

第6章 耐火設計への適用

6.1 概要	243
6.2 鋼構造骨組の熱応力変形解析	244
6.2.1 設計例および解析条件	244
6.2.2 解析結果	249
6.3 耐火性の決定	257
6.4 結語	260
第6章の参考文献	261

6.1 概要

建物に耐火性を持たせる基本方策は、防火区画により火を封じ込めて、火災の延焼拡大を防止することである。火災の延焼拡大を防止するために、構造部材には、火災時に破壊することなく、区画部材に隙間を生じさせない構造安定性が求められる。この構造安定性を満足させるためには、火災時において構造部材に過大な変形が生じないような設計が求められる。

数値解析に基づく耐火設計は、建物の開口条件や燃種^{もえぐさ}などに応じて火災性状を予測し、その火災に対する鋼構造骨組の熱変形挙動を追跡し、耐火性を決定する方法である¹⁾。ただし、文献¹⁾では、耐火性の決定方法について具体的な評価基準が示されていない。例えば、「柱・梁の構造安定性に対する評価基準」の記述を抜粋すると、「火災時の各部材の応力度が、原則としてその許容応力度以下であること。ただし、当該部材が支持する区画部材の延焼拡大防止の機能を損なわないことを条件に、塑性変形を許容する。」であり、構造部材に生じる変形量の許容値については示されていない。

よって、本研究においては、ヨーロッパ鋼構造協会連合 (ECCS) において推奨されている変形量の許容値²⁾を目安とした。ECCS 基準では、柱の水平変形量が柱長さの 1/30 まで許容され、梁中央部のたわみが梁長さの 2 乗を梁せい×800 で除した値まで許容されている。この変形許容値は地震時に生じる変形量をはるかに上回るものである。よって、構造部材に生じる変形を ECCS の変形許容値以内に制限すると同時に、局部座屈による不安定現象を考慮して、ECCS の変形許容値に達するまでの荷重支持能力を確認する必要がある。本研究はこの点を実験で確認したものであり、その結果を第 2 章～第 5 章において示した。

本章では、ECCS において推奨されている変形許容値²⁾と実験結果を組み合わせ、実存する鋼構造骨組における耐火性の検証を試みる。本実験の成果をどのように耐火設計に適用するか、具体的に示すことが目的である。

なお、最近では、日本建築学会より鋼構造耐火設計指針³⁾が示され、さらに、2002 年の建築基準法施行令の大幅改正において耐火性能検証法⁴⁾が示されている。これらの設計手法は、簡便であるという長所を持つ反面、鋼構造骨組の熱変形を考慮しない分だけ大きな安全率が負荷されていると思われる。本章に示す耐火設計は、鋼構造骨組の熱変形を考慮した設計手法である。

6.2 鋼構造骨組の熱応力変形解析

6.2.1 設計例および解析条件

設計例には、事務所を用途とする高層建物を選択した。図 6.1 に基準階の平面図を示す。図 6.2 に解析の対象となる架構骨組を示す。図 6.3 に局部架構における解析モデルを示す。本論で述べる局部架構とは、火災加熱の影響を大きく受けて、弾塑性解析を行なう部分である⁵⁾。

図 6.1 に示すように、本設計例は、中央コア部分の両側に事務室が配置されており、3つの防火区画によって構成されている。本設計例は、既に検討された高層鉄骨架構 48 棟⁶⁾の中で、外柱における軸力比が最も大きく、また鋼材温度 600℃までの解析において鋼梁のたわみが最も大きかった例である。

図 6.2 において火災発生階を 14 階としたのは、外柱における軸力比が大きい階を選択したためである。14 階(火災階)の柱・梁および 15 階(火災階上階)の柱を、弾塑性解析を行なう局部架構とした。

図 6.3 に示すように、14 階(火災階)における柱・梁を加熱部分とした。15 階(火災階上階)は非加熱部分であるが、柱頭・柱脚の塑性化に対応するために局部架構に含めた。局部架構は、51 節点とし、50 個の小部材に分割した。局部座屈が発生する恐れのある、柱頭部・柱脚部では小部材の長さを柱フランジ幅とし、梁端部・梁中央部においては小部材の長さを梁のフランジ幅とした。第 3 章に示した短柱圧縮実験と第 5 章に示した曲げ圧縮実験において、局部座屈により変形が集中した部分が部材幅と同じ程度であったためである。小部材は切片に分割される。上下フランジを各 2 切片、ウェブを 6 切片、合計 10 個の切片に分割した。柱・梁接合部のパネルゾーンは剛であると仮定し、高力ボルト接合部はないものとした。また床スラブは考慮しないものとした。

鋼構造骨組の熱応力変形解析には、第 4 章の純曲げ実験における数値解析および第 5 章の曲げ圧縮実験における数値解析と同じ手法を用いた。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を考慮した、直接剛性法による計算手法である⁷⁾。この数値解析手法の詳細は、付録 1 に示している。さらに、架構骨組の熱応力変形解析においては、火災加熱の影響が局所に限定されることに着目し、局部的な熱膨

張を周辺部材が押さえ込む力を導き、弾性解析を行なう全体架構と弾塑性解析を行なう局部架構に分けて計算する手法を用いた⁵⁾。

部材温度の時刻変動は段階的とし、区分された時間内では一定温度とした。鋼材の高温クリープは考慮しないこととした⁸⁾。鋼材の熱膨張ひずみには、下の(6.1)式を用いた^{7),9)}。

$$\varepsilon_{th} = \alpha \times T = (10.8 + 0.00675 \times T) \times T \times 10^{-6} \quad \dots (6.1) \text{式}$$

記号の意味を以下に示す。

ε_{th} : 鋼材の熱膨張ひずみ

α : 鋼材の線膨張係数

T : 鋼材温度 (°C)

高温時における鋼材の応力-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。本設計例における鋼材(板厚 11mm~40mm)の応力-ひずみ曲線については、第2章に示した薄い板厚(9mm)の引張試験結果より数式化したものであるが、板厚の違いによる影響は考慮しないこととした。鋼材の高温強度に与える板厚の影響については、文献 11)において、以下のように記されている。

「一般に構造用鋼材は熱間圧延のままの状態で使用されるものが多く、脱酸形式、合金組成および熱処理などの影響も無視出来ないので、定量的にはさらにデータを蓄積するか、個々の場合について必要な特性値を直接求める必要があるが、一般に常温における引張強さと高温における0.2%耐力の関係から、常温時における引張強さ下限を保証されている鋼材では板厚が厚くなってもその鋼種に対応する高温耐力は確保出来るものと考えられる。」

火災加熱を受ける鋼構造骨組の変形挙動に与える局部座屈の影響を検討するために、局部座屈を考慮した解析と局部座屈を考慮しない解析を行なった。局部座屈を考慮した解析には、局部座屈後の応力-ひずみ曲線として、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。

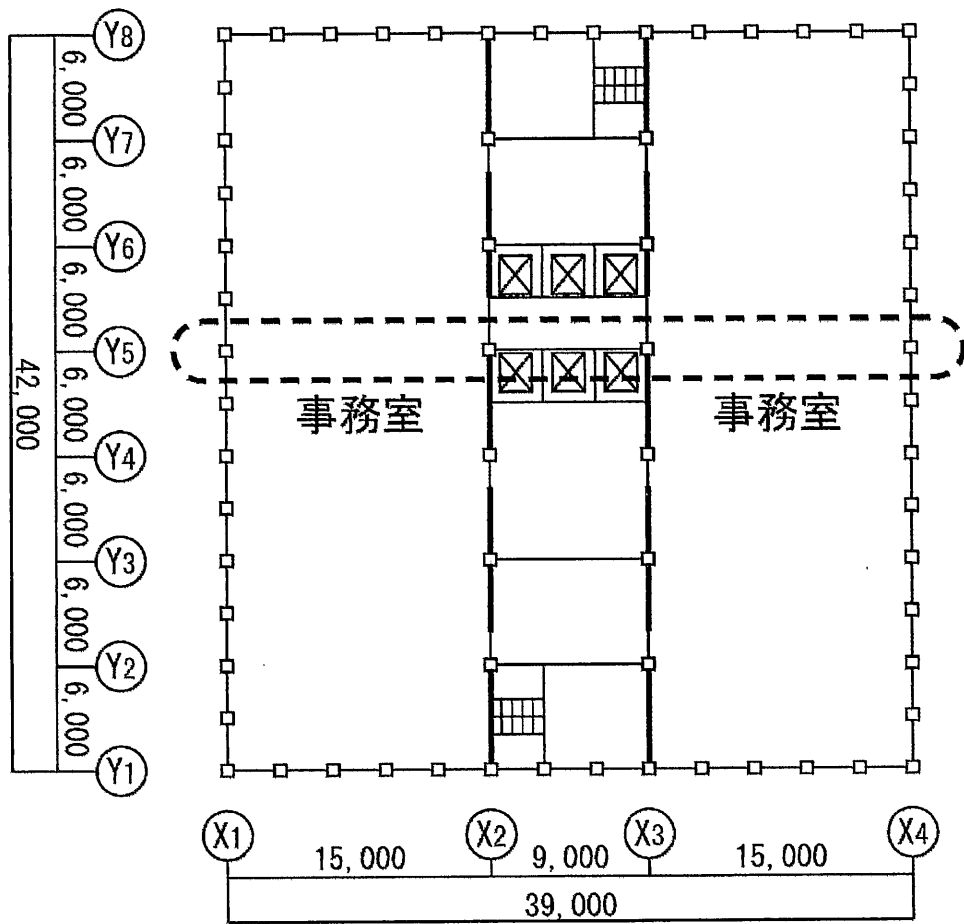


図 6.1 設計例：基準階の平面図

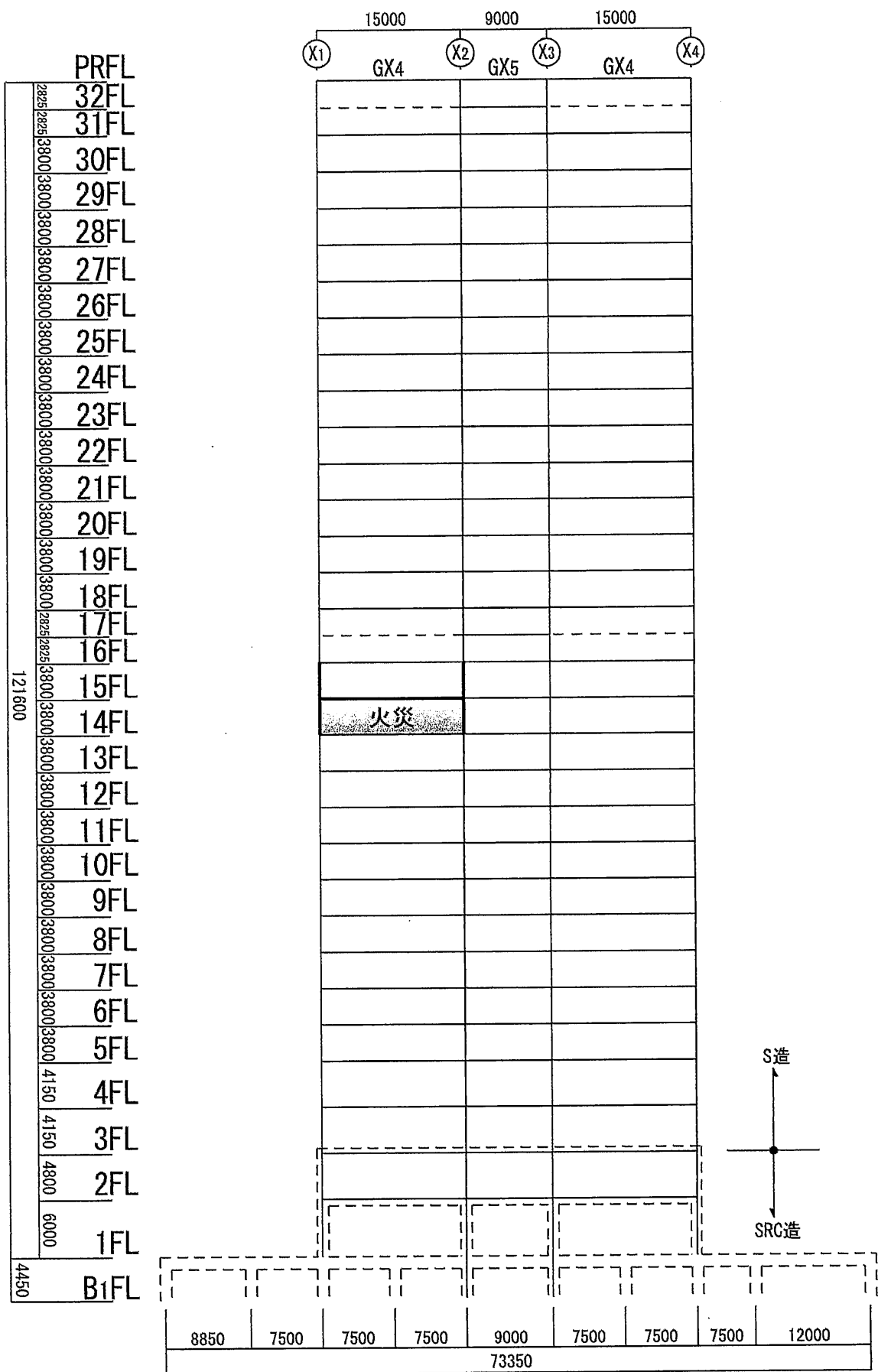


図 6.2 解析の対象となる架構骨組 (Y5 通り)

