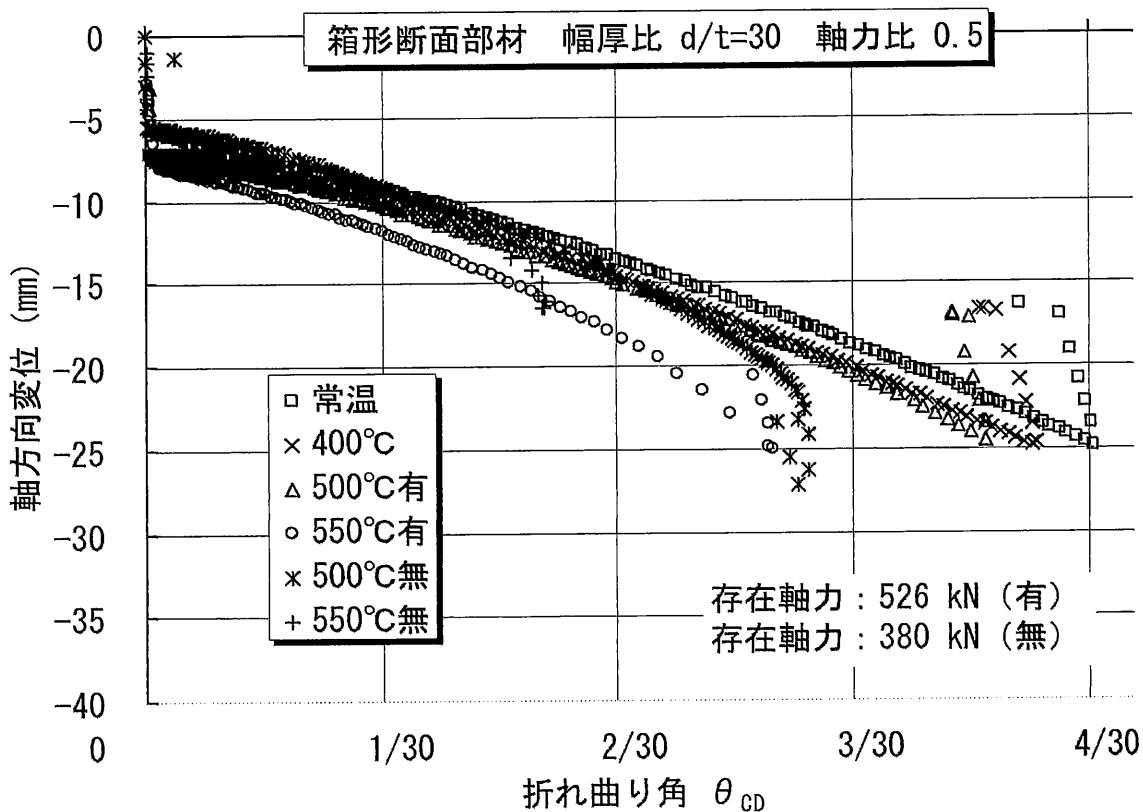
(d) 幅厚比  $d/t=30$  (□・135×135×4.5), 軸力比 0.4

図 5.15-A 箱形断面部材の曲げ圧縮変形状



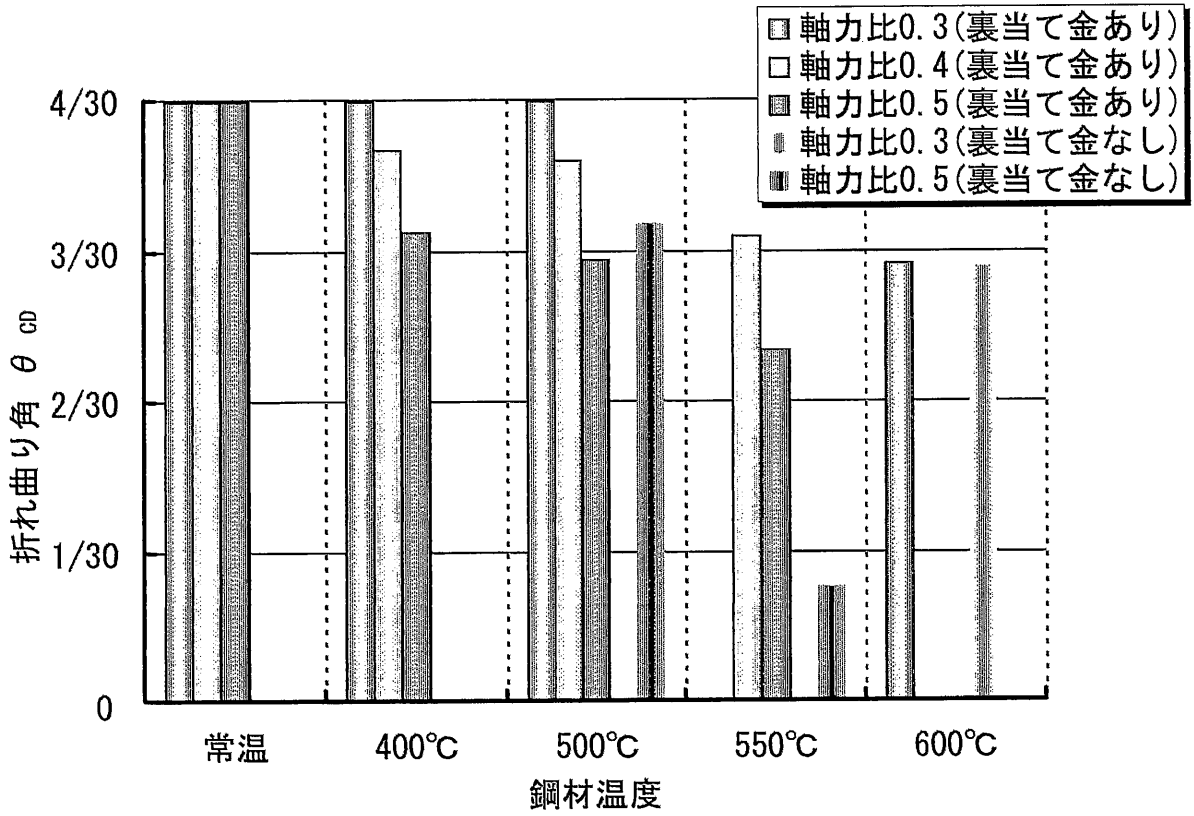


(e) 幅厚比  $d/t=25$  (□-150×150×6), 軸力比 0.5

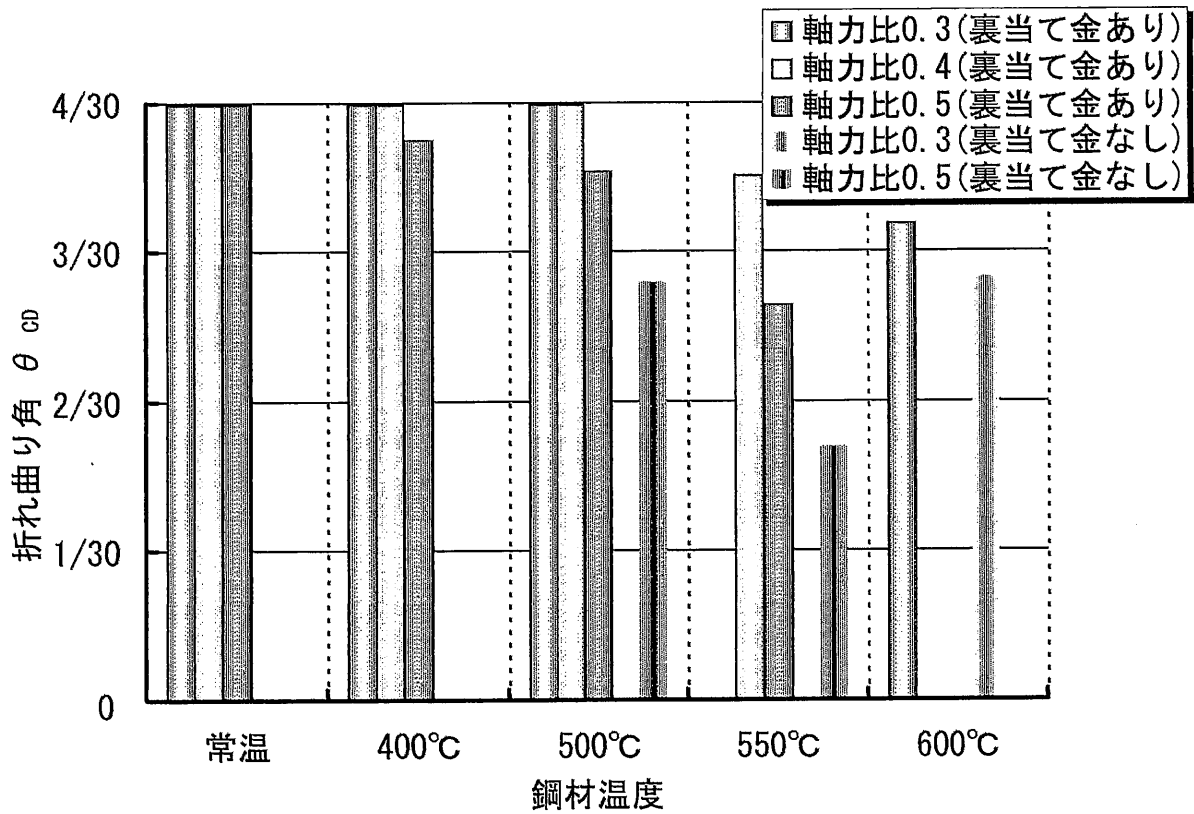


(f) 幅厚比  $d/t=30$  (□-135×135×4.5), 軸力比 0.5

図 5.15-A 箱形断面部材の曲げ圧縮変形状



(a) 幅厚比  $d/t=25$  (□-150×150×6)



(b) 幅厚比  $d/t=30$  (□-135×135×4.5)

図 5.15-B 箱形断面部材の荷重支持能力

## 5.3 曲げ圧縮実験の数値解析

### 5.3.1 数値解析の方法

#### (1) 解析手法

曲げ圧縮実験の数値解析は、4章に示す純曲げ実験の数値解析と同様に、鋼構造骨組の熱応力変形解析における手法<sup>15)</sup>を用いて行なった。部材の断面は大変形後においても平面を保持すると仮定し、断面を切片に分割して材料非線形を取り入れている。増分計算の過程で部材の傾斜と長さを修正することによって形状非線形性を考慮した、直接剛性法に基づく計算手法である<sup>16)</sup>。数値解析手法の詳細は付録1に示している。

#### (2) 解析条件

曲げ圧縮実験の数値解析モデルを図5.16に示す。試験部分とそれらにつながる加力梁を、材軸方向に添って13個の小部材に分割した。さらに、断面内の上下フランジで各1層、ウェブで6層、計8層の切片に小部材を分割した。

図5.16に示す数値解析モデルは、曲げ圧縮実験を忠実に再現したものである。まず、A点に対応する節点1において所定の存在軸力(P)を与える。次に、E点に対応する節点13において強制変位を与え、増分毎に表5.4に示す項目を計算する。表5.4に示す出力項目は、実験結果に対応するものである。これらの値を求めることにより、D点に生じる曲げモーメントと折れ曲り角の関係を、実験と同様に導くことができる。

本解析は、局部座屈の発生を考慮して、実験より得られた曲げ圧縮変形性状の追跡を試みるものである。曲げ圧縮実験においては、写真5.6～写真5.8に示したように、試験部分の右端部(D点近傍)と、試験体の左端部または試験部分の左端部(C点近傍)に局部座屈が発生した。また、実験終了後における試験体の変形状況を見ると、局部座屈幅は部材幅とほぼ同じ位であった。これより、本解析においては、局部座屈の発生する可能性がある部分における小部材の長さを、部材幅と同じ長さとした。図5.16に示す数値解析モデルは、120mmの幅を持つH形断面部材の例である。局部座屈の発生する可能性がある小部材(図中に示す4, 6, 10部材)の長さは、部材幅と同じ120mmとした。

引張域および圧縮域における局部座屈前の応力-ひずみ曲線には、引張試験結果より数式化した(2.1)式を用いた。圧縮域における局部座屈後の応力-ひずみ曲線には、短柱圧縮実験結果より数式化した(3.3)式および(3.4)式を用いた。時間の増加に伴う部材温度の変化はないものとし、部材断面内の温度は均一とした。鋼材の高温クリープは考慮しないこととした。

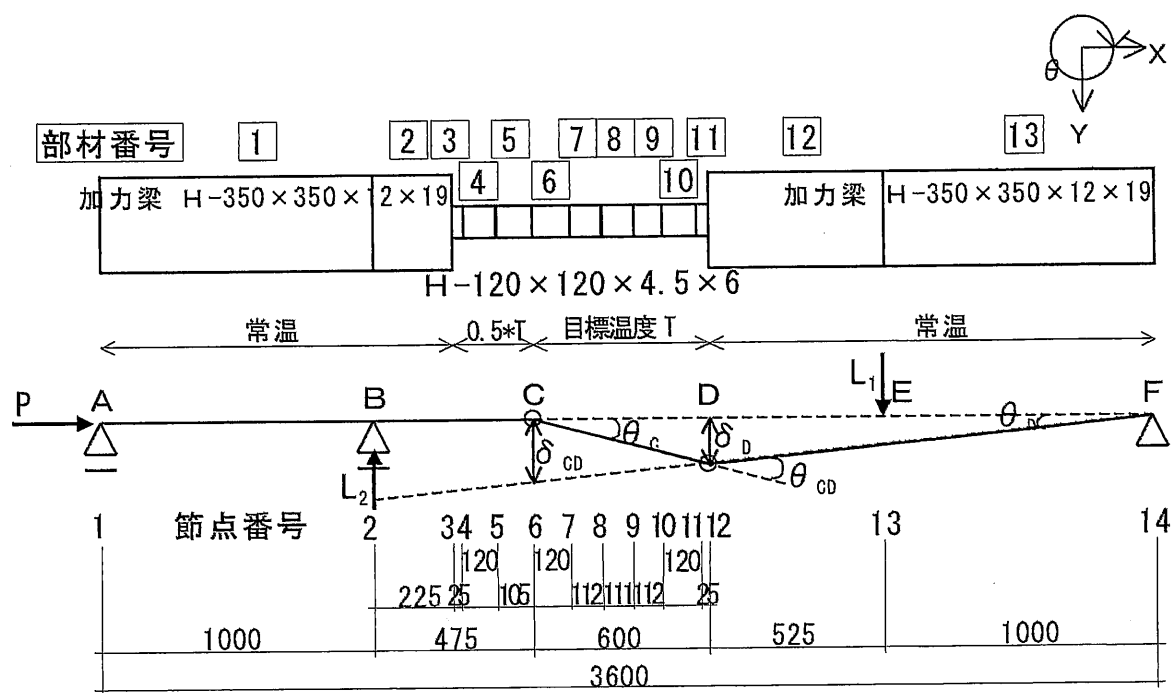


図 5.16 曲げ圧縮実験の数値解析モデルの一例 (H-120×120×4.5×6)

表 5.4 曲げ圧縮実験の数値解析における出力項目

出力項目	対応する実験値
13 節点の Y 方向荷重	加力側垂直アクチュエーターの荷重 ( $L_1$ )
2 節点の Y 方向荷重	ピン支持側垂直アクチュエーターの荷重 ( $L_2$ )
1 節点の X 方向荷重	水平アクチュエーターの荷重 ( $P$ )
12 節点の Y 方向変位	D 点の絶対変位 ( $\delta_D$ )
6 節点の Y 方向変位	C-D 間における相対変形 ( $\delta_{CD}$ )
12 節点の Y 方向変位	$\delta_{CD} = +(D \text{ 点の絶対変位}) - (C \text{ 点の絶対変位})$
12 節点の $\theta$ 方向変位	$+(D \text{ 点の回転変位}) \times C-D \text{ 間の長さ}$