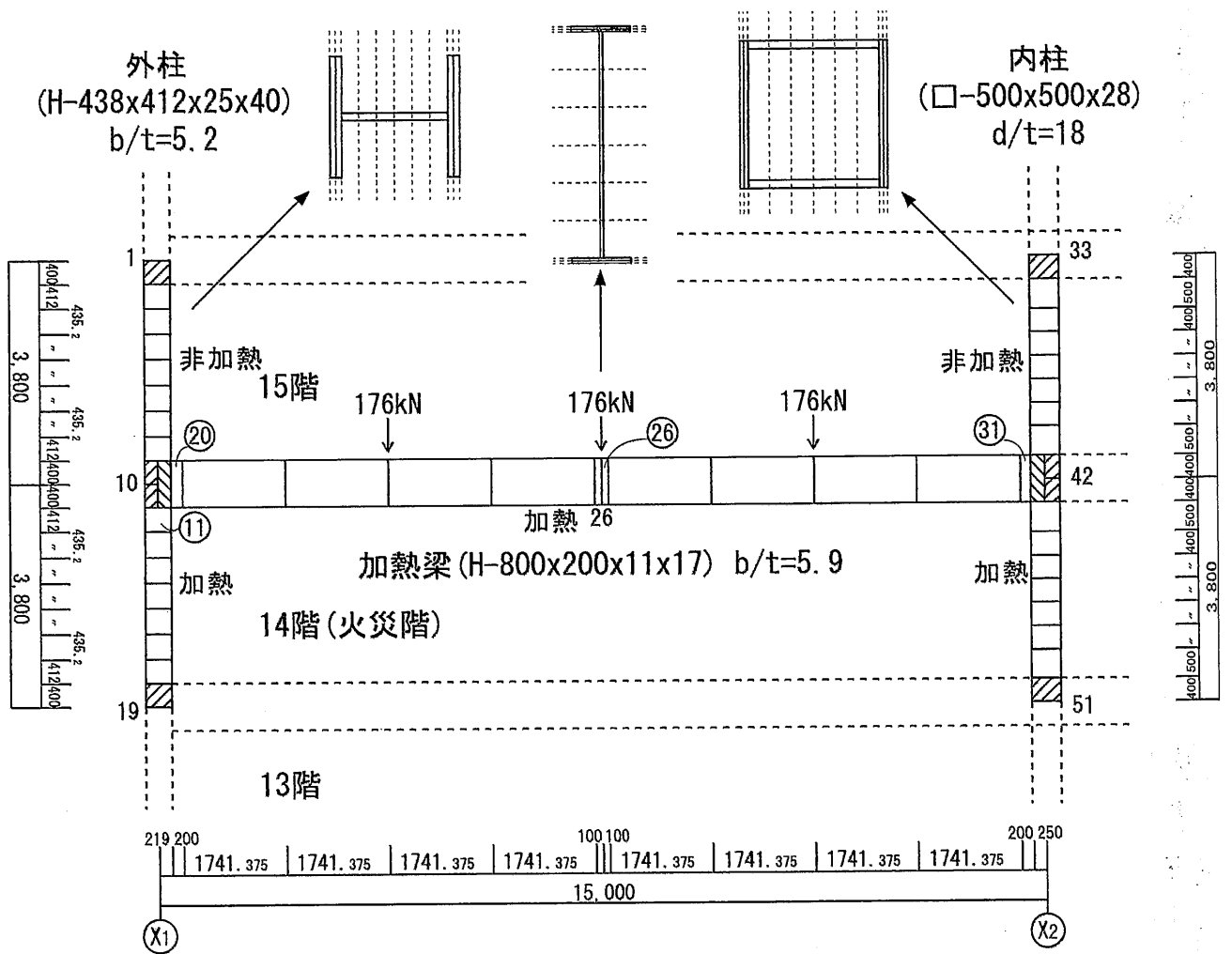


図 6.3 局部架構における解析モデル

6.2.2 解析結果

火災加熱を受ける鋼構造骨組に関する熱応力変形解析の結果を図 6.4～図 6.9 に示す。これらの図において、局部座屈を考慮した解析結果を（局部座屈あり）と表示し、局部座屈を考慮しない解析結果を（局部座屈なし）と表示した。

図 6.4(a)に示す局部架構の変形図(局部座屈あり)を見ると、350℃、500℃と温度が上昇する際、加熱梁の伸びだしに伴い外柱が外側へと押し出され、外柱柱頭に折れ曲りが生じている様子がわかる。梁のたわみは 500℃から 575℃の間で急増し、575℃では左右の梁端部と梁中央部が折れ曲っている様子がわかる。局部座屈ありの解析においては、560℃の時点で内柱側梁端部に局部座屈が発生し、570℃の時点で外柱側梁端部に局部座屈が発生し、580℃の時点で収束不可能となった。580℃の時点で収束不可能となった理由は、いくつか考えられるが、梁中央部においても局部座屈が発生し、梁が崩壊したことが引き金になったと思われる。

図 6.4(b)に示す局部架構の変形図(局部座屈なし)を見ると、650℃においては梁のたわみ込みに伴い、外柱・内柱ともに内側へと引き込まれている。さらに、外柱・内柱ともに弓なり現象が生じ、柱が崩壊寸前である様子がわかる。また、梁も大きくたわみ、650℃において左右の梁端部と梁中央部が折れ曲っている様子がわかる。

図 6.5 の(a)に示す外柱柱頭の水平変位量を見ると、温度上昇に伴う増加は見られるが、550℃における最大値においても、ECCS の許容値²⁾である階高 h の $1/30$ を超えていない。図 6.5 の(b)に示す内柱柱頭の水平変位量を見ると、温度上昇に伴う増加は見られるが、500℃における最大値においても、ECCS の許容値²⁾である階高 h の $1/30$ を超えていない。図 6.5 の(c)に示す外柱柱頭の軸変位を見ると、温度上昇に伴い柱が伸びだしているが、局部座屈なしの解析において、600℃位からは急激に縮みだし、640℃～650℃では ISO 耐火試験における柱の軸変形量の許容値¹⁰⁾である柱長さ h の $1/100$ を超えている。図 6.5 の(d)に示す内柱柱頭の軸変位についても、外柱柱頭の軸変位と同じことがいえる。図 6.5 の(e)に示す梁中央部のたわみ量を見ると、500℃位から急激にたわみが大きくなり、局部座屈なしの解析における 600℃位で ECCS 許容値²⁾の $L^2/800d$ (L : 梁長さ、 d : 梁せい) を超えている。局部座屈ありと局部座屈なしの両者の解析結果において、柱・梁の変形量について、大きな違いは見られない。

図 6.6(a)に示す 350°Cにおけるひずみ分布を見ると、柱頭部・柱脚部と梁中央部・梁端部において圧縮ひずみ 0.2%を超える塑性領域が見られる。図 6.6(b)に示すように、500°Cになると塑性領域が広がっている。図 6.6(c)に示すように、575°Cになると、内柱全域が塑性化し、また、梁中央部と梁端部に塑性ヒンジが形成されている。

図 6.7 には、局部架構の主要部分における 10 切片のひずみ量を示す。図 6.7 の(a)に示すように、500°Cにおいて外柱柱頭の切片に生じるひずみは最大 2.5%位である。図 6.7 の(b)に示すように、500°Cにおいて外柱柱脚の切片に生じるひずみは 2%位である。図 6.7 の(c)に示すように、500°Cにおいて内柱柱頭に生じるひずみは 0.5%位である。図 6.7 の(d)に示すように、梁中央部に生じるひずみは、500°C以降に急増し、局部座屈なしの解析において 650°Cでは 15%位にまで達している。図 6.7 の(e)と(f)に示すように、梁端部に生じるひずみは、500°C以降に急増し、局部座屈なしの解析において 650°Cでは 20%を超えている。

図 6.8(a)に示す 500°Cにおけるモーメント分布図と、図 6.8(b)に示す 575°Cにおけるモーメント分布図を比較すると、575°Cになると外柱に生じるモーメントが減少している。鋼材の熱劣化に伴い、外柱の曲げ耐力が低下するために生じる現象である。火災階の上階は、加熱による梁の伸びだしの影響を受けて、575°Cにおいて、片持梁形式の大きなモーメントが外柱に生じている。この部分では、梁の固定端モーメントが減少し、梁中央部のモーメントが大きくなっている。

図 6.9 に示す発生応力について述べる。外柱柱頭の発生軸力は、温度上昇に伴う変化はあまり見られない。外柱柱頭の発生モーメントは、温度上昇に伴い増加し、400°C位から減少し、600°C位ではほぼゼロになる。内柱柱頭の発生軸力は、575°C位から減少している。局部座屈なしの解析においては、内柱の軸力が減少した分だけ、周辺の柱に荷重が再配分された。内柱柱頭の発生モーメントは、温度上昇に伴い増加し、400°C位から減少し、600°C位ではほぼゼロになる。梁中央部の発生モーメントは、温度上昇に伴い緩やかに増加し、550°C位から減少に転じている。梁中央部の発生軸力は、温度上昇に伴い増加し、400°C位から減少し、600°C位ではほぼゼロになる。梁における軸力の増加・減少は、外柱および内柱における発生モーメントの増加・減少に対応する。梁右端部の発生モーメントは、500°C位までは温度上昇に伴う変化はあまり見られないが、500°C位から減少している。局部座屈ありと局部座屈なしの解析を比較すると、発生応力に大きな違いは見られない。