### 5.3.2 解析結果と実験結果の比較

#### (1) H形断面部材

局部座屈を考慮した応力・ひずみ曲線式による解析結果とH形断面部材の曲げ圧縮実験結果との比較を、図5.17の(a)～(f)に示す。

図5.17の(a)に示す幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.3 の結果を見ると、全ての温度において、解析結果の方が初期の勾配は大きく、折れ曲り角  $1/30$  以内では解析値が実験値を上回っている。解析結果では、折れ曲り角  $1/30$  以降において曲げモーメントが低下している。常温と  $400^{\circ}\text{C}$  においては解析値が実験値を下回り、 $500^{\circ}\text{C}$  と  $600^{\circ}\text{C}$  においては解析値が実験値に近い値を示している。

図5.17の(b)に示す幅厚比  $b/t=10$ 、軸力比 0.3 の結果を見ると、図5.17の(a)に示す幅厚比  $b/t=7.5$  の結果と同様に、解析結果の方が初期の勾配は大きい。実験値と解析結果の定量的な差は、幅厚比  $b/t=7.5$  に比べて幅厚比  $b/t=10$  の方が小さい。最大曲げモーメント後における折れ曲り角の増加に伴うモーメントの低下については、解析値は実験値をほぼ追跡している。

図5.17の(c)に示す幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.4 の結果を見ると、図5.17の(a)に示す幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.3 の結果と同様、折れ曲り角  $1/30$  以内では解析値が実験値を上回っている。折れ曲り角  $1/30$  以降では、解析値が実験値を下回っている。常温と  $400^{\circ}\text{C}$  においては、実験値と解析値に大きな差が見られる。

図5.17の(d)に示す幅厚比  $b/t=10$ 、軸力比 0.4 の結果を見ると、常温においては、解析値が実験値を大きく上回っているが、折れ曲り角が増加するにつれて解析値と実験値の差が小さくなっている。 $400^{\circ}\text{C}$  と  $500^{\circ}\text{C}$  においては、初期の勾配に差が見られるが、最大曲げモーメント後においては解析値が実験値に近い値を示している。 $550^{\circ}\text{C}$  においては、実験では所定の軸力を与えた際に負の曲げモーメントが生じており、解析値は実験値より大きな値を示している。

図5.17の(e)に示す幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.5 の結果では、解析値と実験値の対応は、図5.17の(c)に示す幅厚比  $b/t=7.5$ 、軸力比 0.4 の結果と概ね同じ対応を示している。 $550^{\circ}\text{C}$  の解析では、折れ曲り角  $2/30$  位で収束不可能となった。

図5.17の(f)に示す幅厚比  $b/t=10$ 、軸力比 0.5 の結果を見ると、における解析値と実験値の対応は、図5.17の(d)に示す幅厚比  $b/t=10$ 、軸力比 0.4 の結果と概ね同じ対応を示している。 $550^{\circ}\text{C}$  の解析では、折れ曲り角  $1/30$  位で収束不可能となった。

局部座屈ありと局部座屈なしの数値解析とH形断面部材の曲げ圧縮実験を比較した結果を、図 5.18 の(a)~(f)に示す。

図 5.18 の(a)と(c)と(e)に示す幅厚比  $b/t=7.5$  の結果を見ると、常温と  $400^{\circ}\text{C}$  においては、局部座屈なしの解析のほうが実験結果を追跡している。 $500^{\circ}\text{C}$  と  $600^{\circ}\text{C}$  においては、局部座屈ありの解析の方が実験結果を追跡している。

図 5.18 の(b)と(d)と(f)に示す幅厚比  $b/t=10$  の結果を見ると、局部座屈ありの解析は、折れ曲り角の増加に伴う曲げモーメントの低下を定性的に追跡している。

## (2) 箱形断面部材

箱形断面部材における曲げ圧縮実験結果と局部座屈を考慮した応力・ひずみ曲線式による解析結果の比較を、裏当て金ありの結果については図 5.19 の(a)~(f)に、裏当て金なしの結果については図 5.20 の(a)~(d)に示す

図 5.19 の(a)に示す幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3, 裏当て金ありの結果を見ると、解析結果の方が、初期の勾配は大きく、最大曲げモーメント後における折れ曲り角の増加に伴うモーメントの低下は大きい。折れ曲り角  $1/30$  以降においては、全ての温度において解析値が実験値を下回っている。常温と  $400^{\circ}\text{C}$  では大きな差が見られ、 $500^{\circ}\text{C}$  と  $600^{\circ}\text{C}$  では近い値を示している。

図 5.19 の(b)に示す幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.3, 裏当て金ありの結果を見ると、図 5.19 の(a)に示す幅厚比  $d/t=25$  の結果と同様に、最大曲げモーメント後における折れ曲り角の増加に伴うモーメントの低下は解析結果の方が大きく、折れ曲り角  $1/30$  以降において解析値が実験値を下回っている。

図 5.19 の(c)~(f)に示す軸力比 0.4 と軸力比 0.5 の結果においても、折れ曲り角が大きくなると、解析値が実験値を下回っている。図 5.17 の(a)~(f)に示したH形断面部材の結果に比べると、裏当て金ありの箱形断面部材の結果は、解析値と実験値の差が大きい。この理由としては、裏当て金の拘束が幅厚比を小さくし、実験値を押し上げたものと考えられる。

図 5.20 の(a)~(d)に示す裏当て金なしの結果については、幅厚比・軸力比・鋼材温度が同じである裏当て金ありの結果と併せて示す。

図 5.20 の(a)に示す幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3, 鋼材温度  $600^{\circ}\text{C}$  の結果を見ると、裏当て金なしの解析結果は、裏当て金ありの解析結果に比べて初期の勾配が実験結果に対応している。曲げモーメントの低下は、実験結果より早い段階

において生じるが、折れ曲り角の増大に伴う曲げモーメントの低下を定性的に追跡している。図 5.20 の(b)に示す幅厚比  $d/t=30$ ，軸力比 0.3，鋼材温度  $600^{\circ}\text{C}$  の裏当て金なしの解析結果は、実験結果に比べて最大曲げモーメントの値が大きい。実験結果より早い段階において最大曲げモーメントに達するが、折れ曲り角の増大に伴う曲げモーメントの低下を定性的に追跡している。

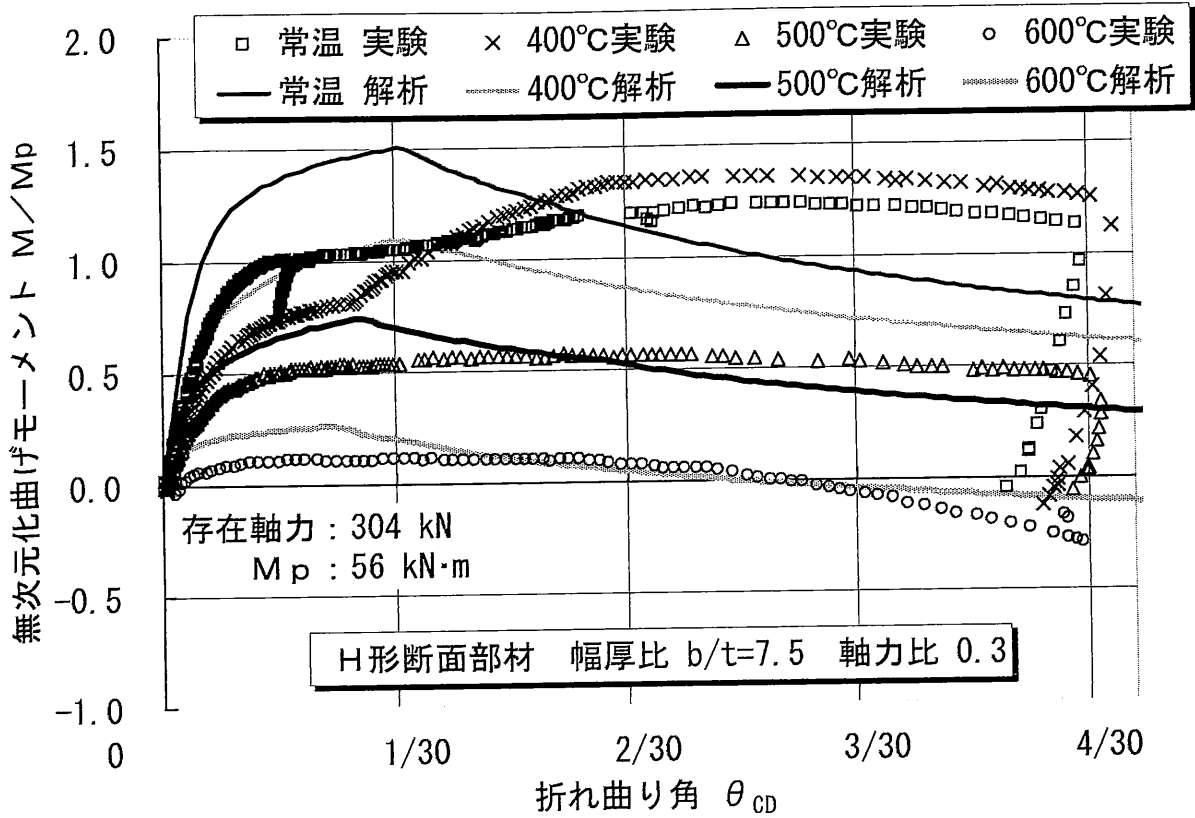
図 5.20 の(c)に示す幅厚比  $d/t=25$ ，軸力比 0.5 と図 5.20 の(d)に示す幅厚比  $d/t=30$ ，軸力比 0.5 の結果においても、早い段階において曲げモーメントが低下する解析値の方が、実験値を下回っている。なお、解析結果において、折れ曲り角  $4/30$  以下でグラフが途絶えているものは、その時点において収束しなくなったことを示している。

箱形断面部材における曲げ圧縮実験と局部座屈ありと局部座屈なしの数値解析を比較した結果を、裏当て金ありについては図 5.21 の(a)～(f)に、裏当て金なしについては図 5.22 の(a)と(b)に示す。

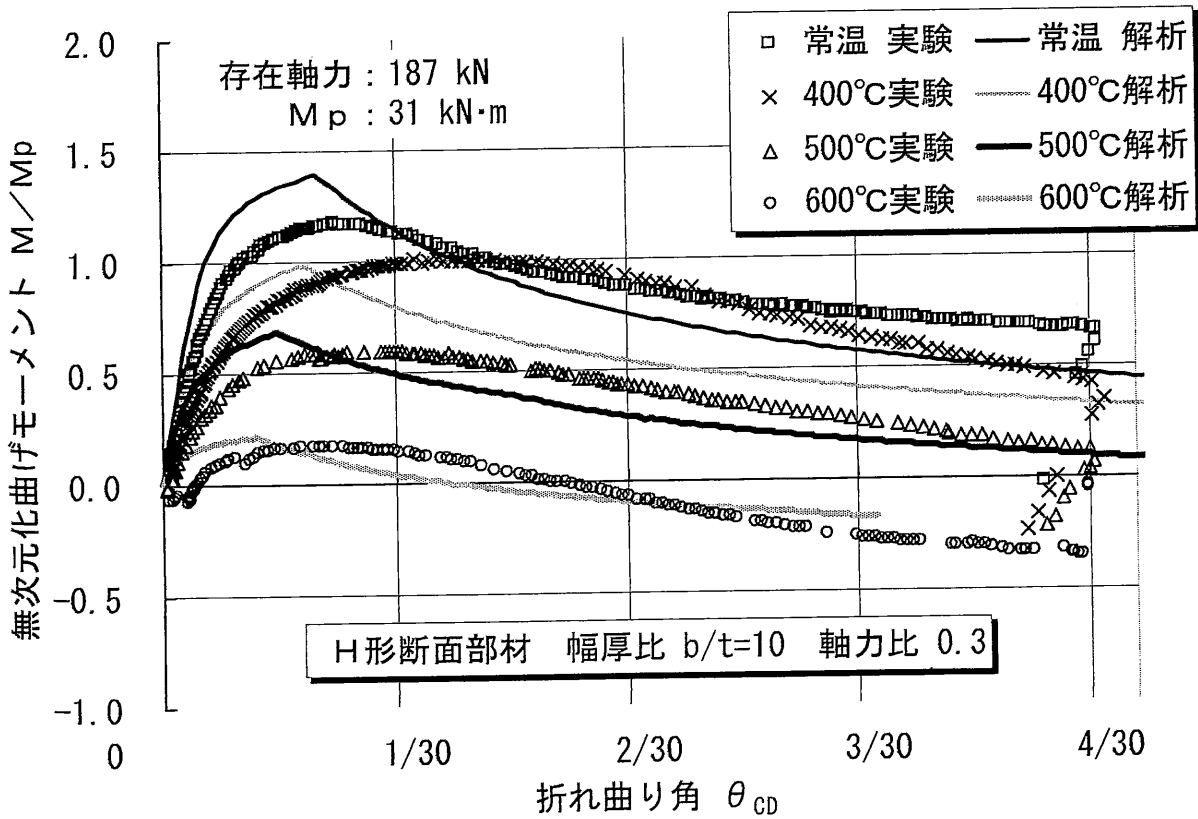
図 5.21 の(a)～(f)に示す結果を全体にわたり見渡すと、大略、実験結果は局部座屈ありの解析と局部座屈なしの解析の間に位置している。常温と  $400^{\circ}\text{C}$  においては、実験結果は局部座屈なしの解析結果に近い値を示しているが、 $400^{\circ}\text{C}$  から  $600^{\circ}\text{C}$  へと高温になるにつれて、実験結果は局部座屈ありの解析結果に近づいている。

図 5.22 の(a)と(b)に示す裏当て金なしの結果は、図 5.21 の(a)～(f)に示す裏当て金ありの結果に比べて、局部座屈ありの解析結果が実験結果に対応している。折れ曲り角の増加に伴う曲げモーメントの低下を定性的に追跡している。

曲げ圧縮実験の数値解析を行なった結果、局部座屈ありの解析結果は、実験結果による曲げモーメントの値を下回る傾向にあった。H形断面部材については、幅厚比の大きい  $b/t=10$  の方が、解析値と実験値が対応していた。箱形断面部材については、裏当て金なしの方が、解析値と実験値が対応していた。また、常温と  $400^{\circ}\text{C}$  よりも  $500^{\circ}\text{C}$ ～ $600^{\circ}\text{C}$  の方が、解析値と実験値が対応していた。全体的な傾向として、局部座屈後の応力・ひずみ曲線を用いた数値解析結果は、局部座屈を考慮しない数値解析結果に比較して、曲げ圧縮実験の結果と対応していた。これより、局部座屈を考慮した応力・ひずみ曲線を用いれば、局部座屈を考慮しない従来の数値解析に比べて、加熱梁の伸びだしにより大きく折れ曲る外柱柱頭の曲げ圧縮変形性状を定性的に追跡できることが示された。