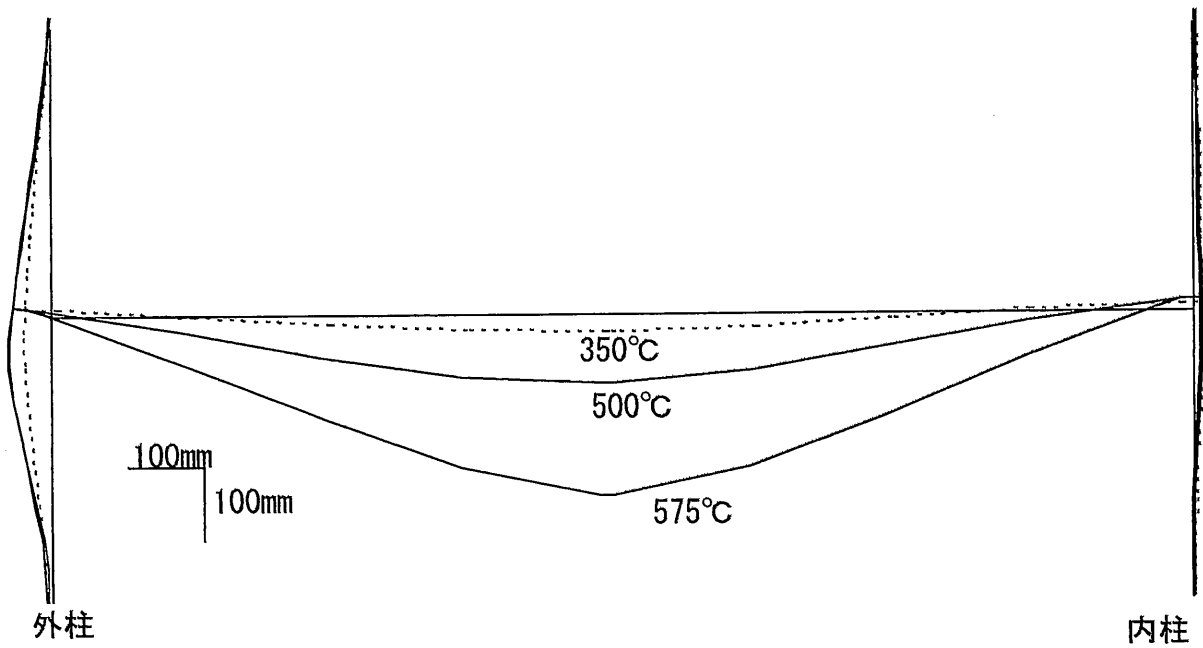


図 6.4(a) 解析結果：局部架構の変形図（局部座屈あり）

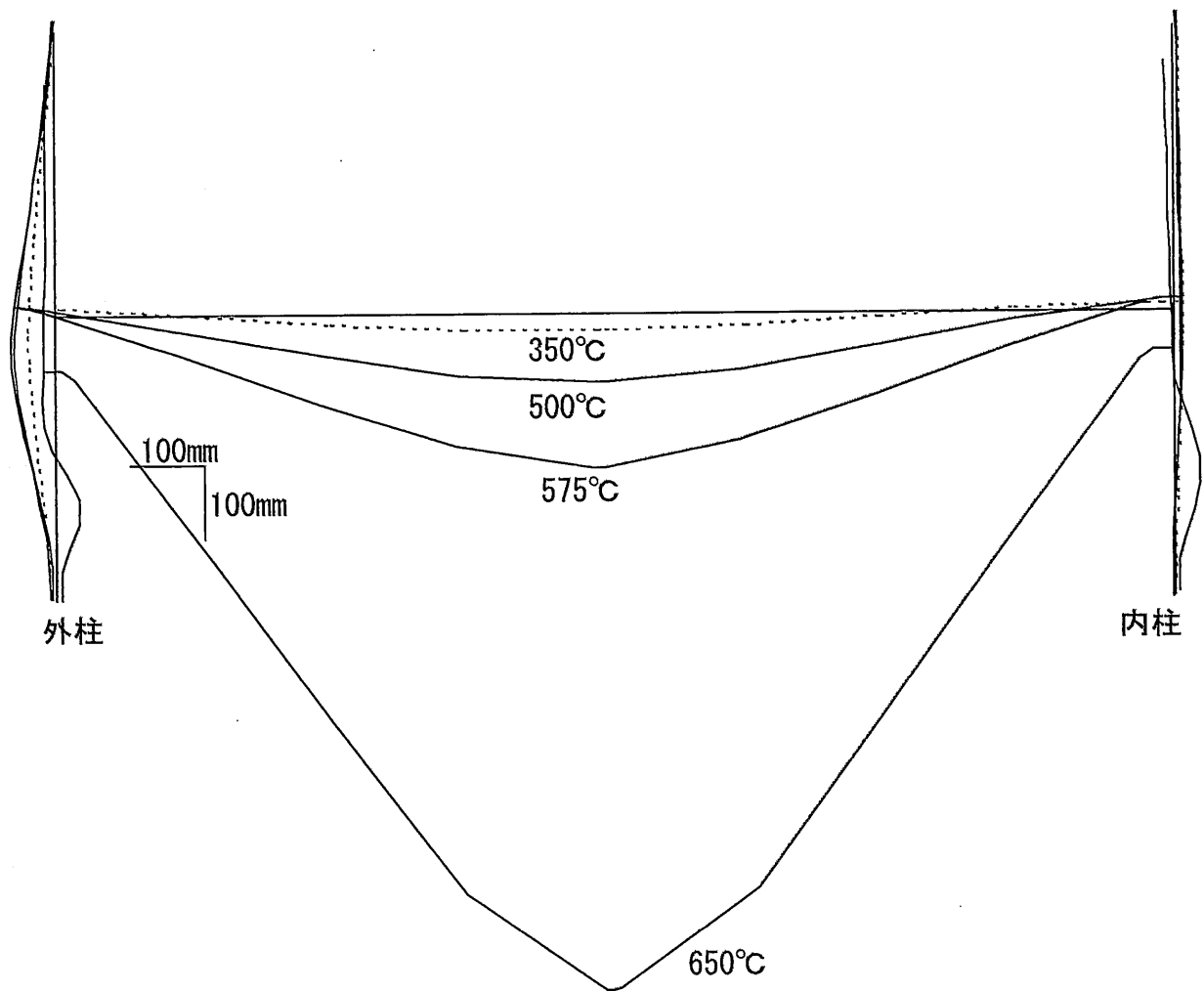
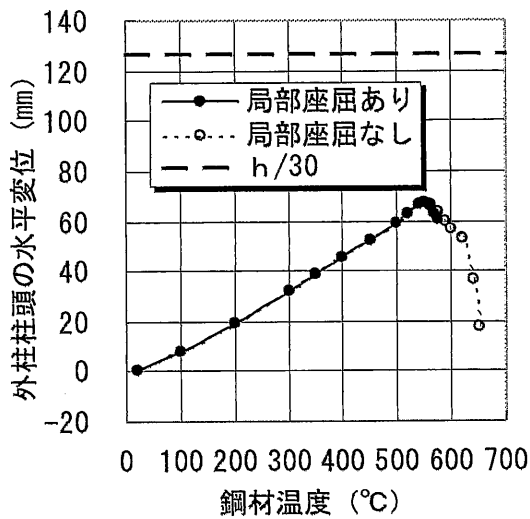
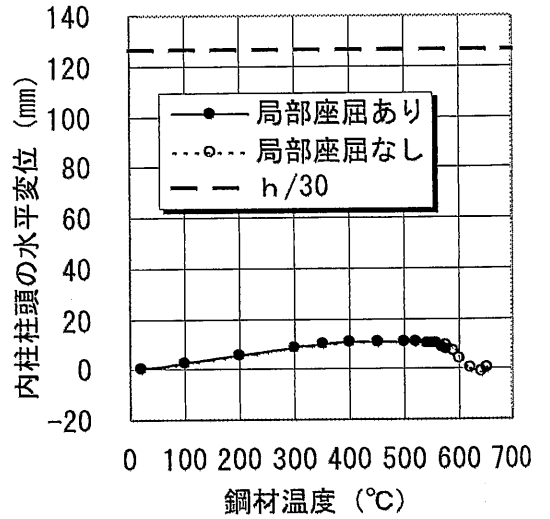


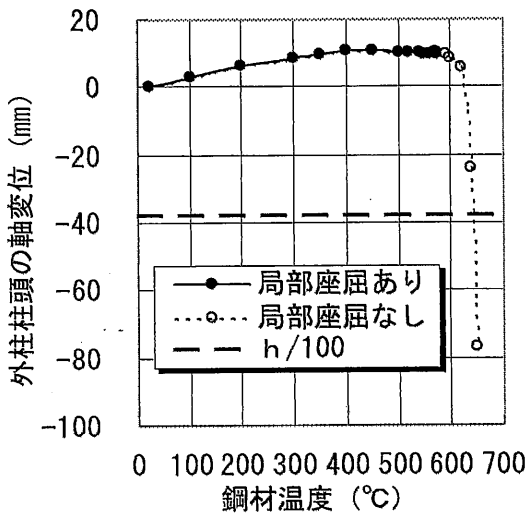
図 6.4(b) 解析結果：局部架構の変形図（局部座屈なし）



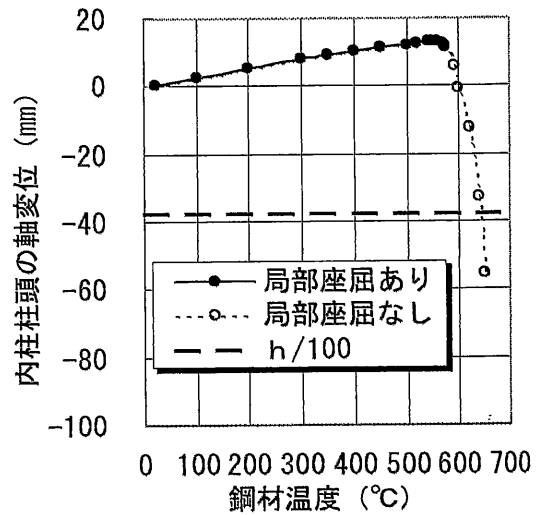
(a) 外柱柱頭の水平変位量



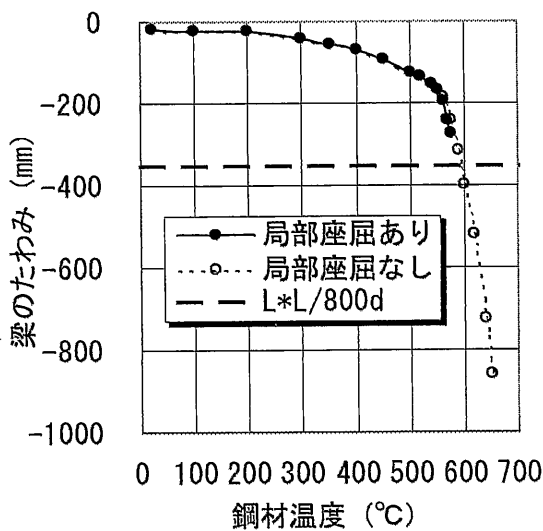
(b) 内柱柱頭の水平変位量



(c) 外柱柱頭の軸変位量



(d) 内柱柱頭の軸変位量



(e) 梁のたわみ量

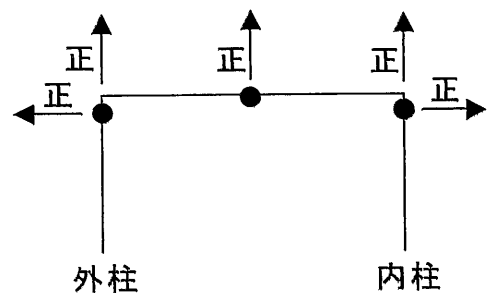


図 6.5 解析結果：柱・梁の変形量

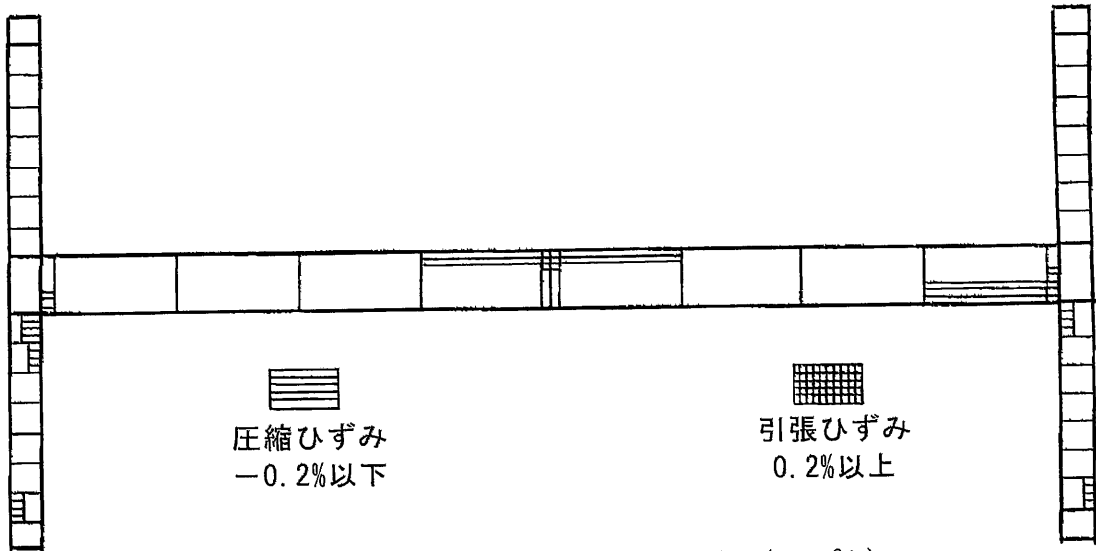


図 6.6(a) 解析結果：ひずみ分布 (350°C)

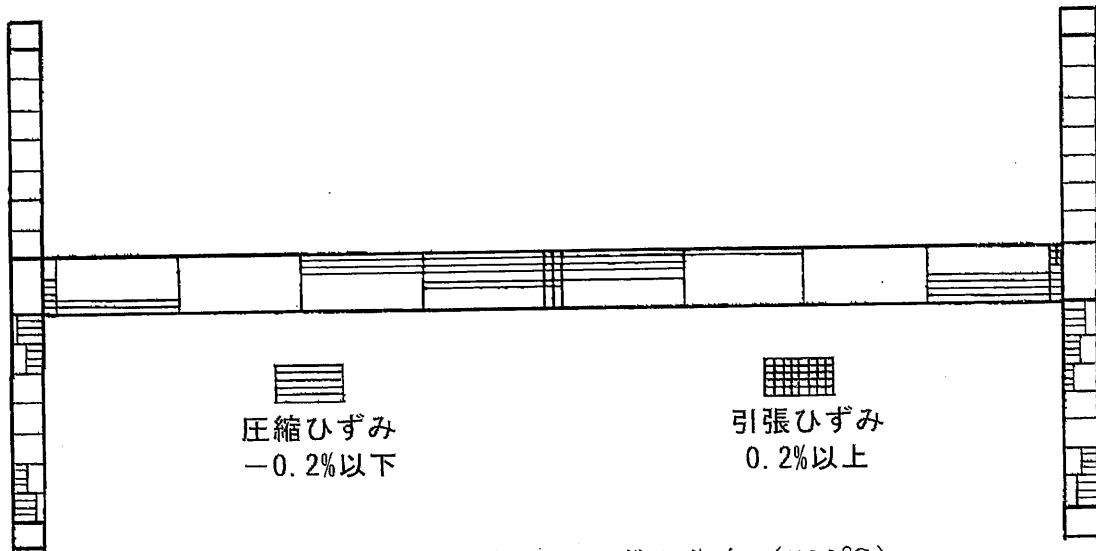


図 6.6(b) 解析結果：ひずみ分布 (500°C)

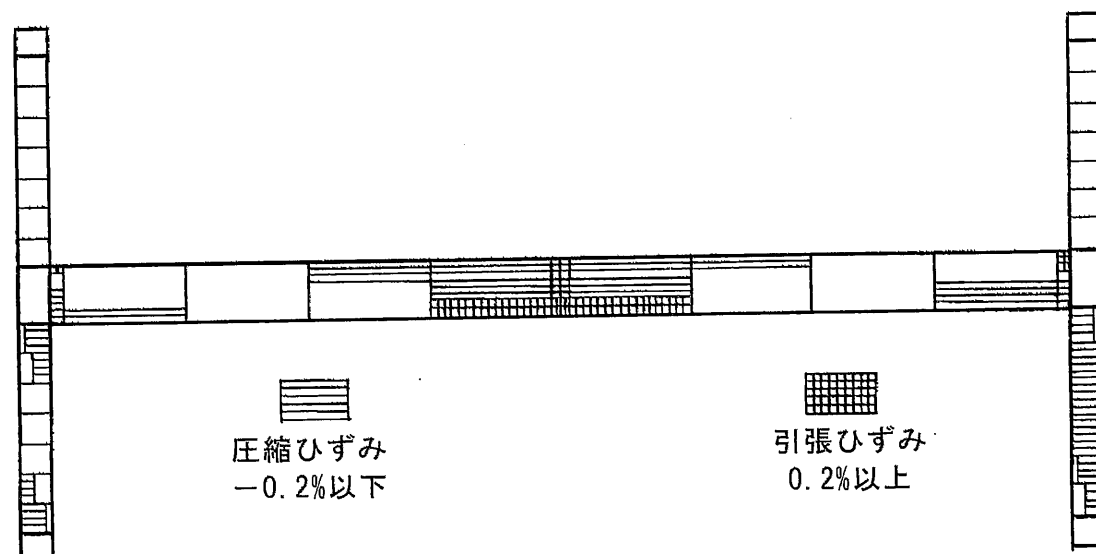
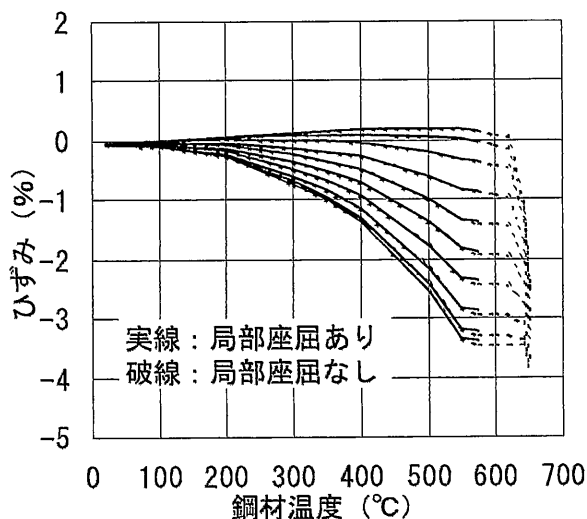
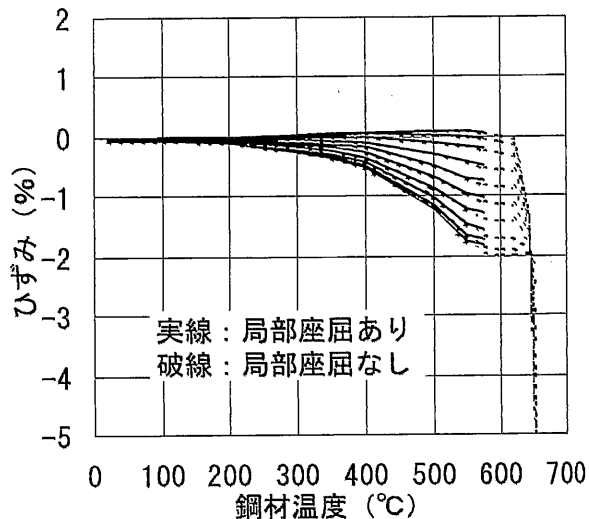


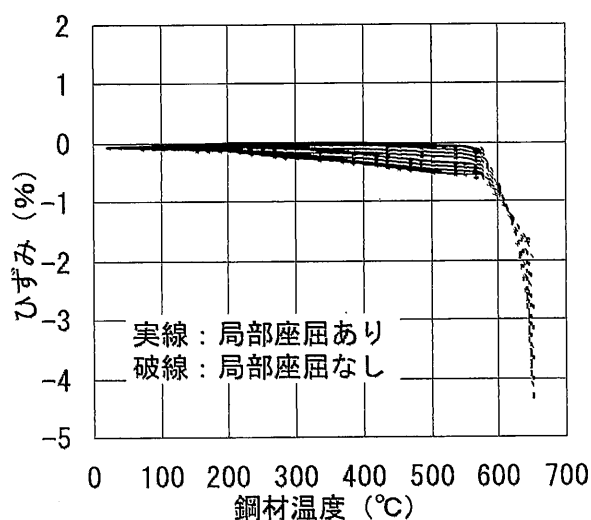
図 6.6(c) 解析結果：ひずみ分布 (575°C, 局部座屈あり)



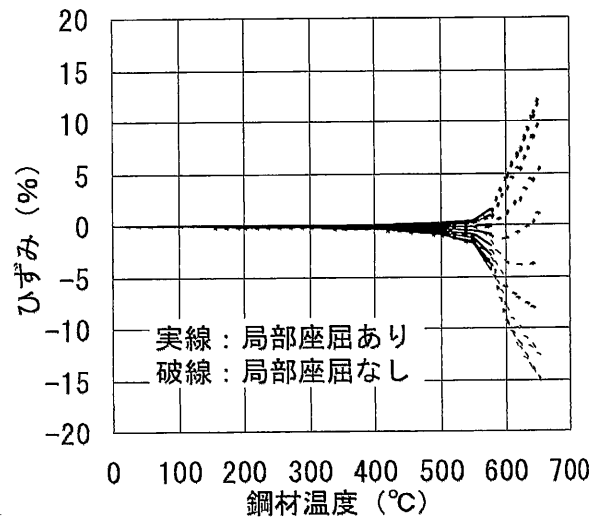
(a) 外柱柱頭のひずみ量



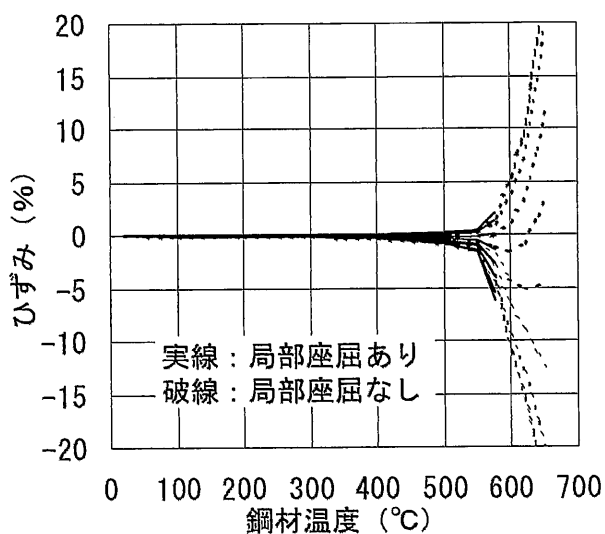
(b) 外柱柱脚のひずみ量



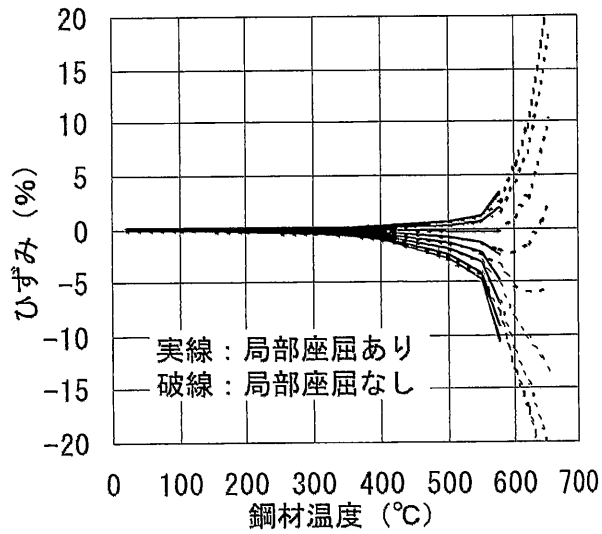
(c) 内柱柱頭のひずみ量



(d) 梁中央部のひずみ量



(e) 梁左端部のひずみ量



(f) 梁右端部のひずみ量

図 6.7 解析結果：柱・梁のひずみ量

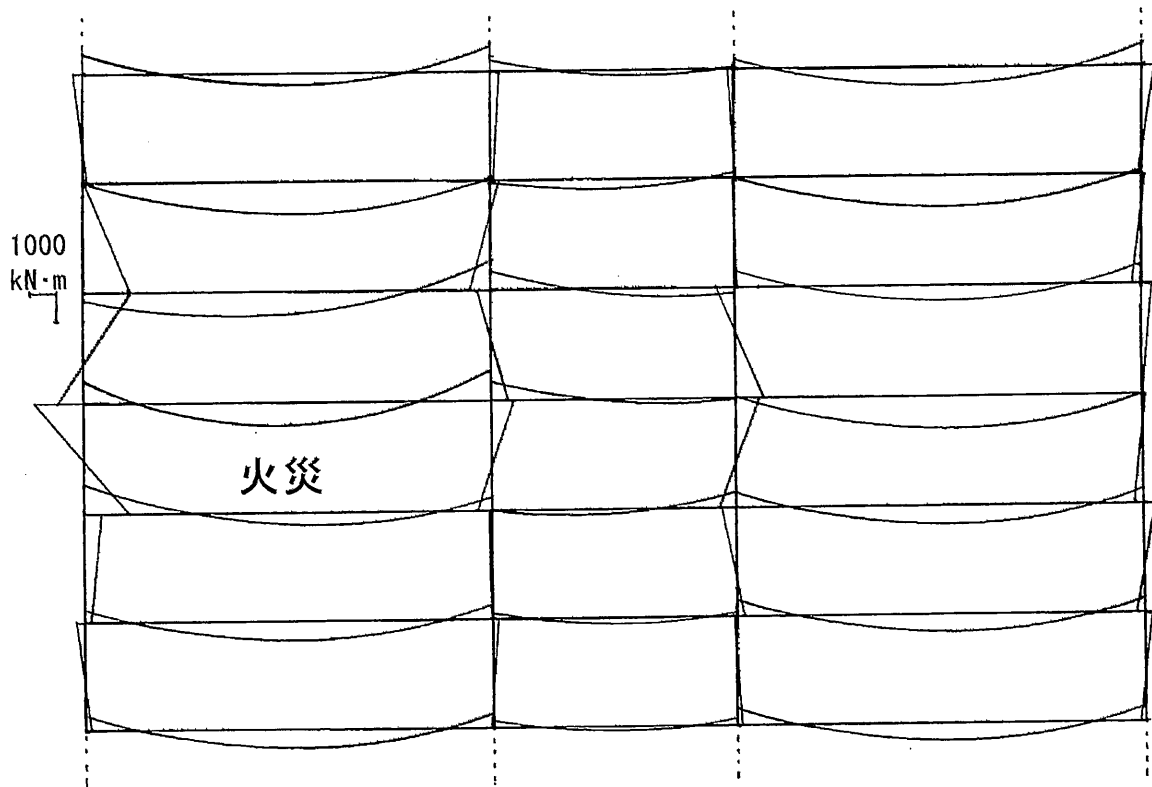


図 6.8(a) 解析結果：モーメント分布図 (500°C)

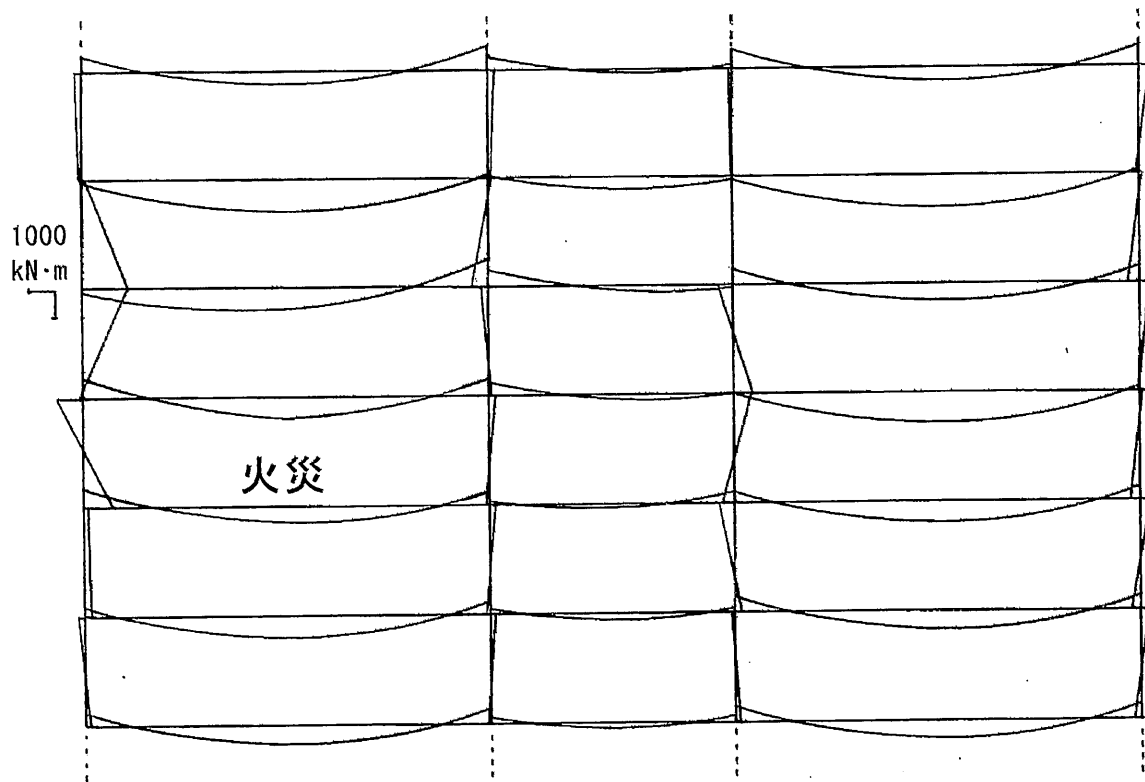


図 6.8(b) 解析結果：モーメント分布図 (575°C, 局部座屈あり)