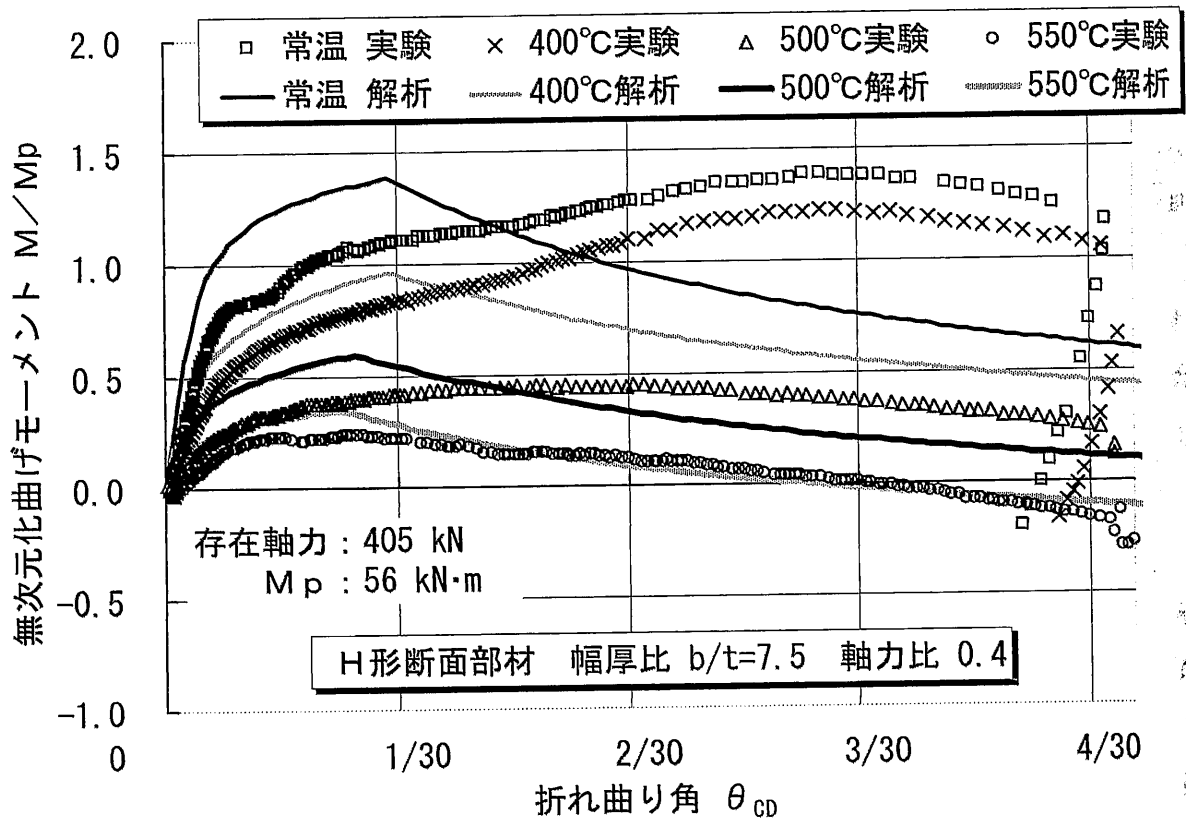
(a) 幅厚比  $b/t=7.5$  (H-135×135×6×9), 軸力比 0.3



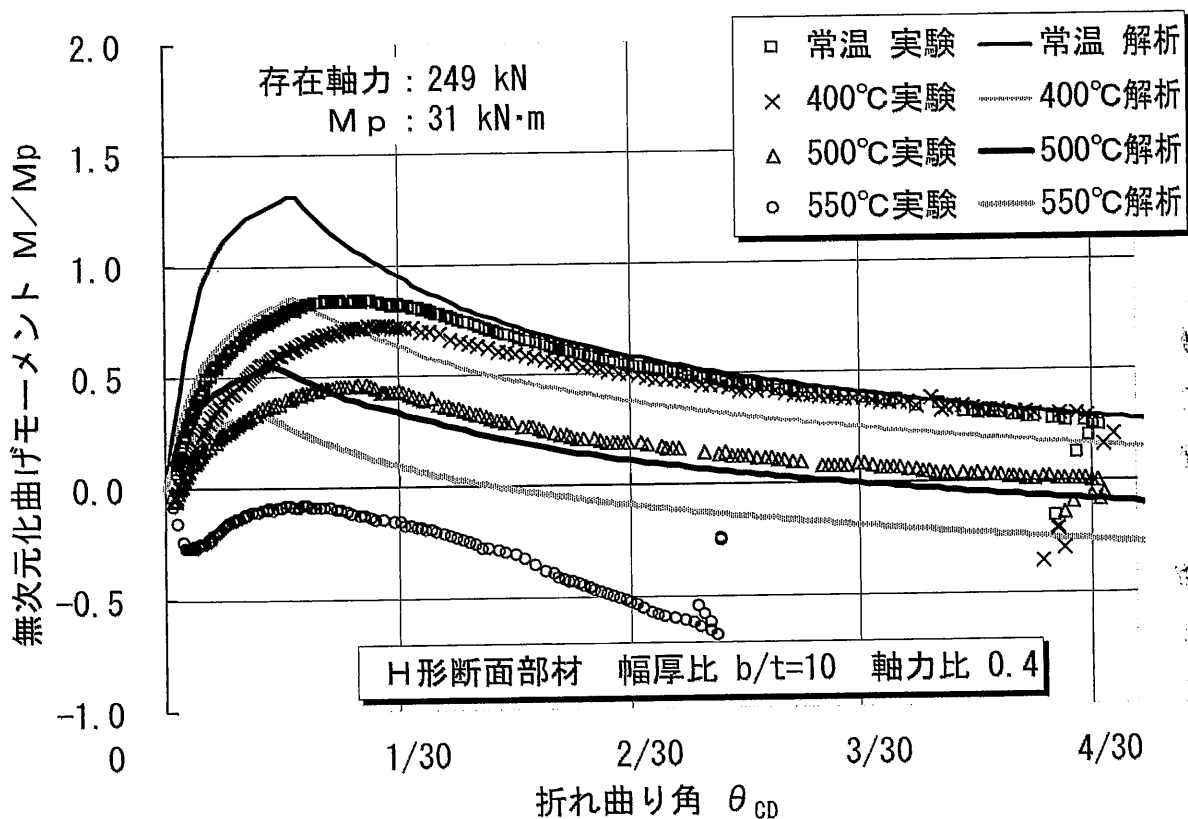
(b) 幅厚比  $b/t=10$  (H-120×120×4.5×6), 軸力比 0.3