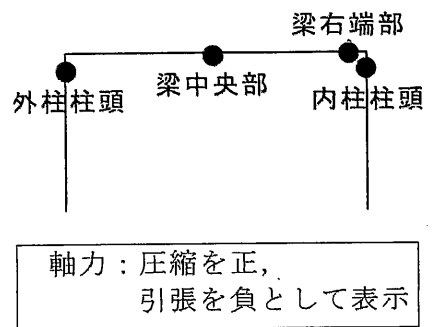
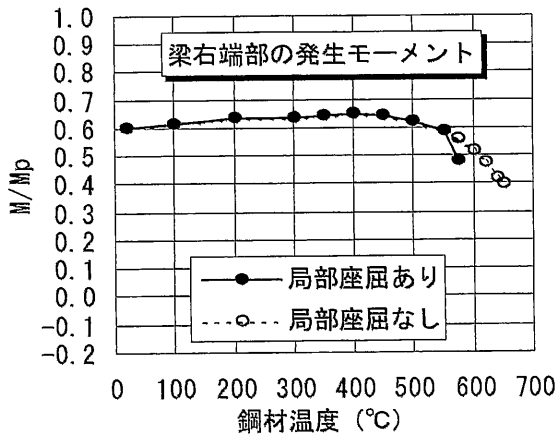
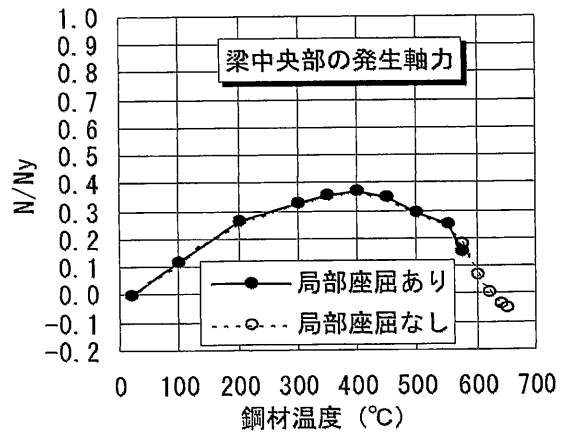
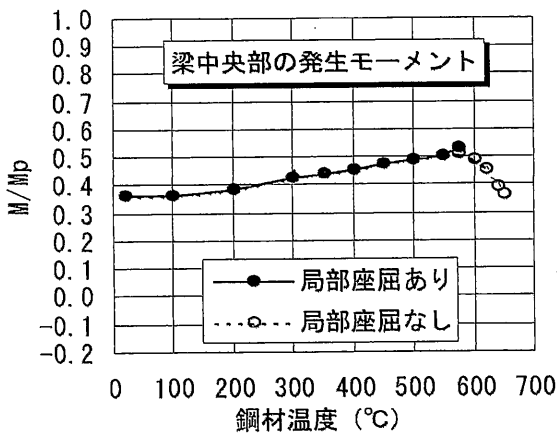
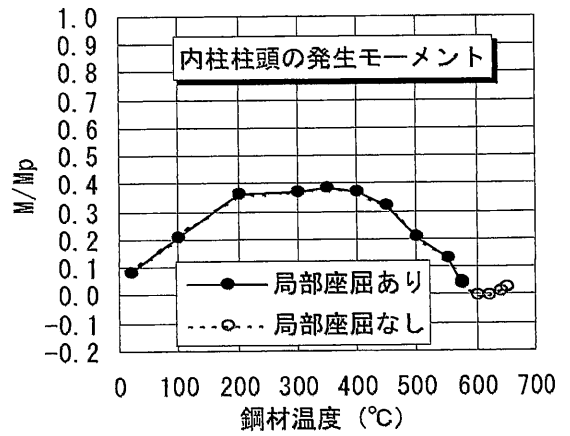
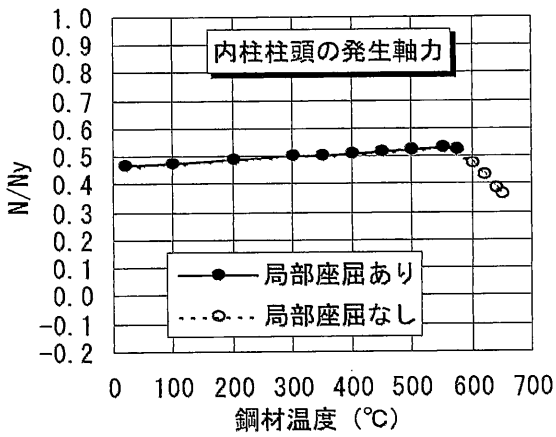
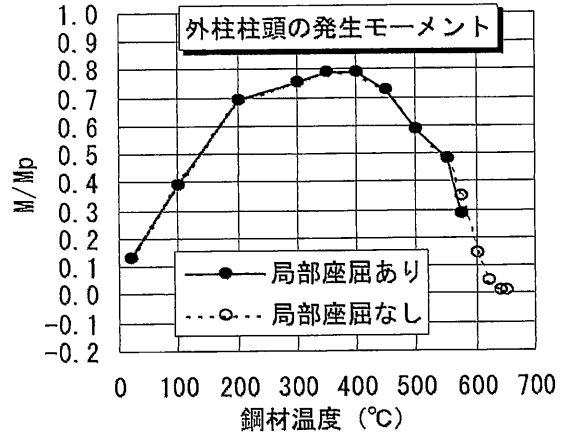
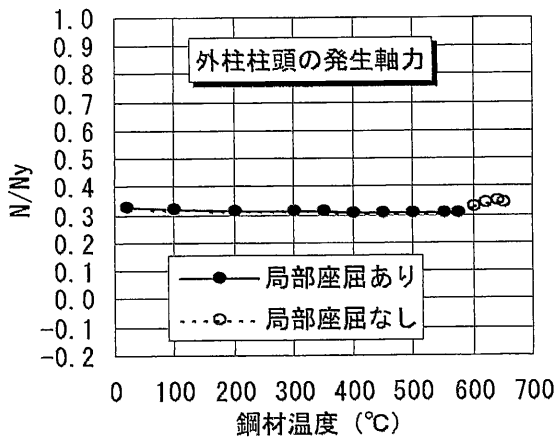


図 6.9 解析結果：発生応力

6.3 耐火性の決定

一般に構造部材の耐火性を決定する指標として耐火時間が用いられるが、鋼構造骨組の耐火性は鋼材温度が主要因となる。本論においては、区画火災を受ける鋼構造骨組の耐火性を決定する指標として、鋼材温度を採用する。

(1) 実験結果により決定される許容鋼材温度

第5章に示した高温時におけるH形断面・箱形断面部材の曲げ圧縮実験により、鋼柱の荷重支持能力は、以下のように確認されている。

[H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ 以下の場合]

- 軸力比 0.3 以下の柱については、鋼材温度 600°C 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°C 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°C まで荷重支持能力を有する。

[箱形断面部材，幅厚比 $d/t=30$ 以下の場合]

- 軸力比 0.3 以下の柱については、鋼材温度 600°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°C まで荷重支持能力を有する。

第4章に示した高温時におけるH形断面部材の純曲げ実験により、局部座屈を伴う鋼梁の曲げ耐力は、以下のように確認されている。

[H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ 以下の場合]

- 鋼材温度 600°C までは、ECCS の基準における梁たわみの許容値に相当する曲げ変形が生じても、局部座屈に伴う曲げ耐力の低下は見られない。よって、高温時の塑性耐力まで、鋼梁は曲げ耐力を有するといえる。

以上の実験結果を本設計例に適用すると、本設計例における鋼構造骨組の許容鋼材温度は、表 6.1 のように決定される。

(2) 熱応力変形解析結果により決定される許容鋼材温度

ヨーロッパ鋼構造協会連合 (ECCS) では、鋼構造骨組の耐火性を決定する指標として、火災加熱を受ける鋼構造骨組に生じる変形量を採用している²⁾。以下に熱変形量の許容値を示す。

[柱の場合]

$$\delta \leq \frac{h}{30} \quad (6.1) \text{式}$$

記号の意味を以下に示す。

δ : 柱に生じる水平変形量の許容値

h : 柱の長さ

[梁の場合]

$$\delta \leq \frac{\ell^2}{800 \times d} \quad (6.2) \text{式}$$

記号の意味を以下に示す。

δ : 梁に生じるたわみ量の許容値

ℓ : 梁の長さ

d : 梁せい

熱応力変形解析結果より得た柱・梁の変形量と ECCS 基準の変形許容量を比較すると、本設計例における鋼構造骨組の許容鋼材温度は、表 6.2 のように決定される。

(3) 耐火性の決定

実験結果および熱応力変形解析結果より決定された許容鋼材温度を図 6.10 に示す。本設計例においては、鋼材温度 500°C までの耐火性を有することが決定された。

表 6.1 実験結果により決定される許容鋼材温度

部材	断面	幅厚比	軸力比	許容鋼材温度
外柱	H形	b/t=5.2	0.32	550°C
内柱	箱形	d/t=18	0.47	500°C
梁	H形	b/t=5.9	—	600°C以下

表 6.2 熱応力変形解析結果により決定される許容鋼材温度

局部座屈ありの解析結果			
部材	ECCS の許容変形量に達した時の鋼材温度	収束不可能となった時の鋼材温度	許容鋼材温度
外柱	575℃まで許容変形量に達しなかった	575℃	575℃
内柱	575℃まで許容変形量に達しなかった		
梁	575℃まで許容変形量に達しなかった		
局部座屈なしの解析結果			
部材	ECCS の許容変形量に達した時の鋼材温度	収束不可能となった時の鋼材温度	許容鋼材温度
外柱	650℃まで許容変形量に達しなかった	650℃	590℃
内柱	650℃まで許容変形量に達しなかった		
梁	590℃		

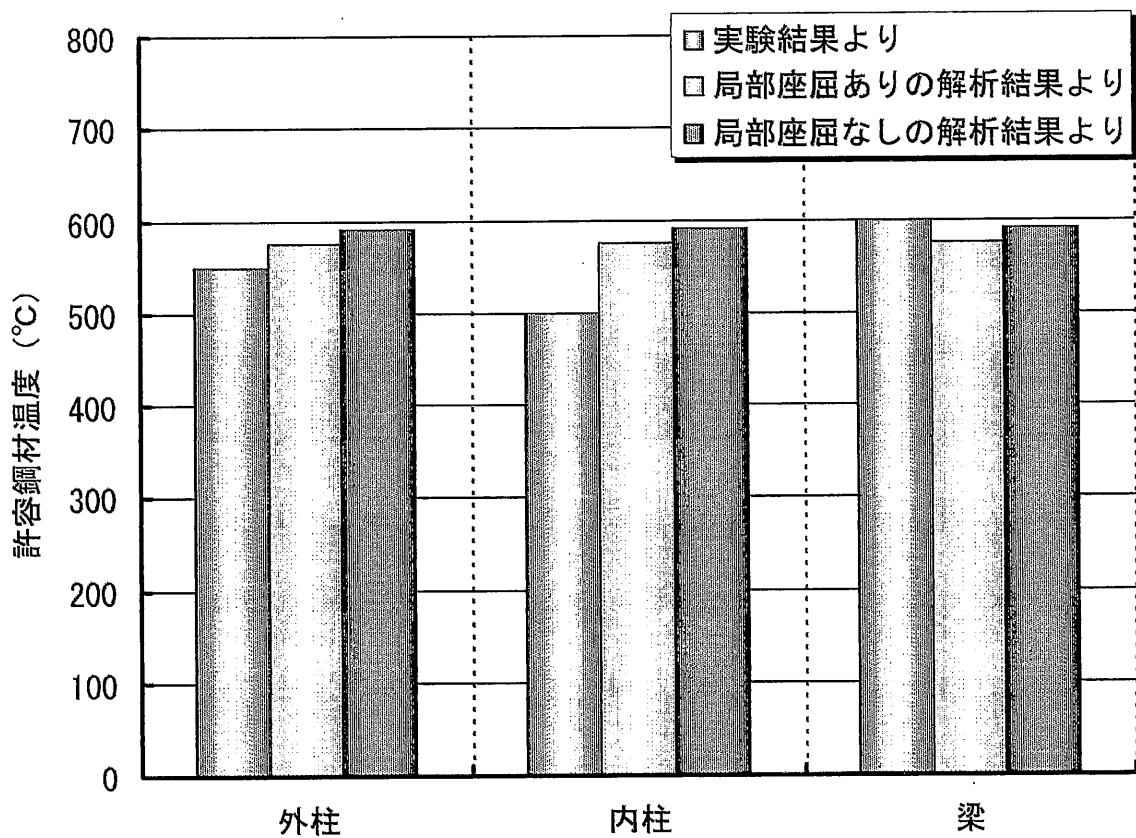


図 6.10 本設計例における耐火性の決定

6.4 結語

本章では、鋼構造骨組の熱応力変形解析と鋼構造部材の高温部材実験を組み合わせ、鋼構造骨組の耐火性を決定した例を示した。本設計例において、実験結果より得た軸力比と許容温度の関係より、柱の耐火性が決定された。また、熱応力変形解析より得た柱・梁の変形量がヨーロッパ鋼構造協会連合（ECCS）で推奨されている変形許容値を超えたことで、梁の耐火性が決定された。本設計例は、既往の研究において熱応力変形解析の対象となった高層鉄骨架構 48 棟の中で、外柱における軸力比が最も大きく、また 600℃までの解析において鋼梁のたわみが最も大きかった例であった。しかし、骨組としては、鋼材温度 500℃までの耐火性を有することが確認された。

熱応力変形解析においては、短柱圧縮実験より得た局部座屈後における応力ひずみ曲線を用いて、局部座屈を考慮した解析を行なった。局部座屈ありと局部座屈なしの解析結果を比較すると、本設計例では、575℃までは大きな差が見られなかったが、収束不可能となる温度において大きな差が見られた。局部座屈を考慮した解析を行なうことによって、より安全側の解析が可能となった。

第6章の参考文献

- 1) 日本建築センター：「建築物の総合防火設計法 第4巻 耐火設計法」，1989年4月
- 2) Design Manual on the European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structure, ECCS-Technical Committee³ Fire Safety of Steel Structure, 1985
- 3) 日本建築学会：「鋼構造耐火設計指針」，1999年1月
- 4) 建設省告示第1433号「耐火性能検証法に関する算出方法等を定める件」，2000年5月
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 上杉英樹：「高層鉄骨架構の火災時の応力変形性状に関する研究」，学位論文，1990年1月
- 9) Tasnim Uddin, Charles G. Culver, "Effects of Elevated Temperature on Structural Members", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.101, No.ST7, 1975年7月
- 10) ISO834,"Fire-Resistance Tests -Elements of Building Construction", 1999年
- 11) 日本鋼構造協会 技術委員会 耐久性分科会 耐火委員会 高温強度班：「構造用鋼材の高温時ならびに加熱後の機械的性質」，JSSC, Vol.4, No.33, 1968年

第7章 結論

7.1 研究成果	263
7.1.1 高温引張試験に関して	263
7.1.2 高温時における短柱圧縮試験に関して	263
7.1.3 高温時における純曲げ試験に関して	264
7.1.4 高温時における曲げ圧縮試験に関して	265
7.2 結論	267
7.3 今後の課題	268

7.1 研究成果

本研究では、火災加熱を受ける鋼構造部材の局部座屈後における変形性状を明らかにすることを目的とし、高温引張試験、高温時における短柱圧縮実験、高温時における純曲げ実験、高温時における曲げ圧縮実験を行なった。これらの実験より、下記の成果を得ることができた。

7.1.1 高温引張試験に関して

溶接構造用圧延鋼材(SM490A)について5種類、裏当て金について1種類における高温引張試験結果より、高温時の応力・ひずみ曲線をはじめ、弾性係数・0.2%オフセット強度・引張強度・伸びなどの高温時引張特性に関する資料が蓄積された。

7.1.2 高温時における短柱圧縮実験に関して

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短柱圧縮実験を行ない、常温・ 400°C ・ 500°C ・ 600°C における局部座屈後の残存圧縮耐力が得られた。

鋼材の基準強度(F 値)を指標として15%位までのひずみにおける実験結果を整理すると、耐火設計において重要な目安となる局部座屈後の残存圧縮耐力は、以下の値を示した。

- 幅厚比 $b/t=10$ 以下のH形断面部材における局部座屈後の残存圧縮耐力
 - 400°C →基準強度の0.7倍程度
 - 500°C →基準強度の0.4倍程度
 - 600°C →基準強度の0.2倍程度
- 幅厚比 $d/t=30$ 以下の箱形断面部材における局部座屈後の残存圧縮耐力
 - 400°C →基準強度の0.6倍程度
 - 500°C →基準強度の0.4倍程度
 - 600°C →基準強度の0.2倍程度

箱形断面・円形断面部材(閉鎖断面部材)については、鈴木らの研究によって、局部座屈を考慮した圧縮域における応力・ひずみ曲線式が提案されていた。本研究では、鈴木らの提案式における考え方を踏襲して、H形断面部材の局部座屈後における応力・ひずみ曲線式を実験的に導いた。下式に示すH形断面部材

の局部座屈後における応力・ひずみ曲線式において、1.2 と 1.0 の定数が本実験により導かれた値である。

$$\sigma(\varepsilon_0) = \frac{\sigma_0(\varepsilon_0)}{b/t} \left(\sqrt{\frac{1.2}{\varepsilon_0}} + 1.0 \right)$$

短柱圧縮実験の結果を用いることにより、数値解析に基づく耐火設計の力学性状予測において、一般鋼における局部座屈後の耐力低下を考慮することが可能となった。

局部座屈後の応力・ひずみ式と実験値を比較すると、両者は定性的に概ね一致し、定量的には実験値に対して提案式の方がやや下回る値を示した。

以上、一般鋼を用いた短柱圧縮実験により、局部座屈後の残存圧縮耐力を定量的に把握し、局部座屈後の応力・ひずみ曲線を得た。これより、一般鋼を用いた部材および骨組の熱応力変形解析に、局部座屈後の耐力低下を考慮することが可能となった。

7.1.3 高温時における純曲げ実験に関して

一般鋼による幅厚比 $b/t=7.5$ と幅厚比 $b/t=10$ のH形断面部材を用いて純曲げ実験を行ない、常温・ 400°C ・ 500°C ・ 600°C において、局部座屈を伴うH形断面部材の曲げ耐力を得た。

火災加熱を受ける鋼梁には大きなたわみが生じるが、鋼梁が支える区画部材に隙間が生じて火災が延焼拡大することは許されないので、鋼梁のたわみ量を制限する必要がある。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が、我が国においては規定がない。よって、本研究においては、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変形量の許容値を目安とした。

純曲げ実験では、ECCS 基準における梁のたわみ許容値を超える変形をH形断面部材に与えて、大変形時における一般鋼の曲げ耐力を得た。その結果、幅厚比 $b/t=10$ 以下のH形断面部材においては、梁のたわみ許容値に相当する大変形が生じて、局部座屈に伴う曲げ耐力の低下が見られなかった。これより、数値解析に基づく耐火設計の力学性状予測において、鋼梁に生じるたわみが梁のたわみ許容値を超えないことを確認すれば、局部座屈の影響を考慮しなくて

もよいことが示された。また、塑性ヒンジ部分における曲げ耐力が曲率の増大にかかわらず全塑性モーメントを維持すると仮定した、塑性設計を適用できることが示された。

引張試験および短柱圧縮実験より得た応力・ひずみ曲線を用いて、純曲げ実験の数値解析を行ない、局部座屈ありと局部座屈なしの解析結果と実験結果を比較した。その結果、幅厚比が大きい部材においては、局部座屈を考慮した応力・ひずみ曲線式を用いることで、大変形時における曲げ耐力を概ね安全側に追跡できることが示された。

7.1.4 高温時における曲げ圧縮実験に関して

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°C ・ 500°C ・ 550°C ・ 600°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が、我が国においては規定がない。よって、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値を採用して、柱の水平変形許容値を階高の $1/30$ とした。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ようになった。

[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°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°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°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°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°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。

7.2 結論

区画火災を受ける鋼構造骨組の耐火性は、鋼材温度を平均 350°C以下となるように耐火被覆を施すことで保たれてきた。熱応力変形解析によると、耐震設計を施された鋼構造骨組は、鋼材温度が 600°C位になるまで耐火性を有することが示されていた。しかし、一方では、部材に生じる熱変形は極めて大きいことが示され、局部座屈の発生を避けがたいことが指摘されていた。

本論は、従来不足していた一般鋼に関する基礎資料を 600°Cまでの部材実験により蓄積し、局部座屈後における鋼構造部材の残存耐力と荷重支持能力を実験により明らかにしたものである。本研究の成果を活用することにより、熱応力変形解析と実験の両面から、一般鋼を用いた鋼構造骨組の耐火性を検討できるようになった。

7.3 今後の課題

鋼構造の耐火性に関する今後の研究課題として、本研究を通じて考えられたものを以下に示す。

1) 火災加熱を受ける鋼構造骨組に関する熱応力変形解析の蓄積

高層鉄骨架構に関する検討は数多くなされてきたが、近年では平面的に大規模な商業施設が増えている。その防火区画は、最大で 3000m²まで許容されている。このような広い区画で火災が生じた場合において、骨組がどのような変形挙動を示すのか、検討が必要である。また、筋かいを耐震要素に用いることで鋼構造部材の断面を小さくした骨組は、従来の高層鉄骨架構に比べて、耐火性の劣る可能性が大きい。筋かいを有する骨組についても、熱応力変形解析による耐火性の検討が必要である。

2) 高力ボルト接合部の高温時変形性能に関する実験資料の蓄積

鋼構造骨組の熱応力変形解析では、柱・梁接合部が健全であることを前提条件としている。しかし、過去の火災事例では、高力ボルト接合部が破断する例も見られる。鋼構造の耐火設計においては、火災時に生じる骨組の大変形に対して、高力ボルト接合部を破断させないことが最も重要である。高力ボルト接合部の高温時変形性能に関して、実験資料の蓄積が必要である。

3) 床スラブの影響を考慮した 3次元熱応力変形解析手法の確立

火災加熱を受ける鋼構造骨組の変形性状は、本来は3次元的な挙動であり、床スラブの影響を強く受けるものと考えられる。床要素を組み込んだ熱応力変形解析手法を確立し、床スラブの熱膨張・たわみ込みが鋼構造骨組に与える影響について検討することが必要である。

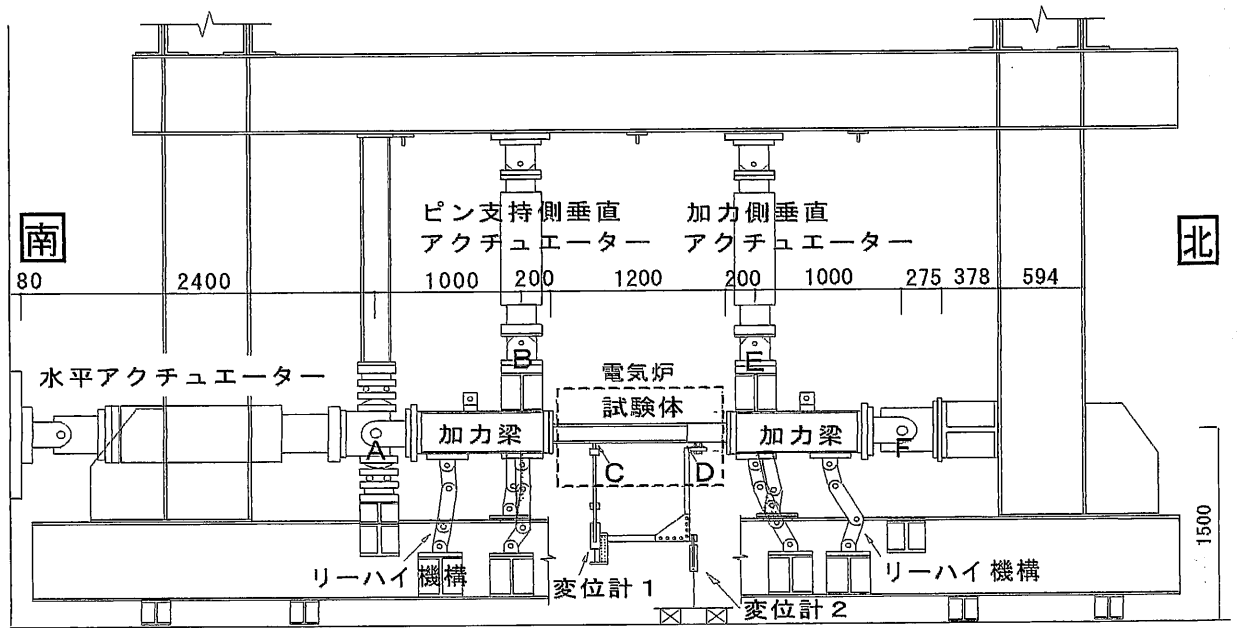
資料編 曲げ圧縮実験の全結果

資図との対応表

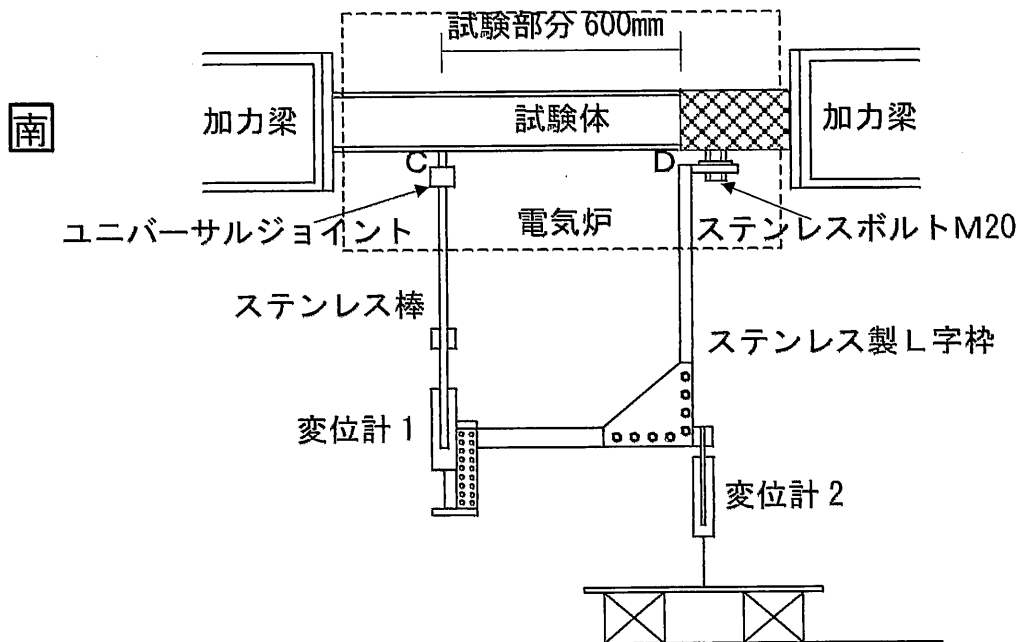
断面形状	幅厚比	軸力比	鋼材温度 (°C)				
			常温	400	500	550	600
H-135×135×6×9	7.5	0.3	資図 1	資図 2	資図 3		資図 4
		0.4	資図 5	資図 6	資図 7	資図 8	
		0.5	資図 9	資図 10	資図 11	資図 12	
H-120×120×4.5×6	10	0.3	資図 13	資図 14	資図 15		資図 16
		0.4	資図 17	資図 18	資図 19	資図 20	
		0.5	資図 21	資図 22	資図 23	資図 24	
□-150×150×6 (裏当て金あり)	25	0.3	資図 25	資図 26	資図 27		資図 28
		0.4	資図 29	資図 30	資図 31	資図 32	
		0.5	資図 33	資図 34	資図 35	資図 36	
□-135×135×4.5 (裏当て金あり)	30	0.3	資図 37	資図 38	資図 39		資図 40
		0.4	資図 41	資図 42	資図 43	資図 44	
		0.5	資図 45	資図 46	資図 47	資図 48	
□-150×150×6 (裏当て金なし)	25	0.3					資図 49
		0.5			資図 50	資図 51	
□-135×135×4.5 (裏当て金なし)	30	0.3					資図 52
		0.5			資図 53	資図 54	

曲げ圧縮実験結果に関する説明

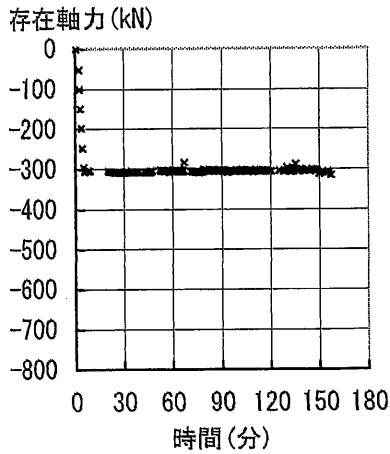
- ・ 資図(イ)～(リ)の横軸は、加力を開始してからの経過時間である。所定の温度に達した後、水平アクチュエーターに軸力を与える直前を 0 分としている。
- ・ 資図(イ)の縦軸は、水平アクチュエーターで計測された荷重である。資料編参考図 A に示す A 点における存在軸力である。水平アクチュエーターの暴走を避けるため、変位制御によって所定の軸力を維持した。
- ・ 資図(ロ)の縦軸は、加力側垂直アクチュエーターで計測された荷重である。資料編参考図 A に示す E 点における集中荷重である。火災階の加熱梁に生じる軸力に相当する荷重である。
- ・ 資図(ハ)の縦軸は、ピン支持側垂直アクチュエーターで計測された荷重である。資料編参考図 A に示す B 点における支点反力である。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。
- ・ 資図(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。
- ・ 資図(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。火災階における加熱梁の伸びだしに相当する変位である。
- ・ 資図(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。
- ・ 資図(ト)の縦軸は、資料編参考図 B 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。
- ・ 資図(チ)の縦軸は、資料編参考図 B 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。
- ・ 資図(リ)の縦軸は、各温度測定点において計測された、試験部分の鋼材温度である。