図 5.17 H形断面部材における実験結果と解析結果の比較



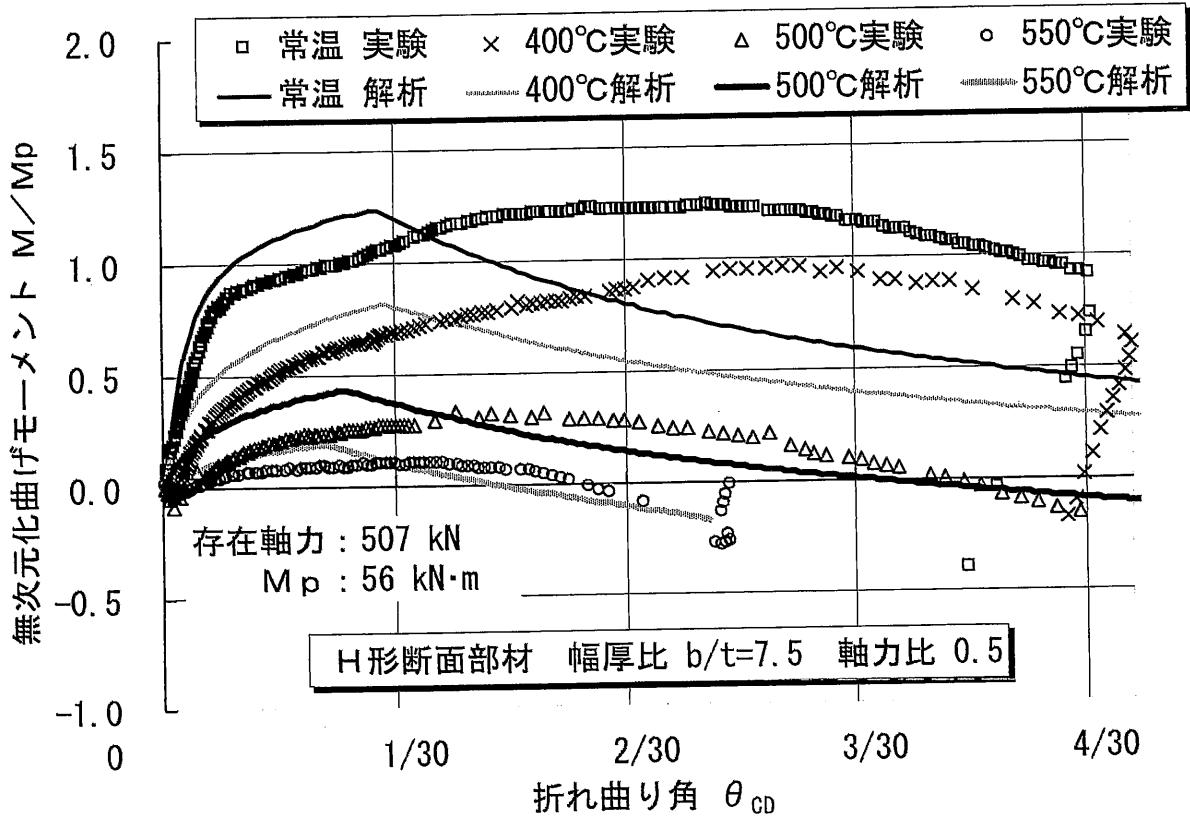


(c) 幅厚比  $b/t=7.5$  (H-135×135×6×9), 軸力比 0.4

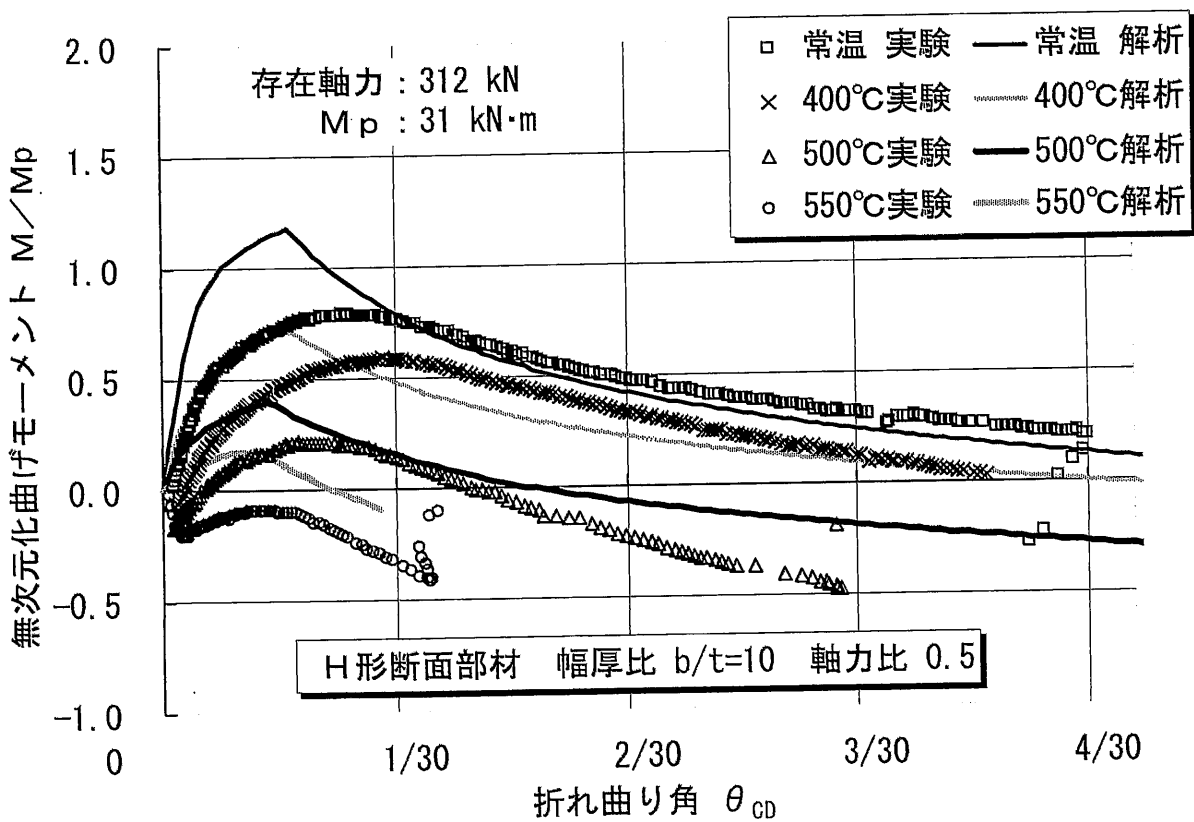


(d) 幅厚比  $b/t=10$  (H-120×120×4.5×6), 軸力比 0.4

図 5.17 H形断面部材における実験結果と解析結果の比較

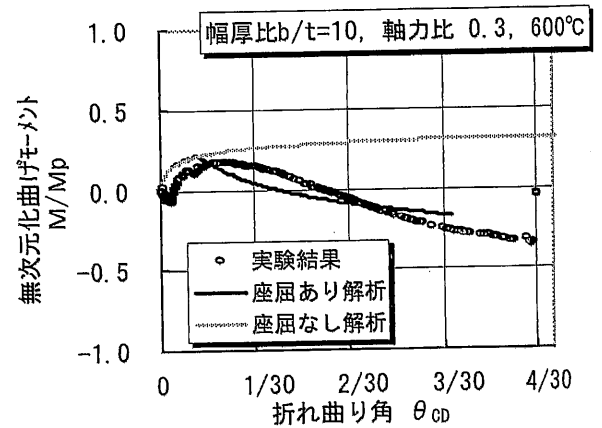
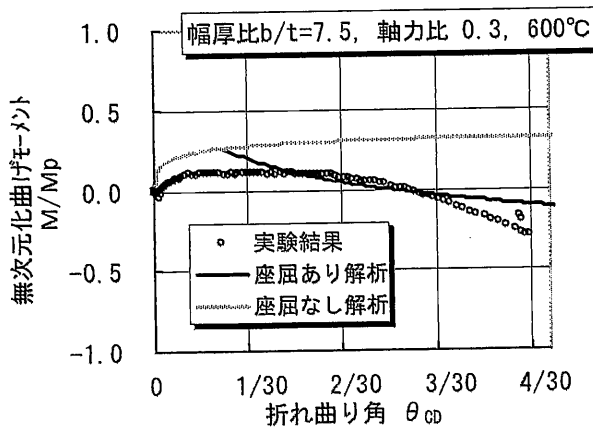
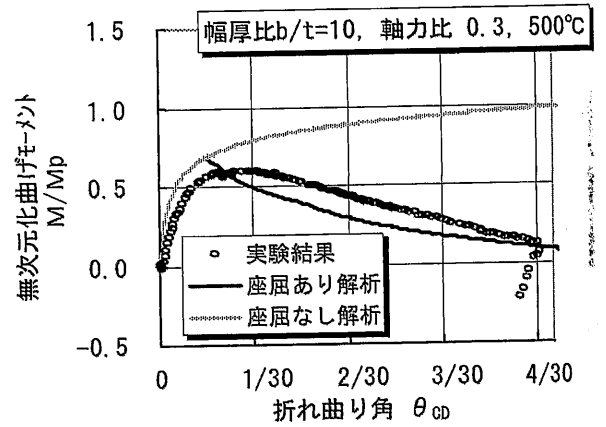
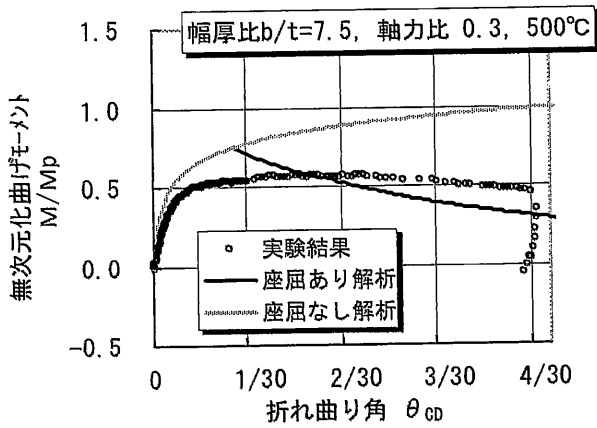
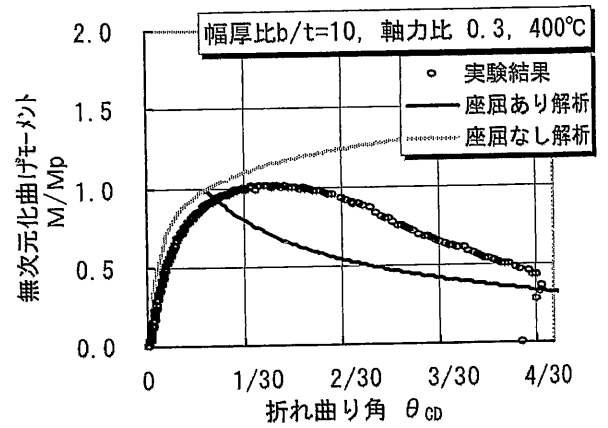
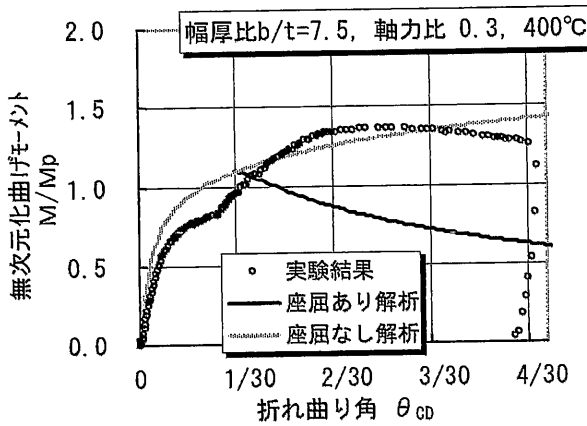
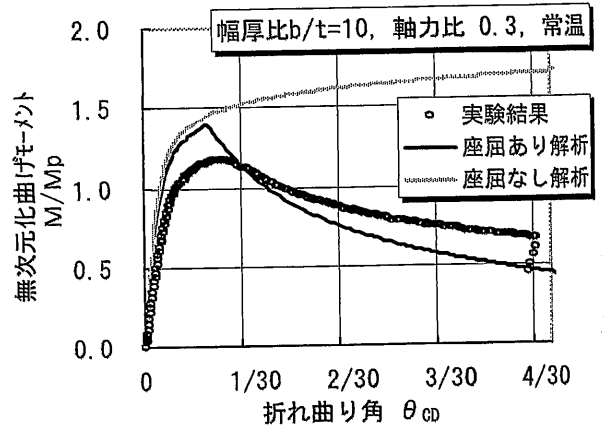
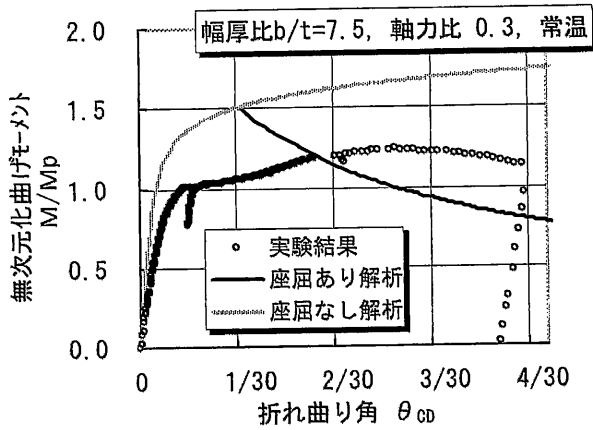


(e) 幅厚比  $b/t=7.5$  (H-135×135×6×9), 軸力比 0.5



(f) 幅厚比  $b/t=10$  (H-120×120×4.5×6), 軸力比 0.5

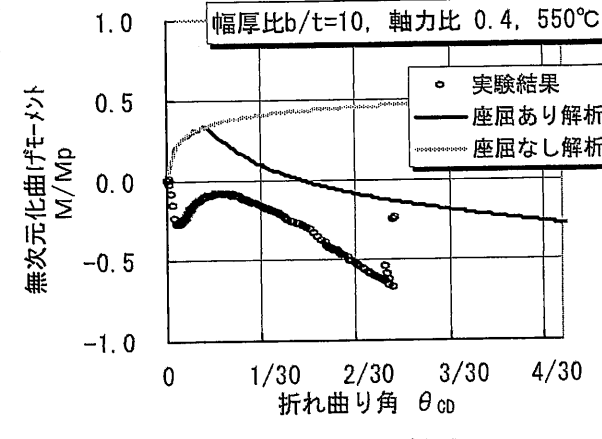
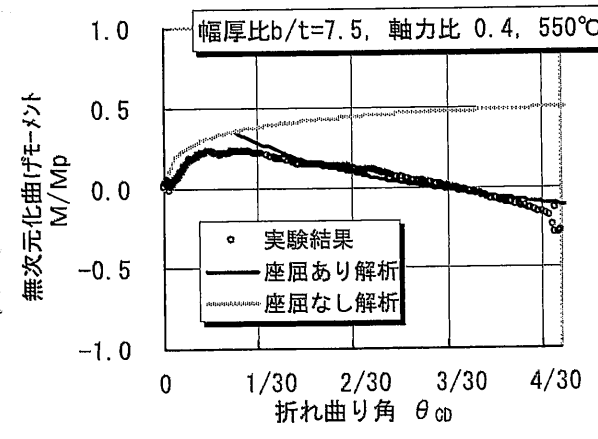
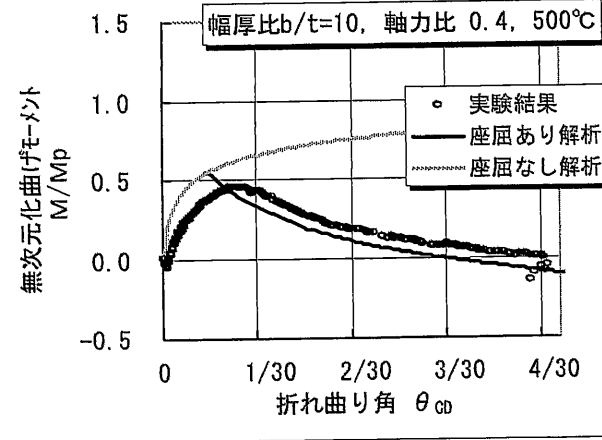
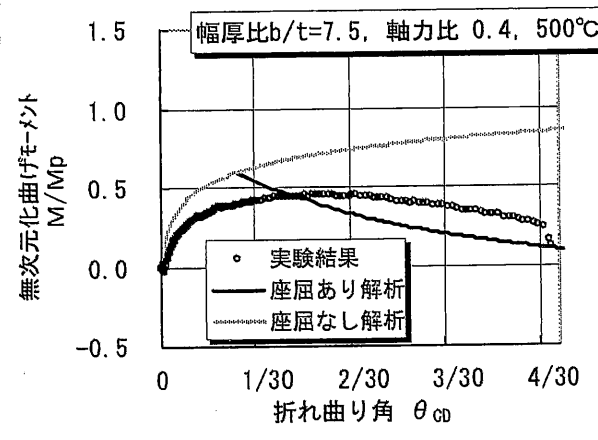
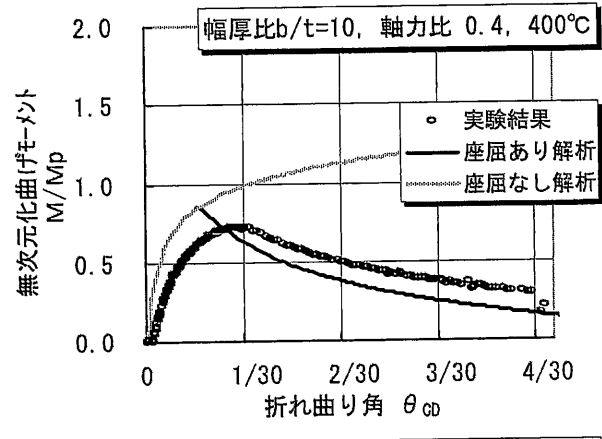
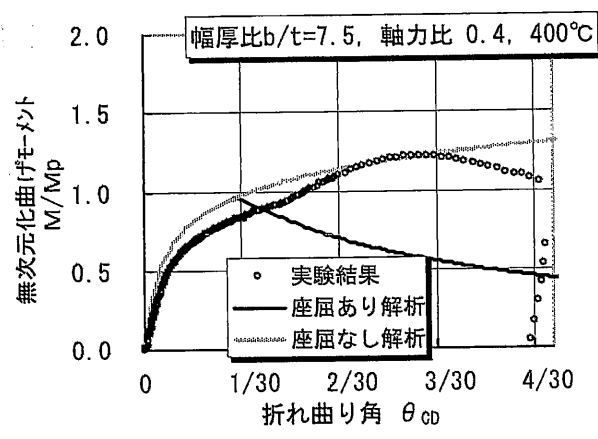
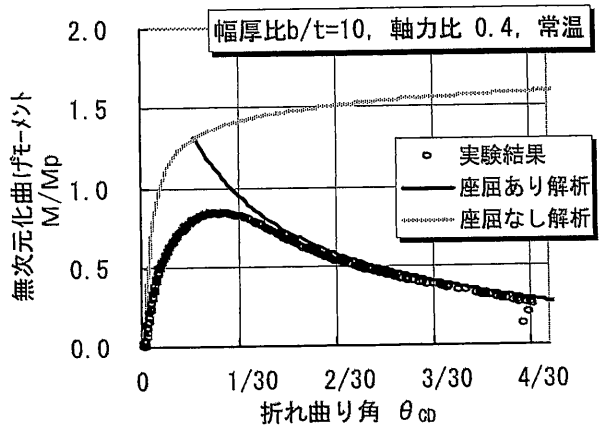
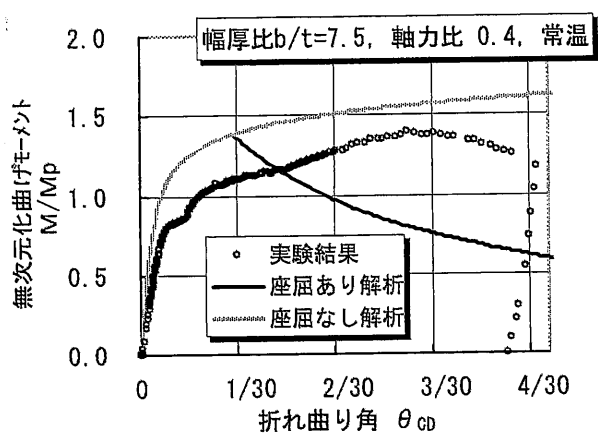
図 5.17 H形断面部材における実験結果と解析結果の比較



(a) 幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.3

(b) 幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.3

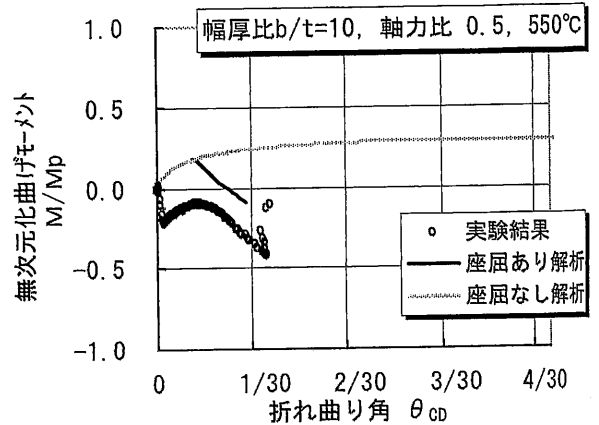
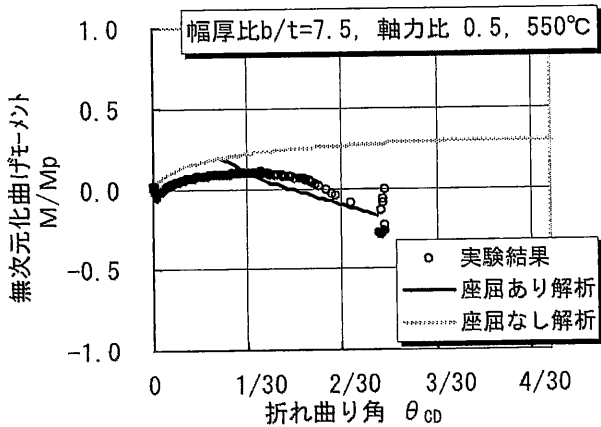
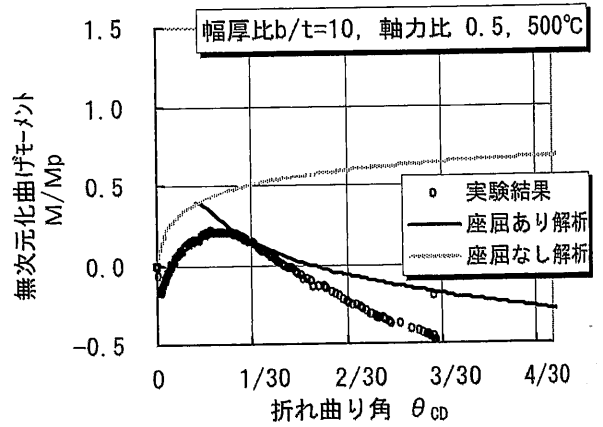
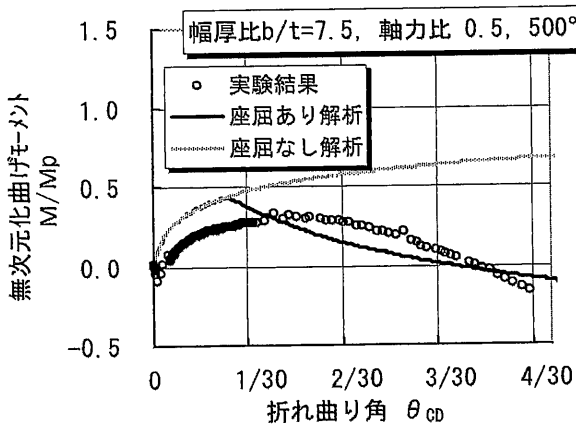
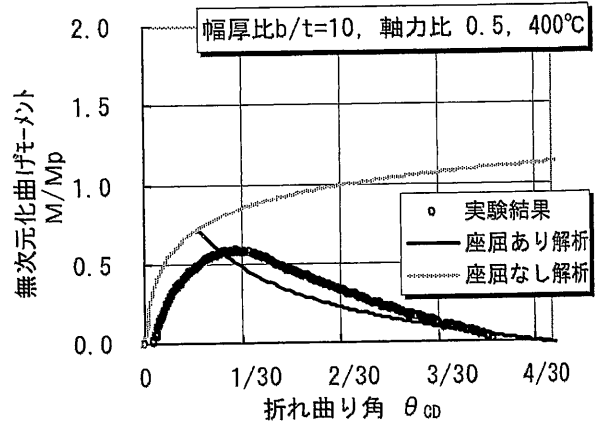
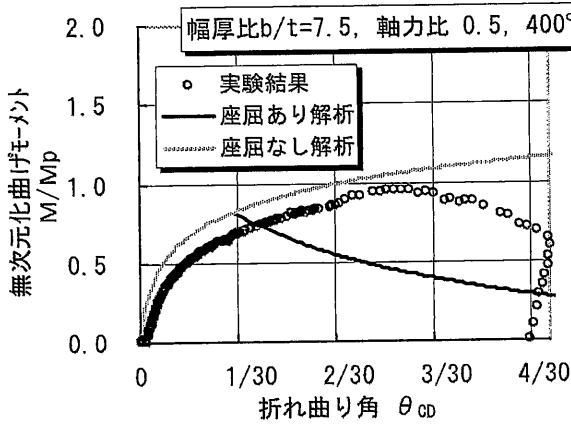
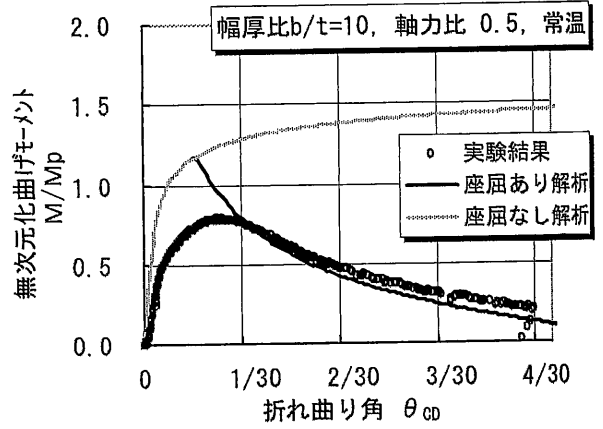
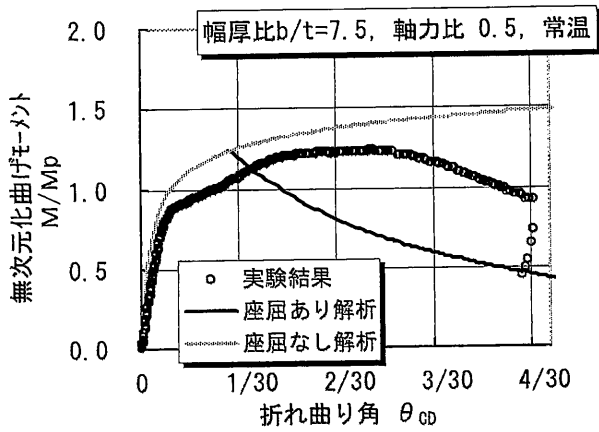
図 5.18 H形断面材における実験結果と解析結果の比較



(c) 幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.4

(d) 幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.4

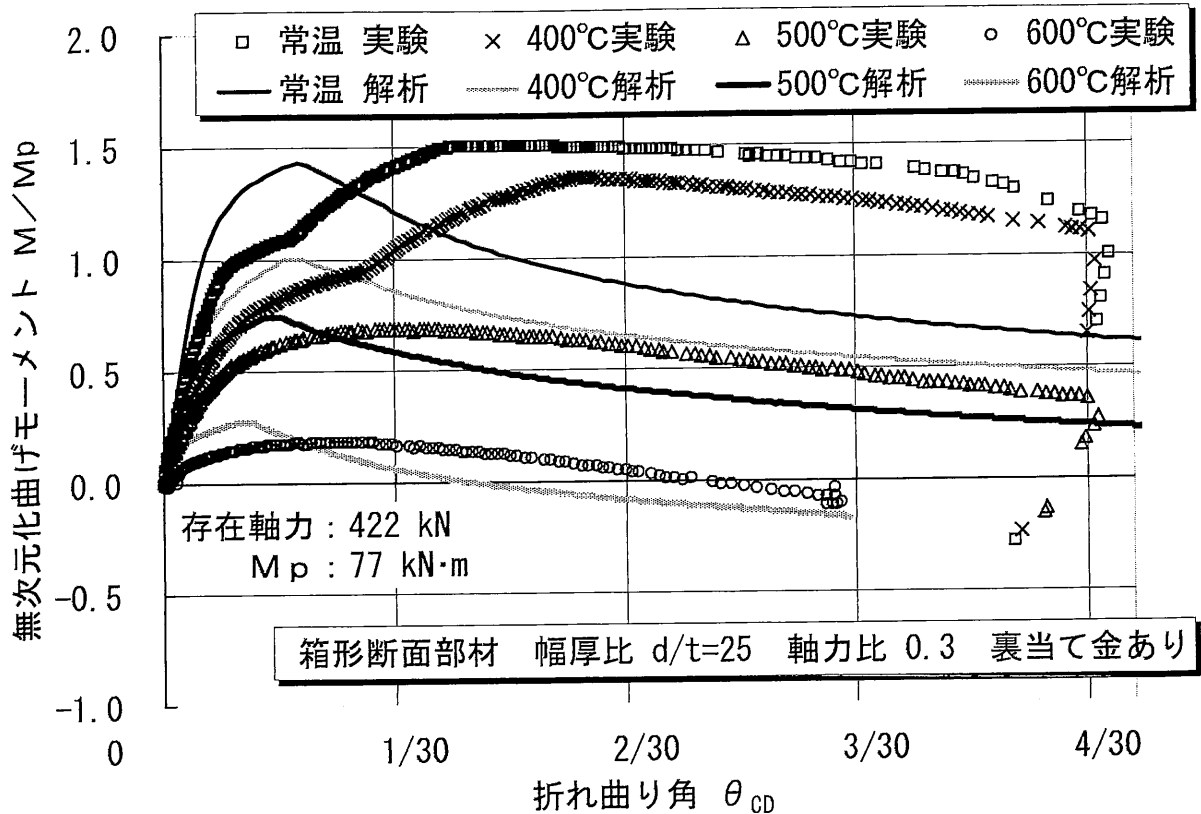
図 5.18 H形断面部材における実験結果と解析結果の比較



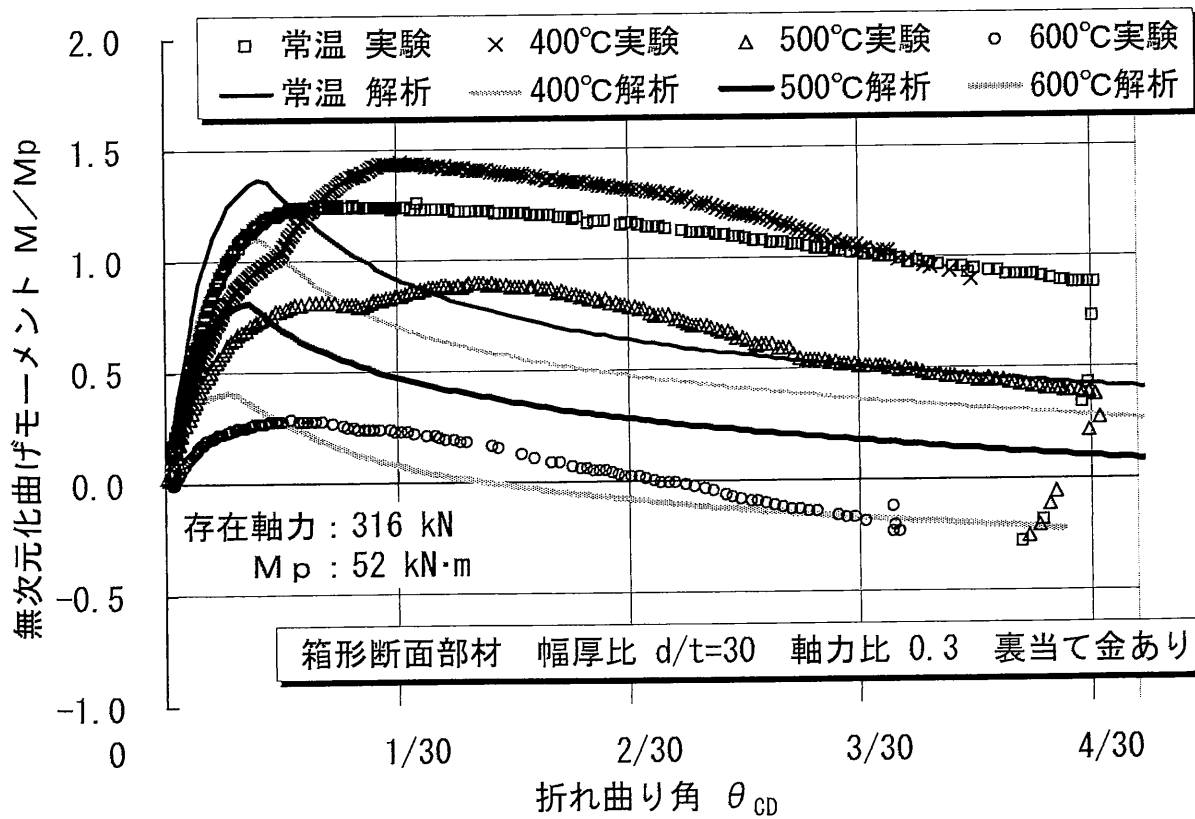
(e) 幅厚比  $b/t=7.5$ , 軸力比 0.5

(f) 幅厚比  $b/t=10$ , 軸力比 0.5

図 5.18 H形断面材における実験結果と解析結果の比較

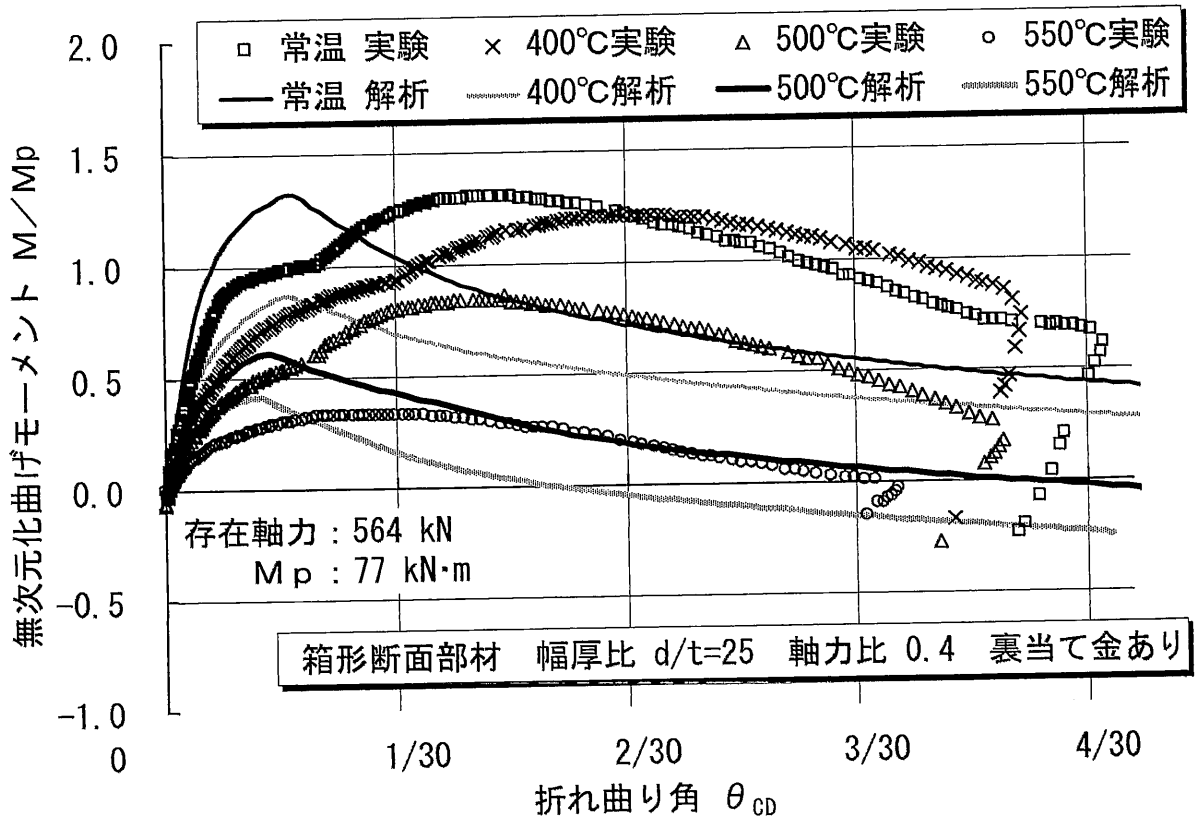


(a) 幅厚比  $d/t=25$  ( $\square$ -150×150×6), 軸力比 0.3

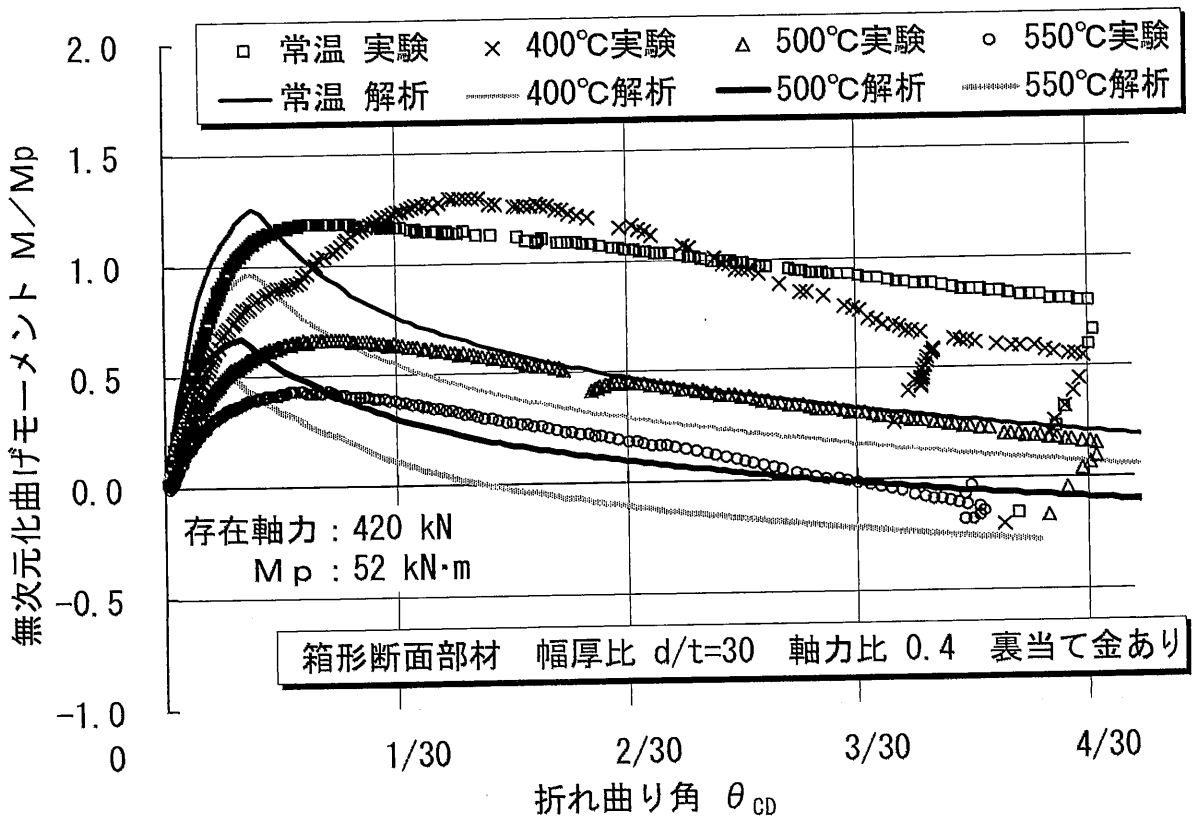


(b) 幅厚比  $d/t=30$  ( $\square$ -135×135×4.5), 軸力比 0.3

図 5.19 箱形断面部材における実験結果と解析結果の比較 (裏当て金あり)