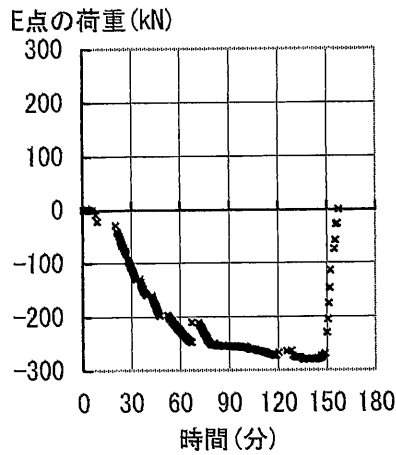
資料編参考図A 曲げ圧縮実験の実験装置



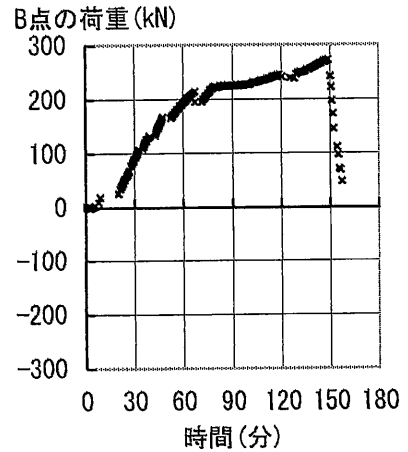
資料編参考図B 曲げ圧縮実験の変形測定装置



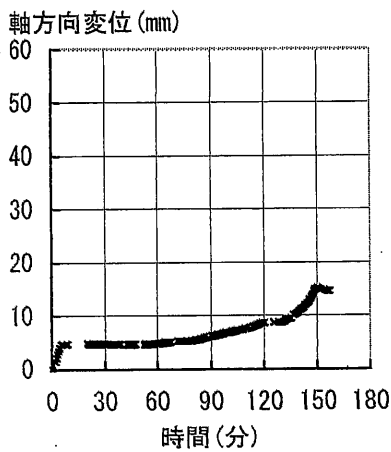
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



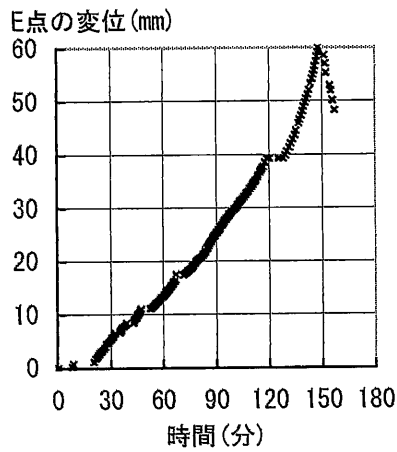
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



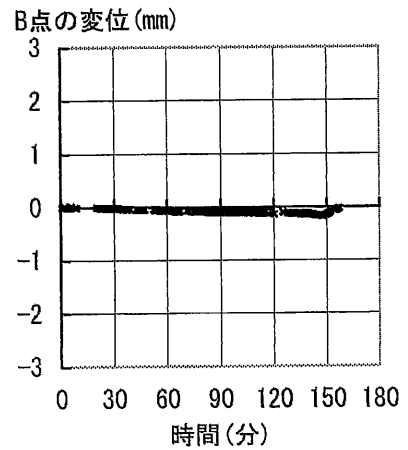
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



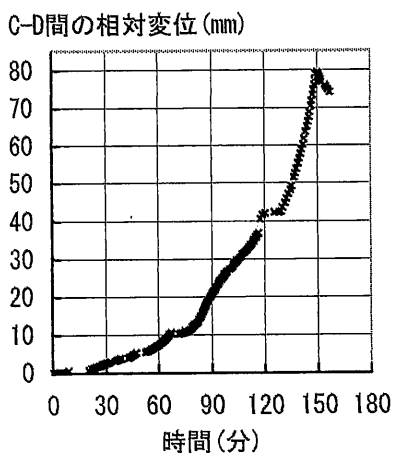
(ニ) 水平アクチュエーター変位



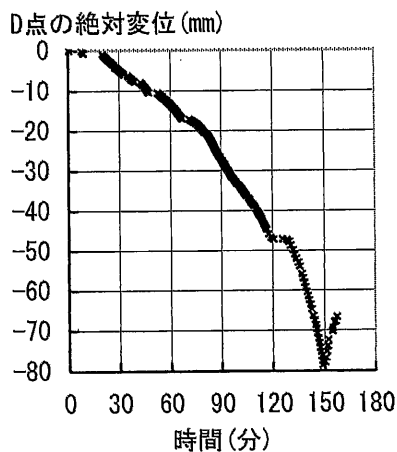
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



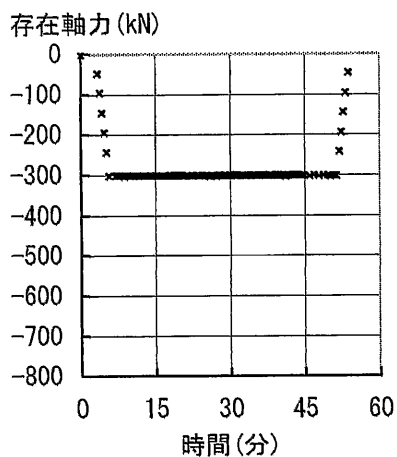
(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



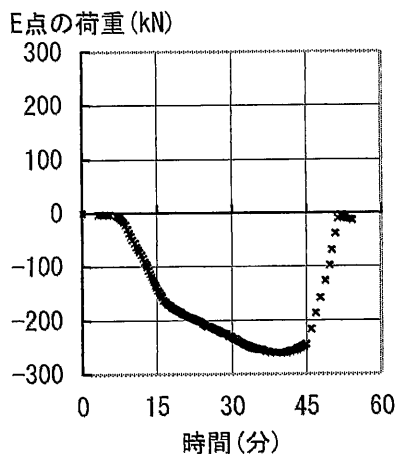
(チ) 変位計2の値 (δ_D)

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。

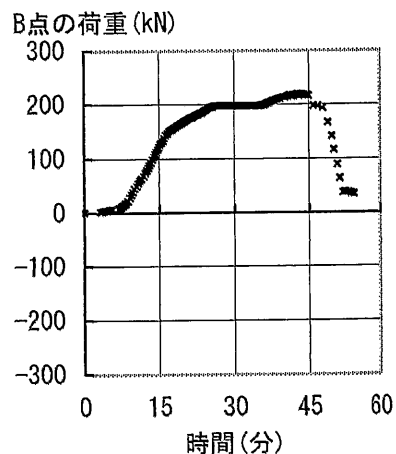
資図 1 H形断面部材，幅厚比 $b/t=7.5$ ，軸力比 0.3，常温



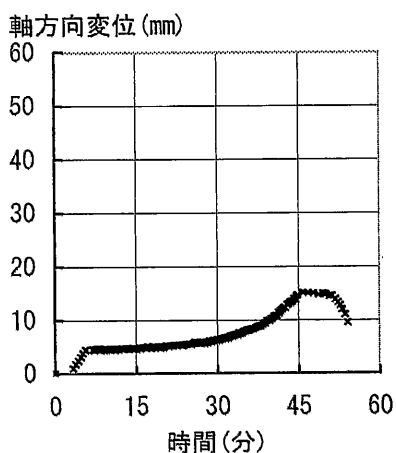
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



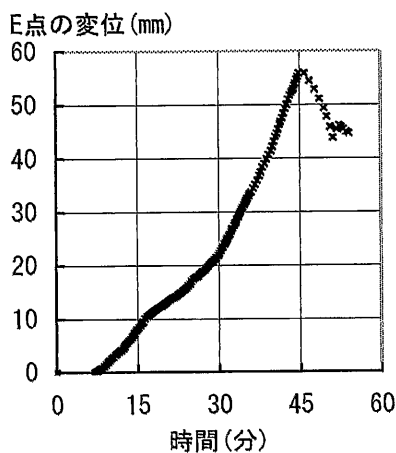
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



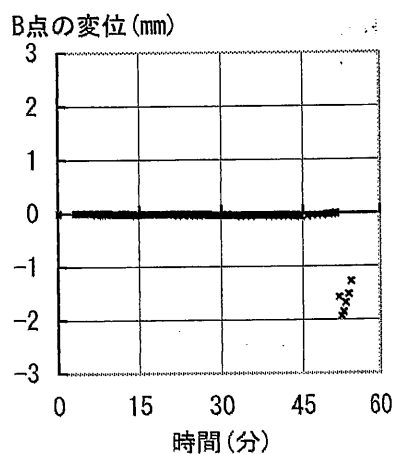
(ハ) ヒン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



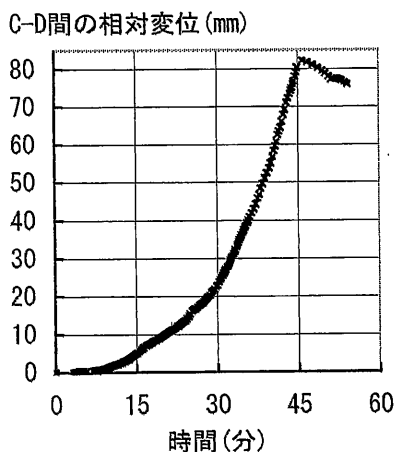
(ニ) 水平アクチュエーター変位



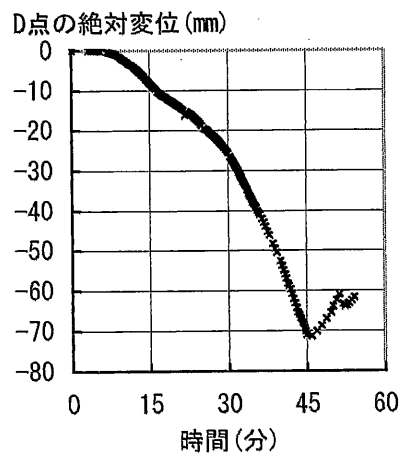
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



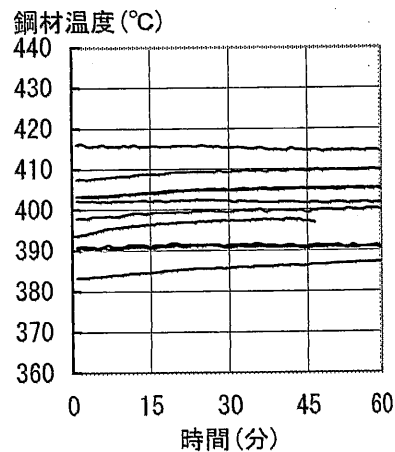
(ヘ) ヒン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{cp})



(フ) 変位計2の値 (δ_D)

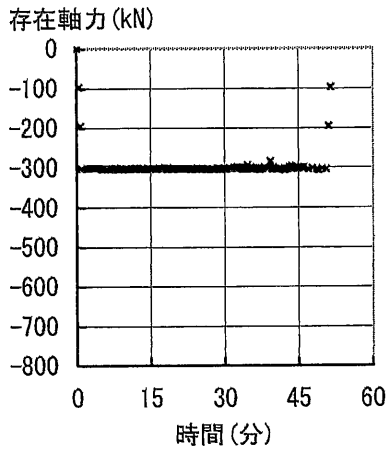


(リ) 鋼材温度

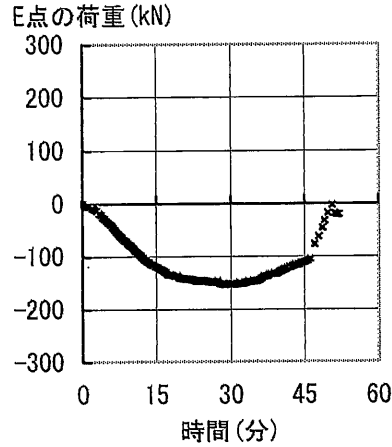
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

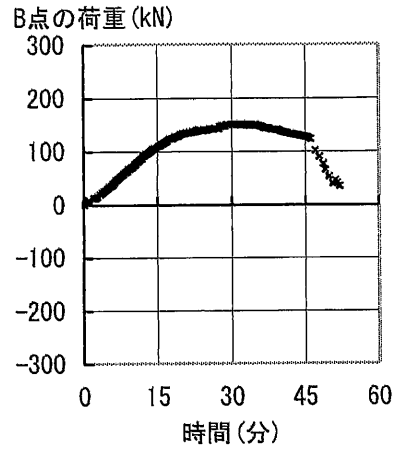
資図 2 H形断面材, 幅厚比 $b/t=7.5$, 軸力比 0.3, 鋼材温度 400°C



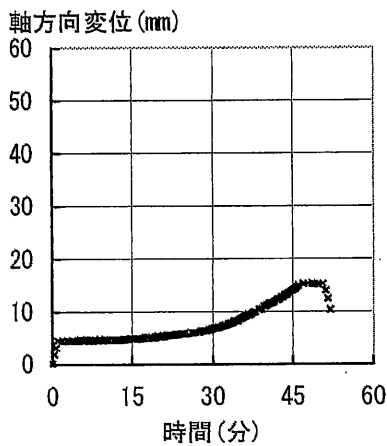
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



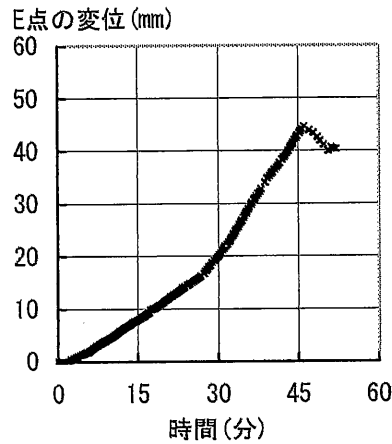
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



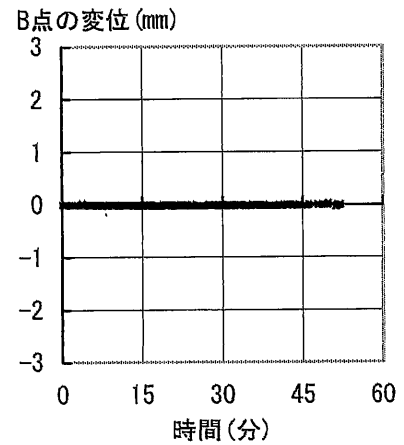
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



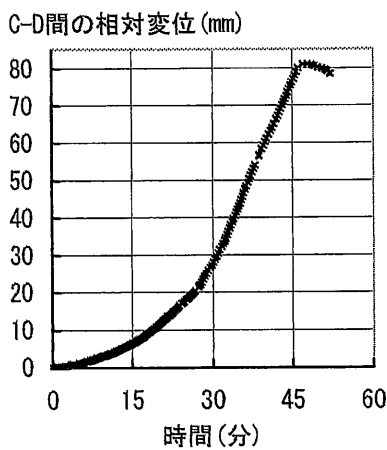
(ニ) 水平アクチュエーター変位



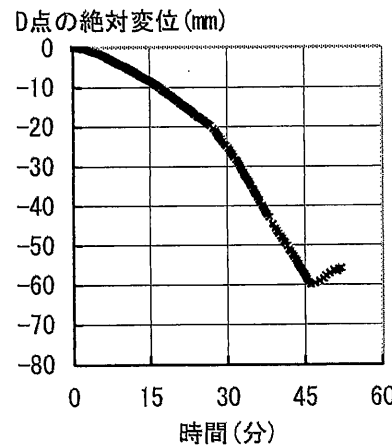
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