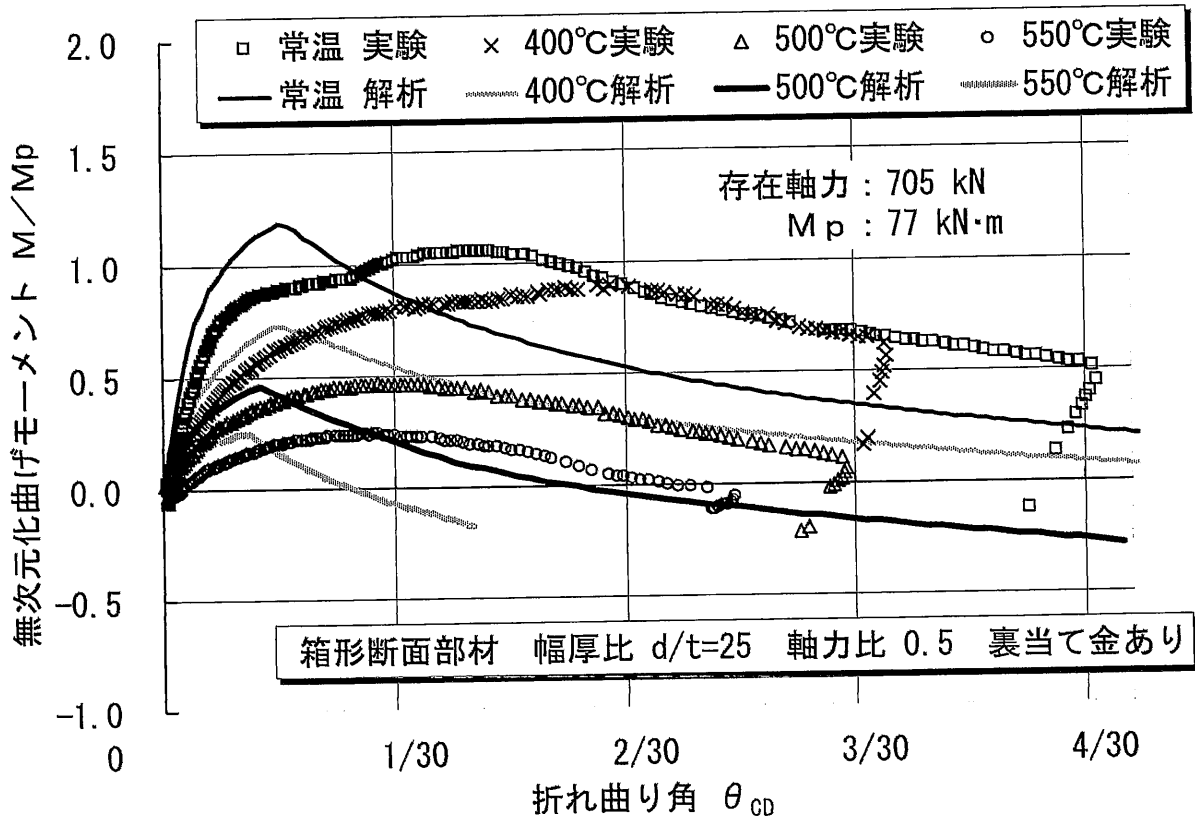


(c) 幅厚比  $d/t=25$  (□-150×150×6), 軸力比 0.4

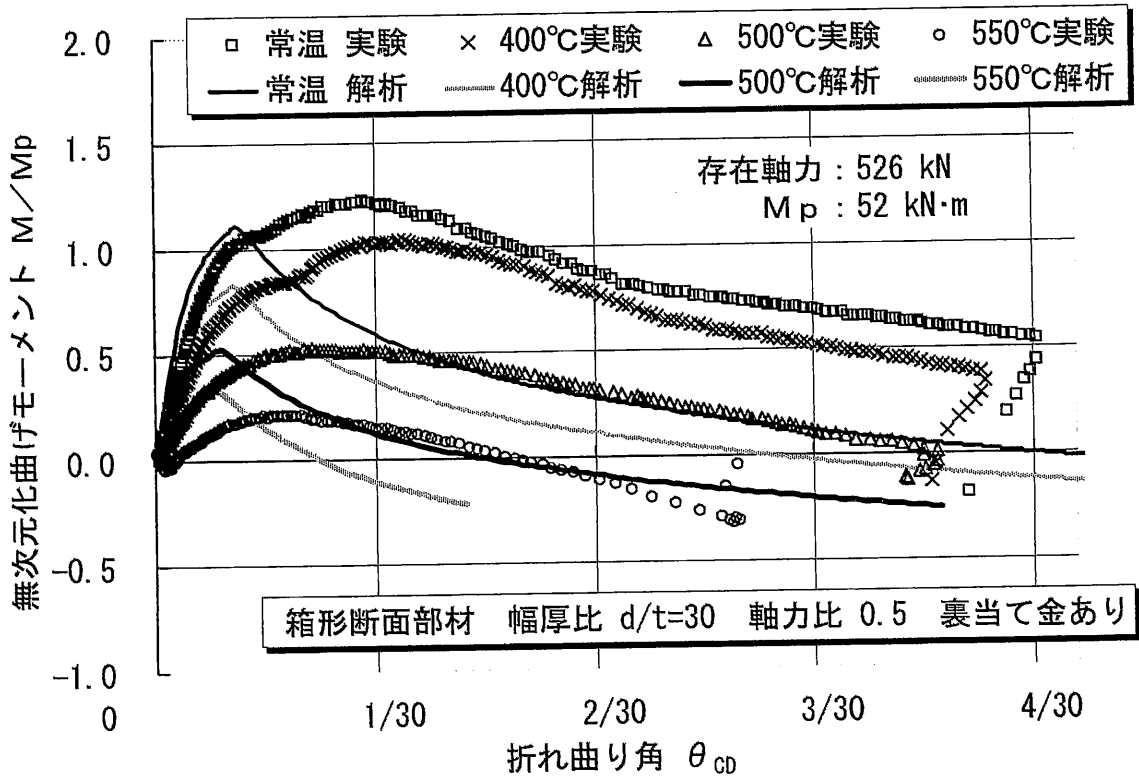


(d) 幅厚比  $d/t=30$  (□-135×135×4.5), 軸力比 0.4

図 5.19 箱形断面部材における実験結果と解析結果の比較 (裏当て金あり)



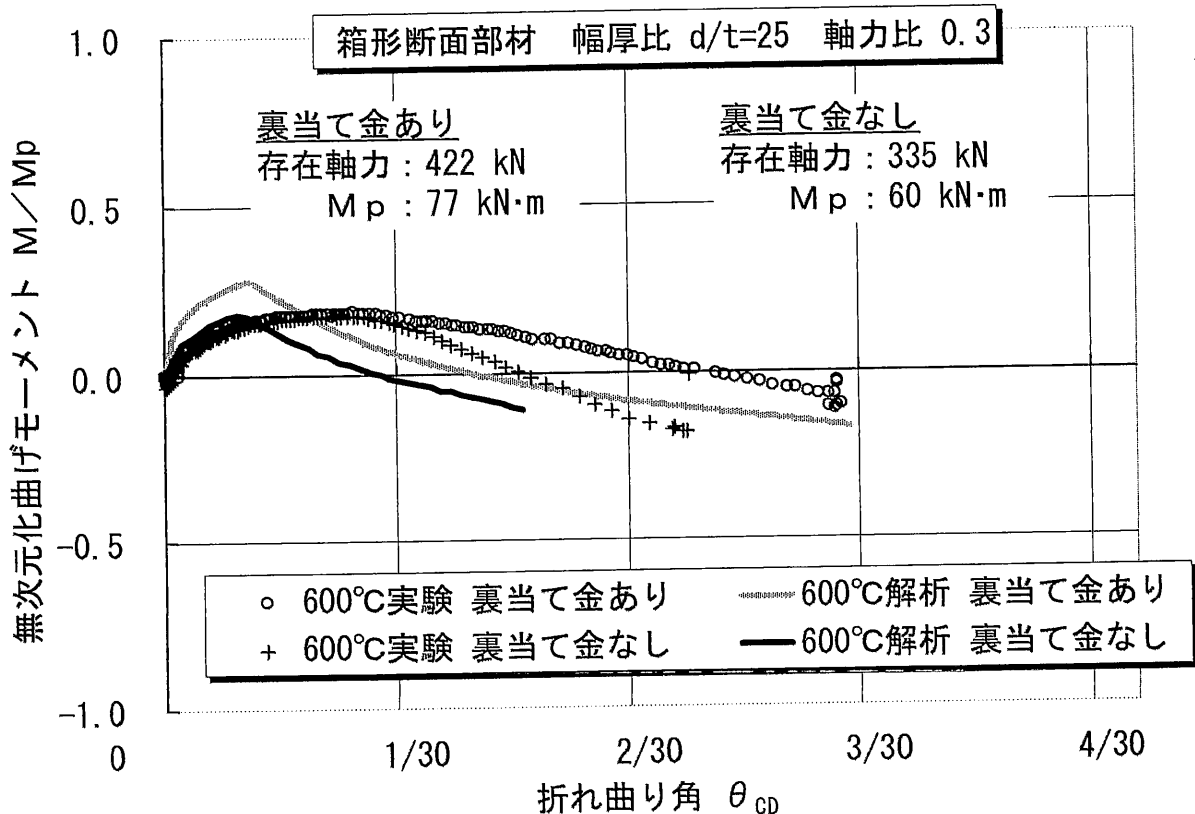
(e) 幅厚比  $d/t=25$  (□-150×150×6), 軸力比 0.5



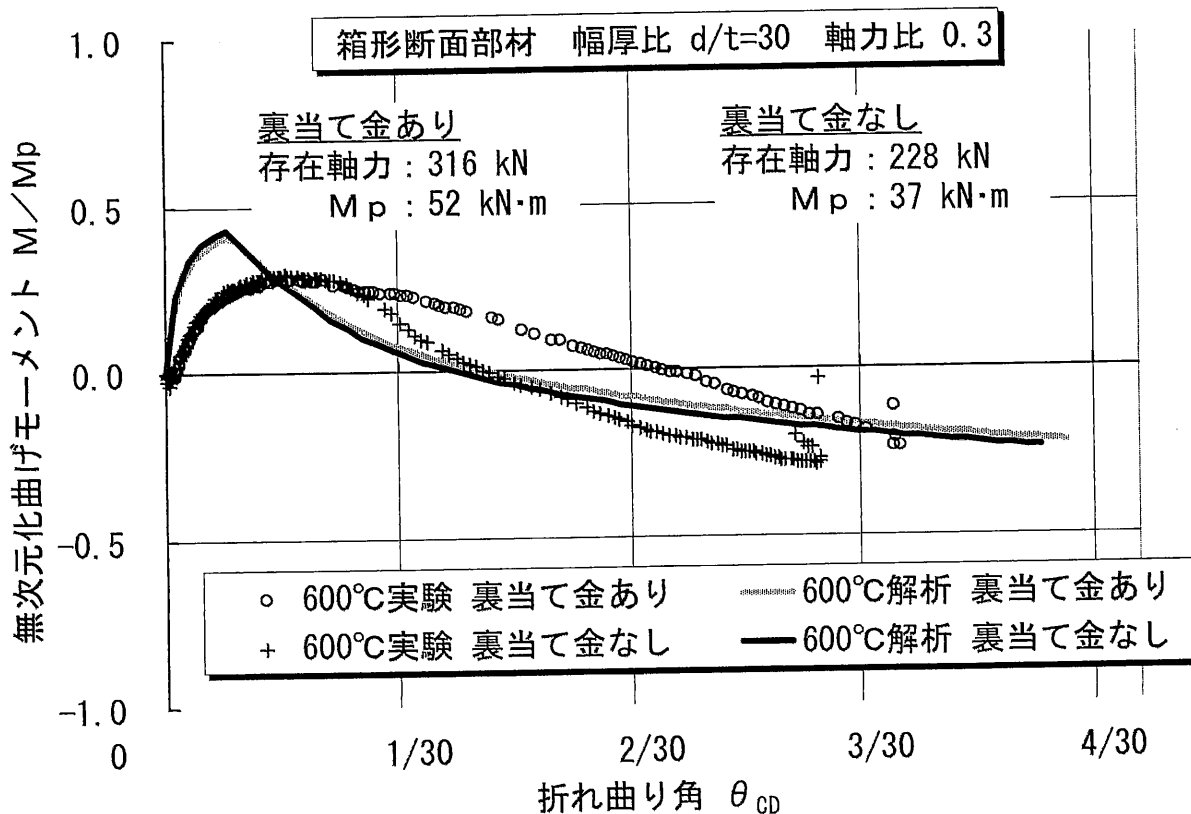
(f) 幅厚比  $d/t=30$  (□-135×135×4.5), 軸力比 0.5

図 5.19 箱形断面部材における実験結果と解析結果の比較 (裏当て金あり)



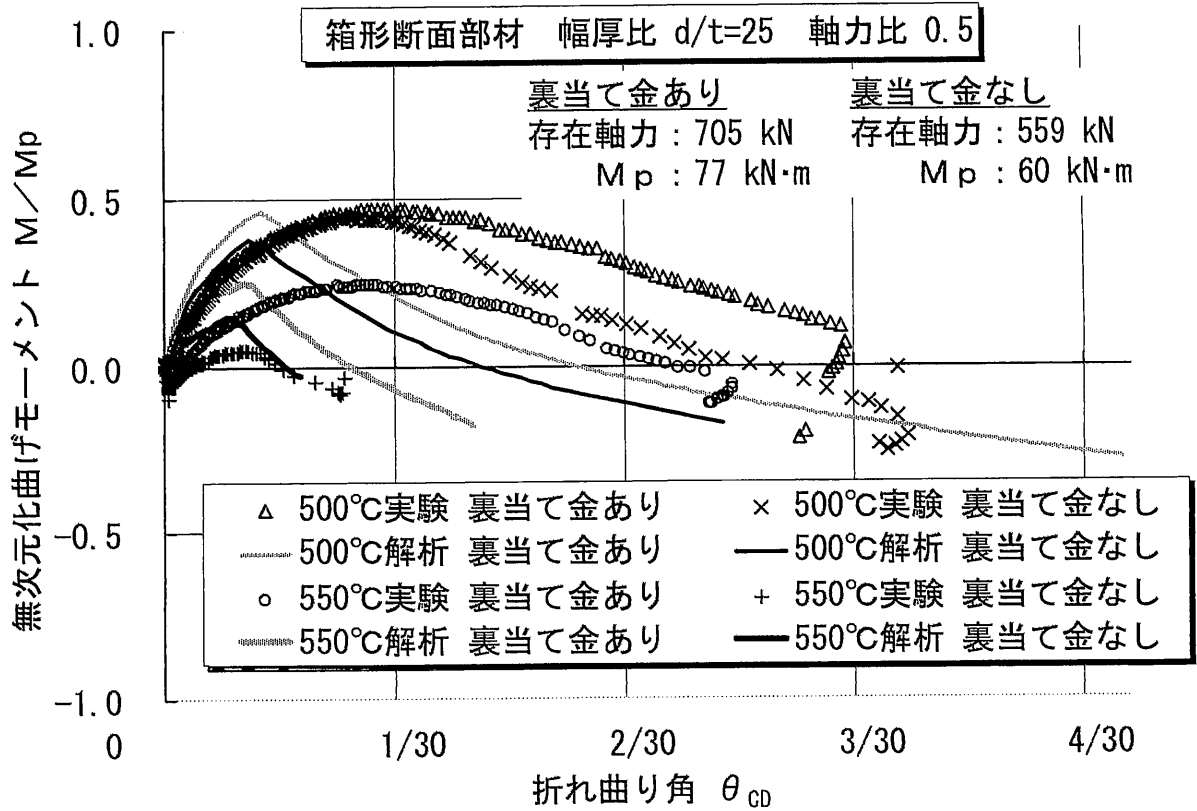


(a) 幅厚比  $d/t=25$  (□-150×150×6), 軸力比 0.3

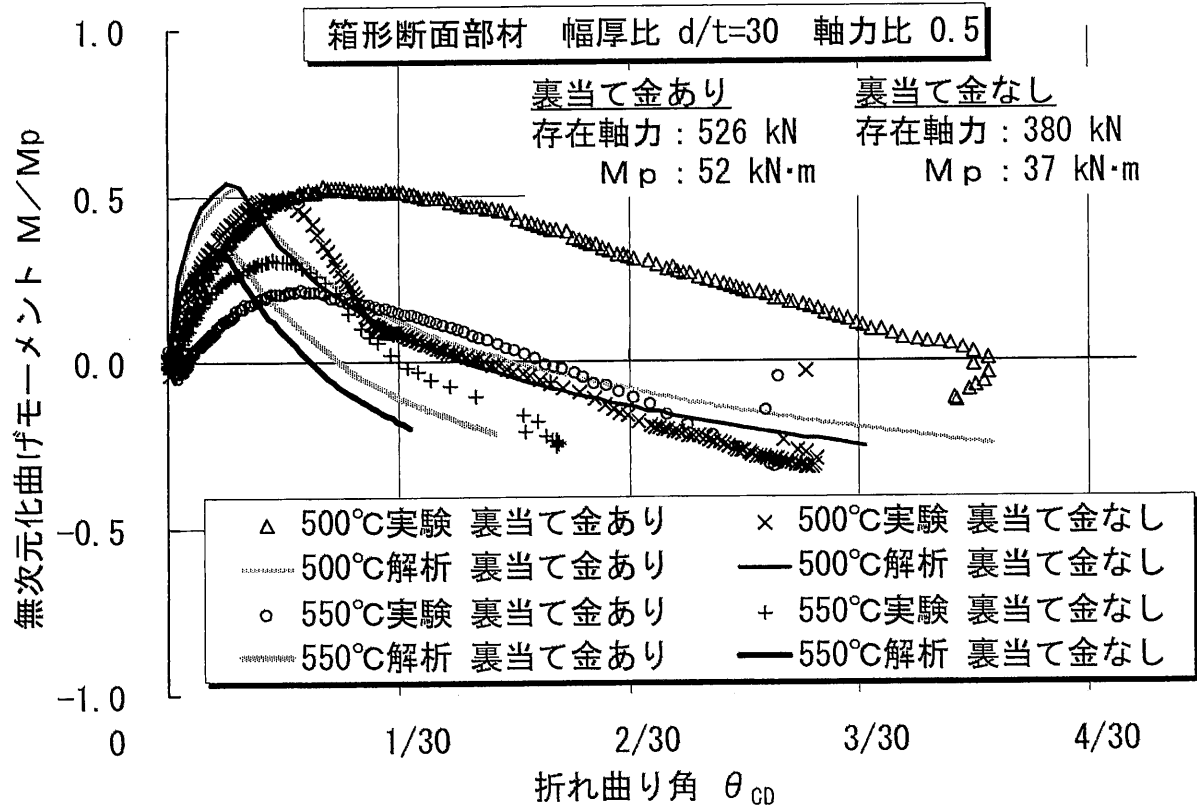


(b) 幅厚比  $d/t=30$  (□-135×135×4.5), 軸力比 0.3

図 5.20 箱形断面部材における実験結果と解析結果の比較 (裏当て金なし)

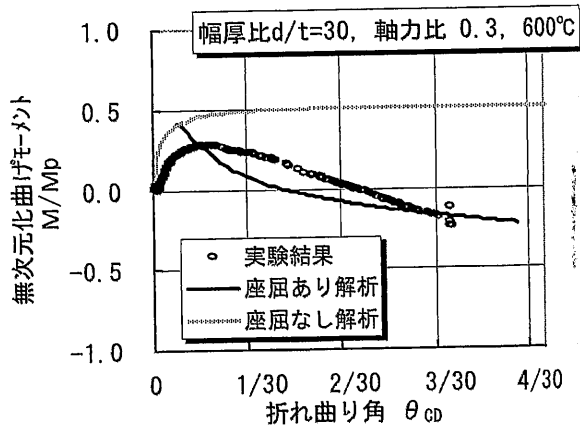
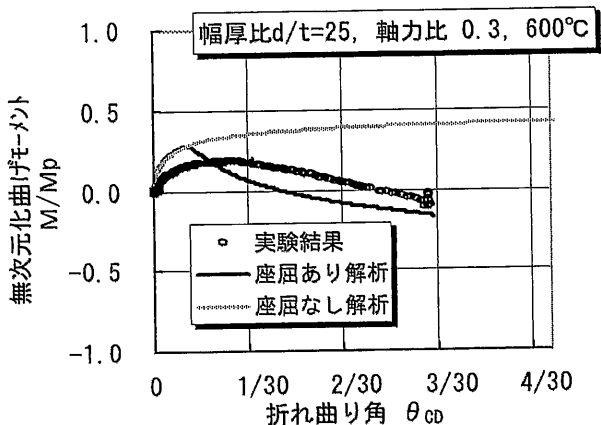
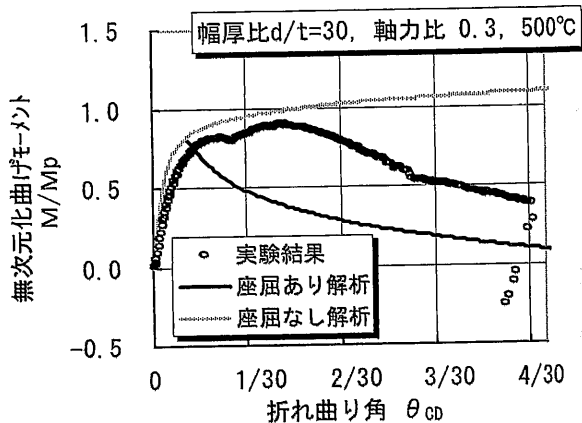
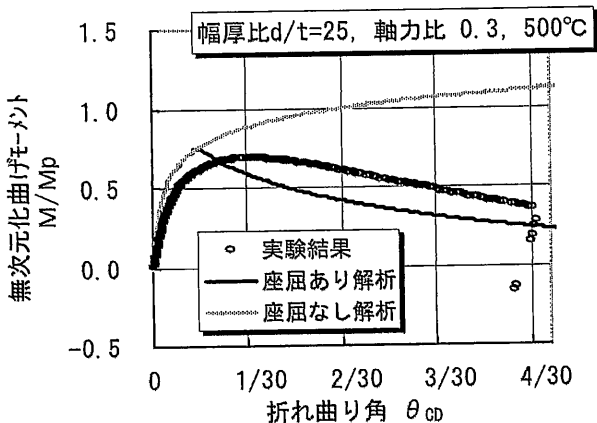
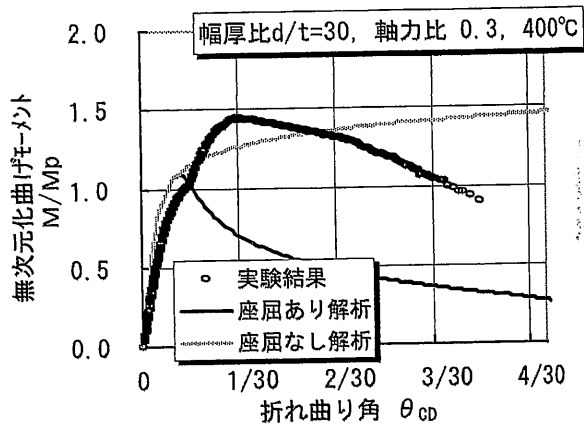
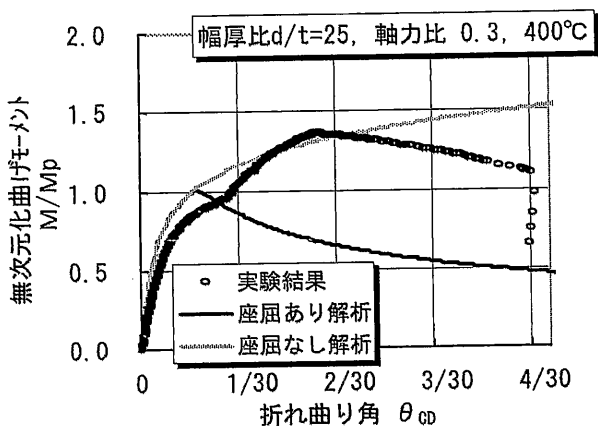
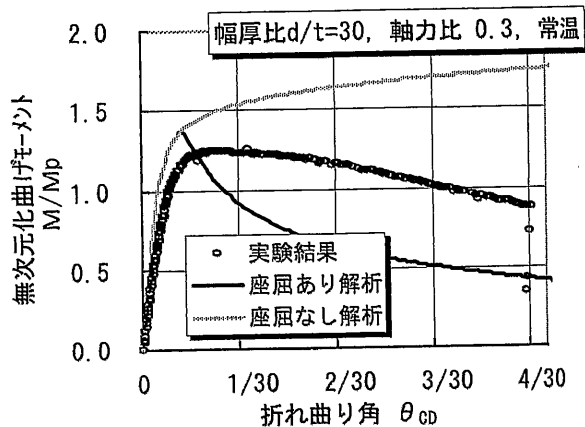
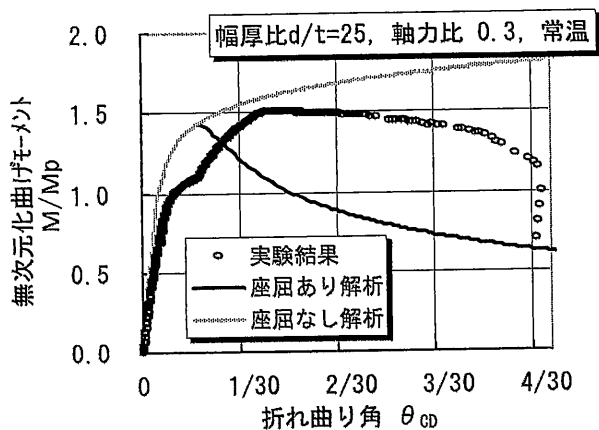


(c) 幅厚比  $d/t=25$  (□・150×150×6), 軸力比 0.5



(d) 幅厚比  $d/t=30$  (□・135×135×4.5), 軸力比 0.5

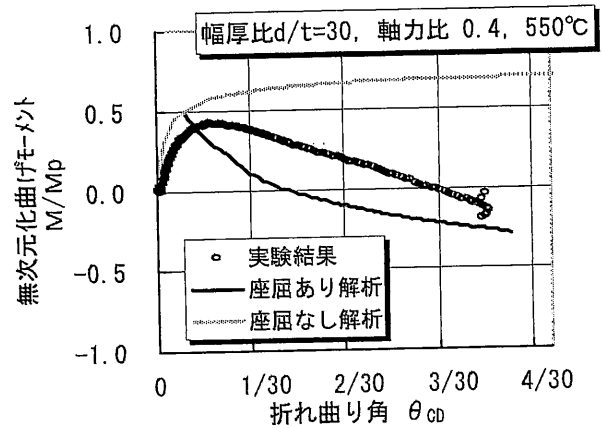
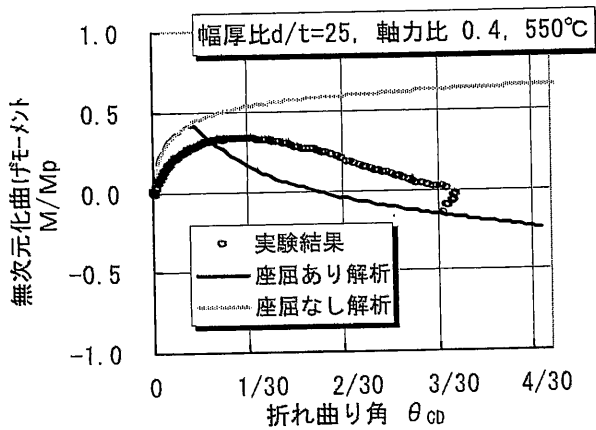
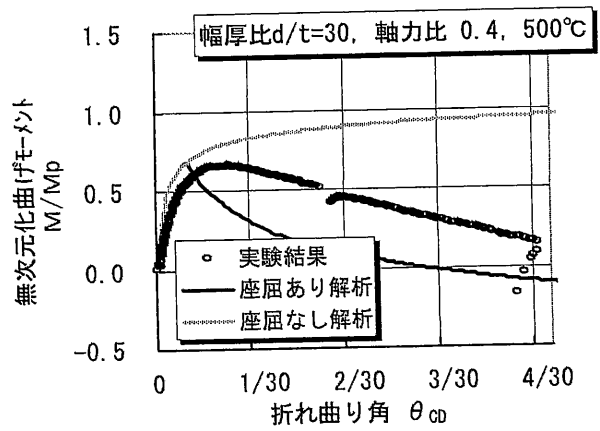
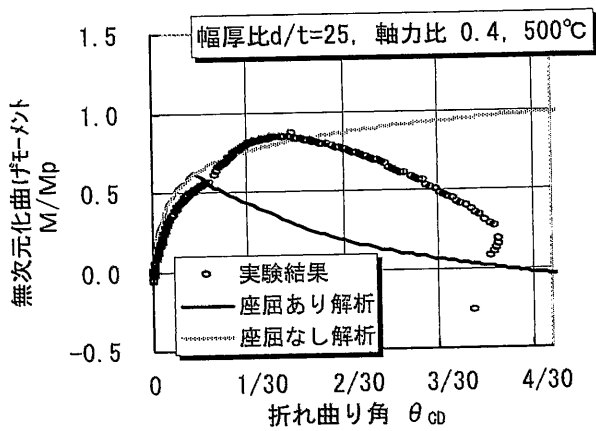
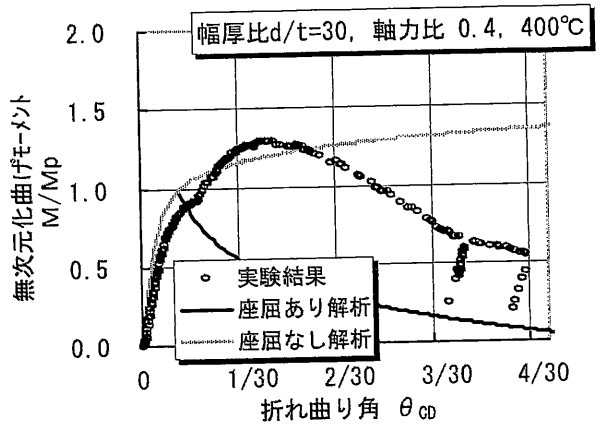
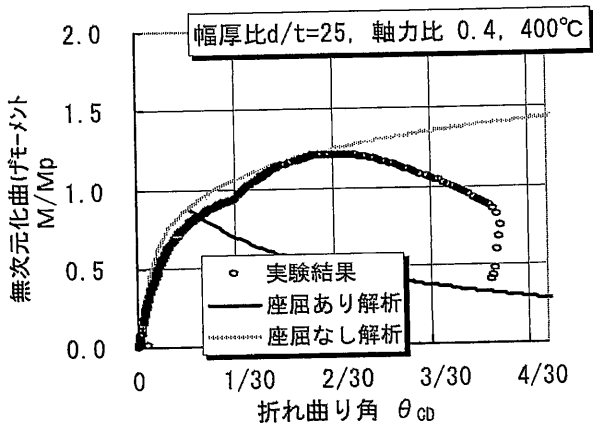
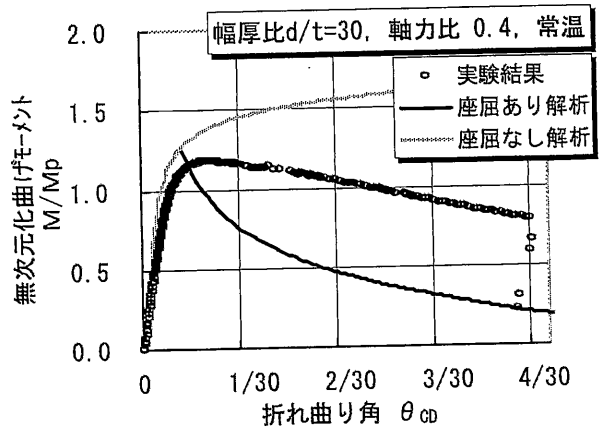
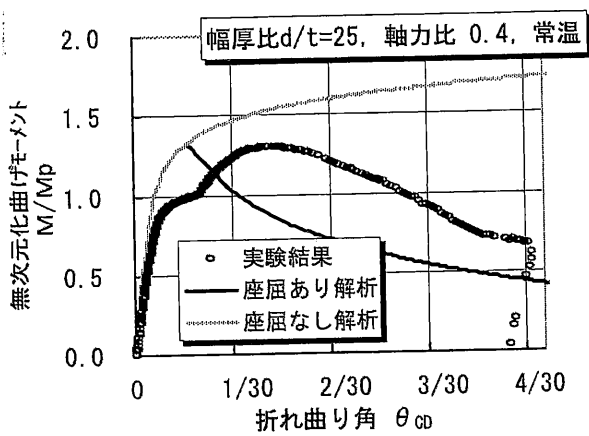
図 5.20 箱形断面部材における実験結果と解析結果の比較 (裏当て金なし)



(a) 幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3

(b) 幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.3

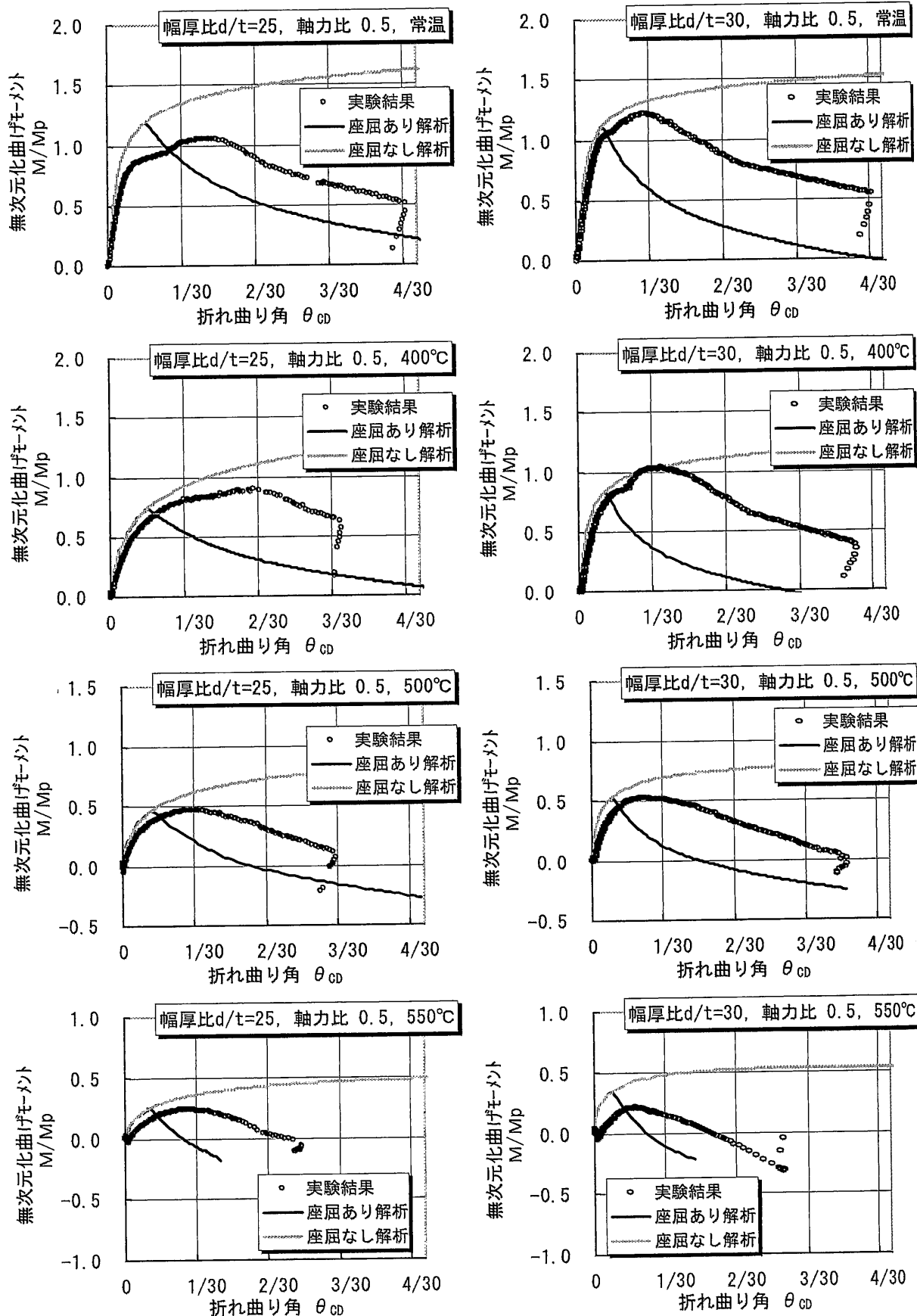
図 5.21 箱形断面部材における実験結果と解析結果の比較 (裏当て金あり)



(c) 幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.4

(d) 幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.4

図 5.21 箱形断面部材における実験結果と解析結果の比較 (裏当て金あり)



(e) 幅厚比  $d/t=25$ , 軸力比 0.3

(f) 幅厚比  $d/t=30$ , 軸力比 0.3

図 5.21 箱形断面部材における実験結果と解析結果の比較 (裏当て金あり)

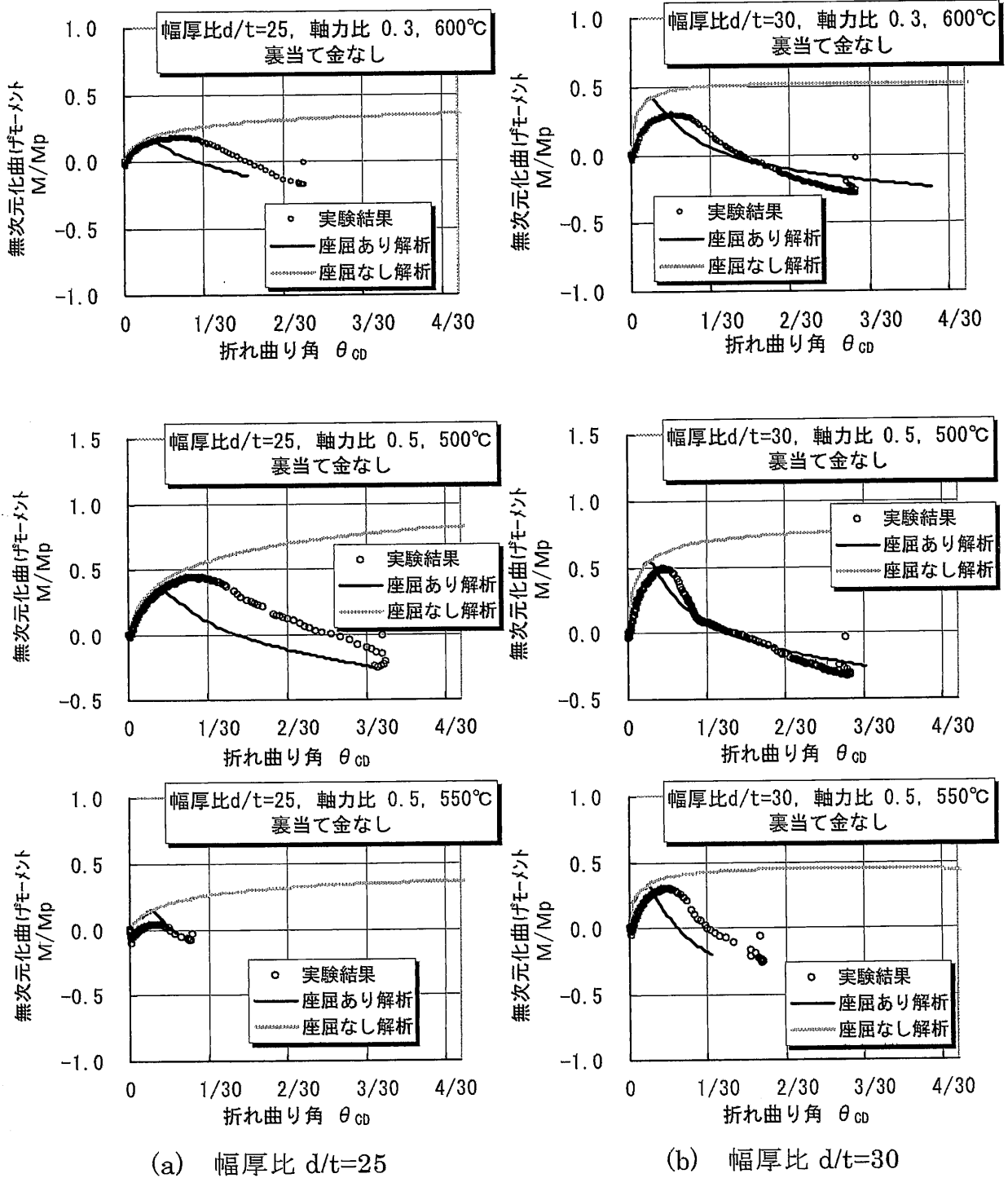


図 5.22 箱形断面部材における実験結果と解析結果の比較 (裏当て金なし)

## 5.4 結語

一般鋼による幅厚比  $b/t=7.5$  と幅厚比  $b/t=10$  のH形断面部材および幅厚比  $d/t=25$  と幅厚比  $d/t=30$  の箱形断面部材を用いて曲げ圧縮実験を行ない、常温・ $400^{\circ}\text{C}$ ・ $500^{\circ}\text{C}$ ・ $550^{\circ}\text{C}$ ・ $600^{\circ}\text{C}$ における曲げ圧縮変形性状を明らかにし、火災時における鋼梁の伸びだしを受ける鋼柱の荷重支持能力を確認した。

区画部材を支える構造部材における熱変形量の制限値は、区画部材の延焼拡大防止能力を損なわないことを前提として定められるべきである。しかし、我が国においては規定がない。ヨーロッパ鋼構造協会(ECCS)の耐火設計において推奨されている柱の水平変形許容値は、階高の  $1/30$  である。本研究では、ECCSで推奨されている構造部材における変形量の許容値を採用した。この変形量は、区画部材の延焼拡大防止能力を維持するための目安である。曲げ圧縮実験では、柱の水平変形許容値（階高の  $1/30$ ）を超える変形をH形断面部材および箱形断面部材に与えて、所定の存在軸力を維持できるか確認した。柱の水平変形許容値（階高の  $1/30$ ）に達するまで所定の存在軸力を維持した鋼柱を荷重支持能力ありと見なすと、軸力比および鋼材温度を要因とする鋼柱の荷重支持能力は以下のようなになった。

【一般鋼を用いた幅厚比  $b/t=10$  以下のH形断面部材】

- 軸力比  $0.3$  以下の柱については、鋼材温度  $600^{\circ}\text{C}$  まで荷重支持能力を有する。
- 軸力比  $0.3\sim 0.4$  の柱については、鋼材温度  $550^{\circ}\text{C}$  まで荷重支持能力を有する。
- 軸力比  $0.4\sim 0.5$  の柱については、鋼材温度  $500^{\circ}\text{C}$  まで荷重支持能力を有する。

【一般鋼を用いた幅厚比  $d/t=30$  以下の箱形断面部材】

- 軸力比  $0.3$  以下の柱については、鋼材温度  $600^{\circ}\text{C}$  まで荷重支持能力を有する。
- 軸力比  $0.3\sim 0.5$  の柱については、鋼材温度  $500^{\circ}\text{C}$  まで荷重支持能力を有する。

これより、数値解析に基づく耐火設計の力学性状予測において、鋼柱に生じる水平変形量が柱の水平変形許容値（階高の  $1/30$ ）を超えないことを確認し、軸力比に応じて鋼材温度を制限すれば、局部座屈の影響により外柱が軸力を支えられなくなる事態を回避できるようになった。

短柱圧縮実験より得た局部座屈後の応力-ひずみ曲線を用いた数値解析結果は、局部座屈を考慮しない数値解析結果に比較して、曲げ圧縮実験の結果と対応していた。これより、数値解析に基づく耐火設計の力学性状予測に局部座屈を考慮した応力-ひずみ曲線を用いれば、局部座屈を考慮しない従来の数値解析

に比べて、加熱梁の伸びだしにより大きく折れ曲る外柱柱頭の曲げ圧縮変形性状を定性的に追跡できることが示された。



## 第5章の参考文献

- 1) Uesugi,H., Saito,H. and Kodaira,A. : "Fire Resistance of Steel Structures of High Rise Buildings Exposed to Compartment Fire", Proceedings of the Third Pacific Structural Steel Conference, pp.329-336, 1992.10
- 2) 若松孝旺 : 「耐火被覆と耐火設計」, 建築技術, No.212, 1969年4月
- 3) 高野孝次 : 「鉄骨柱の耐火試験」, 建築技術, No.215, 1969年7月
- 4) 茂木武, 遊佐秀逸, 西田一郎, 岡村義徳, 仲谷一郎 : 「実大鉄骨柱の高温座屈耐力に関する実験的研究」, 日本建築学会構造系論文集 第538号, pp.187-194, 2000年12月
- 5) 染谷朝幸, 窪田伸, 作本好文, 上杉英樹, 齋藤光 : 「耐火鋼を用いたH形・箱形断面柱の高温時耐力」, 構造工学論文集 Vol.39B, pp.393-404, 1993年3月
- 6) 上杉英樹, 鈴木隆生, 平島岳夫, 倉本真介, 齋藤光 : 「耐火鋼を用いた角形・H形断面柱の耐火性」, 構造工学論文集 Vol.42B, pp.407-414, 1996年3月
- 7) 作本好文 : 「鉄骨造の耐火設計法と実施例(1)~(7)」, 鉄鋼技術(STRUCTEC), 1995年3月~1995年10月
- 8) 木村衡, 大田秀彦, 金子洋文, 古平章夫 : 「複合荷重を受ける充填型鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する実験的研究」, 日本建築学会構造系論文集 第417号, pp.63-70, 1990年11月
- 9) 齋藤秀人, 齋藤光 : 「充填鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する実験的研究 - 梁の伸びだしによる横力を受ける場合について -」, 日本建築学会構造系論文集 第458号, pp.163-169, 1994年4月
- 10) 湯谷孝夫, 松谷輝雄, 小野徹郎, 中島將好, 上田弘樹, 中里卓三, 一戸康生 : 「耐火被覆の無い充填型鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する研究 (その1~その4)」, 日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集 A-2, pp.37-44, 1996年9月
- 11) 新都市ハウジング協会 : 「建設大臣認定 CFT 構造技術指針・同解説 - 構造設計 耐火設計 施工 -」, 1997年1月
- 12) 大内富夫, 湯谷孝夫, 西垣太郎, 丹羽博則, 宮本圭一, 齋藤秀人, 谷田貝健, 高橋済 : 「建築構造物の長期設計荷重時応力 (その1~その3)」, 日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集 A-2, pp.165-170, 1997年9月

- 13) 上杉英樹, 平島岳夫, 染谷朝幸, 倉本真介, 齋藤光: 「火災加熱を受ける高層鉄骨架構の局部座屈を考慮した応力変形解析」, 構造工学論文集 Vol.41B, pp.587-594, 1995年3月
- 14) Design Manual on the European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structure, ECCS-Technical Committee3 Fire Safety of Steel Structure, 1985
- 15) 上杉英樹, 小池浩: 「高層鉄骨架構の熱応力解析 (その 1) 区画火災を受ける超高層鉄骨架構の熱応力解析手法」, 日本建築学会構造系論文報告集 第381号, pp.73-80, 1987年11月
- 16) Becker, J., Bresler, B., "FIRES-RC A Computer Program for the Fire Response of Structure - Reinforced Concrete Frames", Report No.UCB FRG 74-3, University of California Berkley, July, 1974