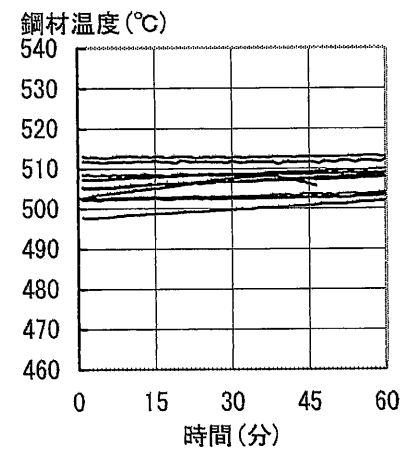
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

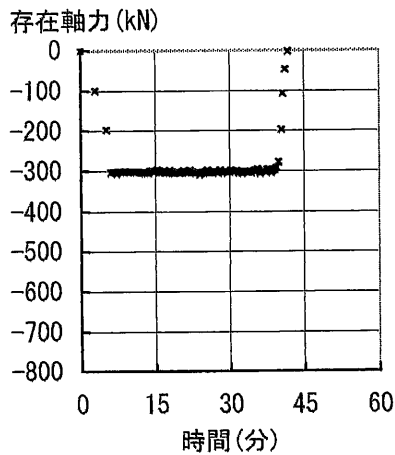


(リ) 鋼材温度

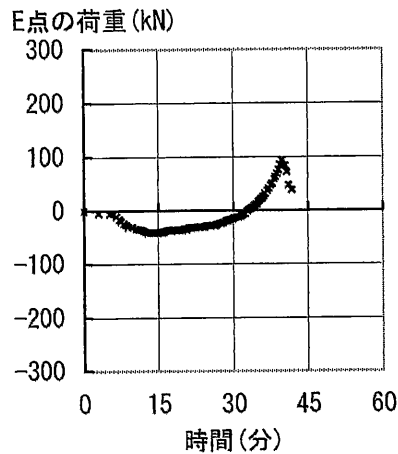
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

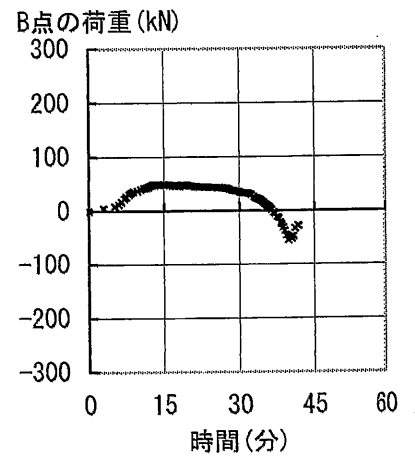
資図 3 H形断面部材，幅厚比 $b/t=7.5$ ，軸力比 0.3，鋼材温度 500°C



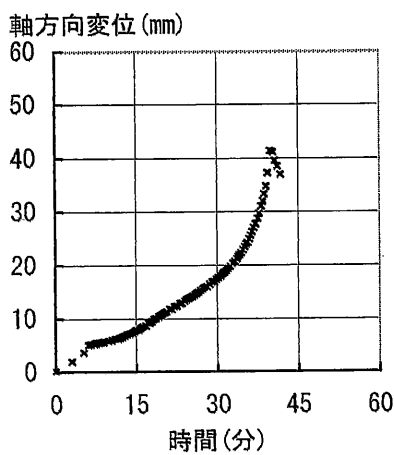
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



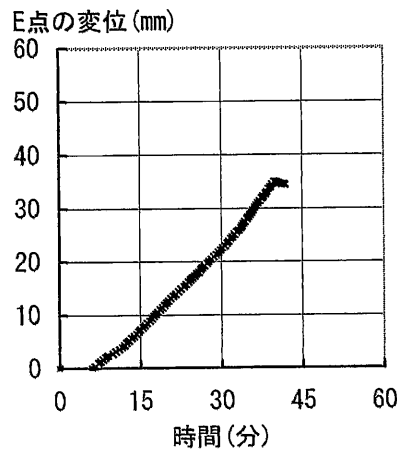
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



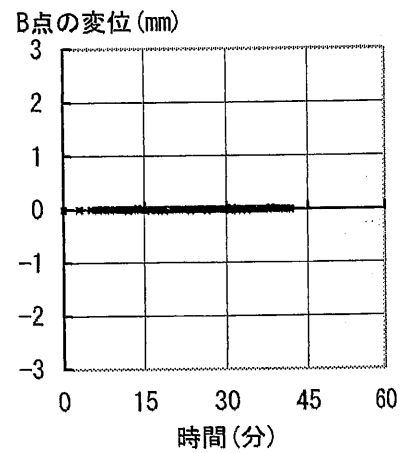
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



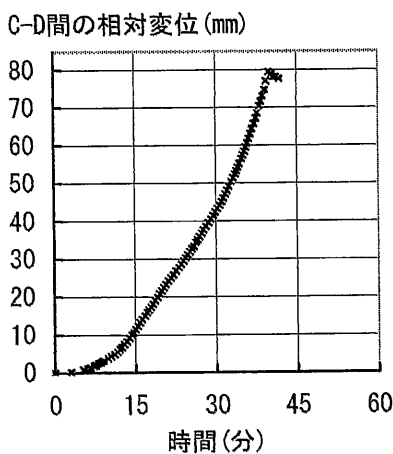
(ニ) 水平アクチュエーター変位



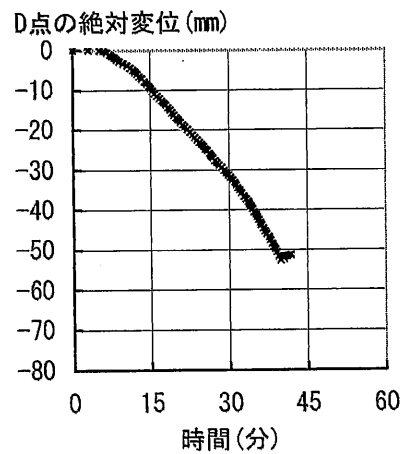
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



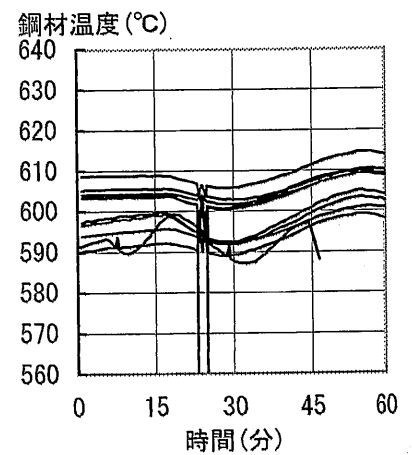
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



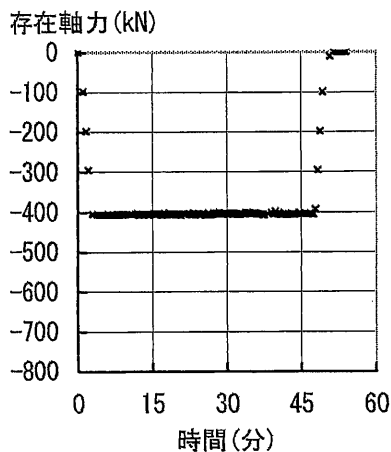
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



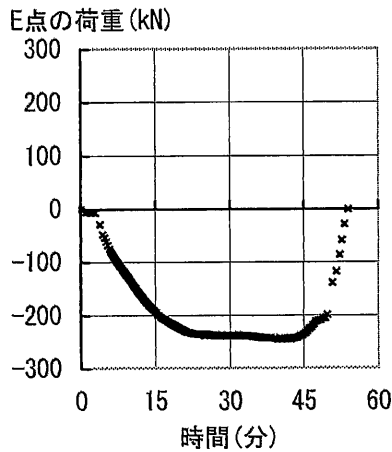
(リ) 鋼材温度

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。

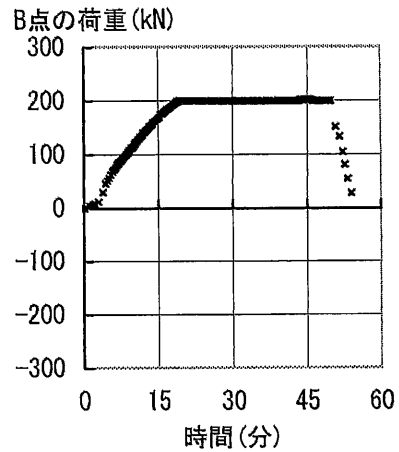
資図 4 H形断面部材，幅厚比 $b/t=7.5$ ，軸力比 0.3，鋼材温度 600°C



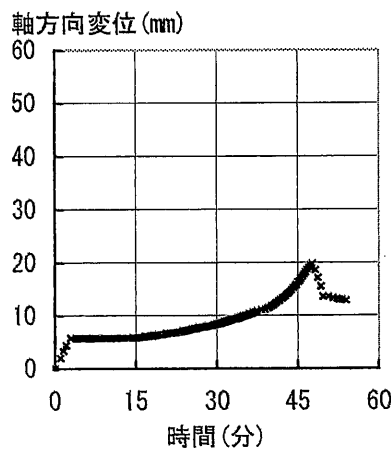
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



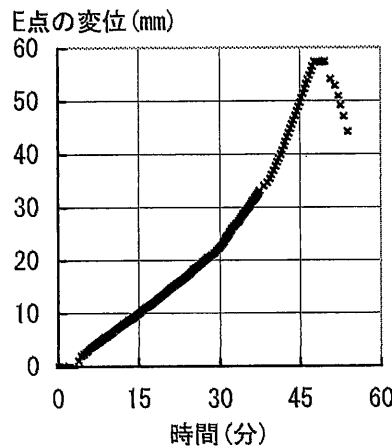
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



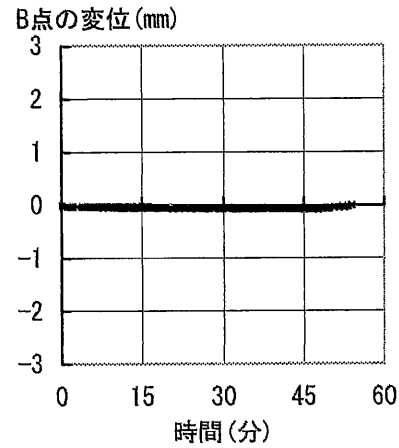
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



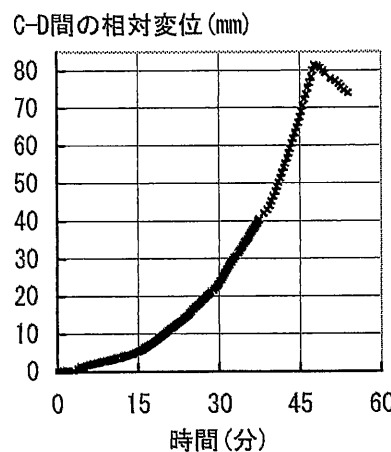
(ニ) 水平アクチュエーター変位



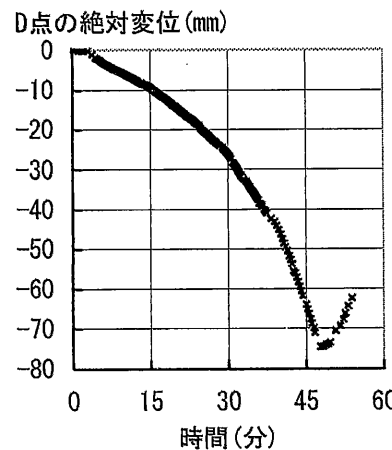
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



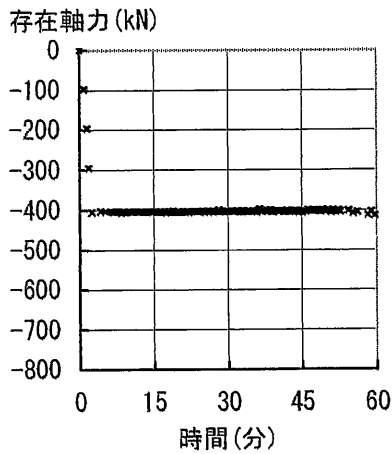
(ト) 変位計1の値 (δ_{c0})



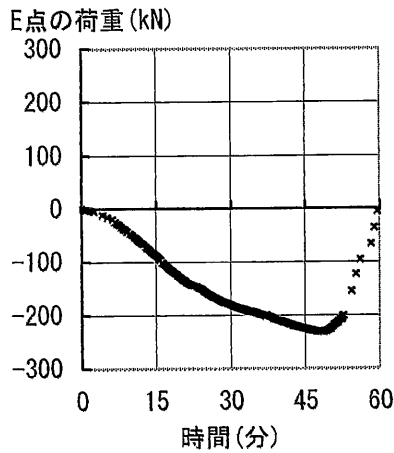
(チ) 変位計2の値 (δ_D)

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。

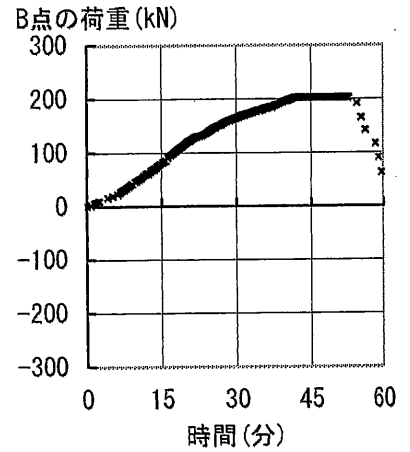
資図 5 H形断面部材，幅厚比 $b/t=7.5$ ，軸力比 0.4，常温



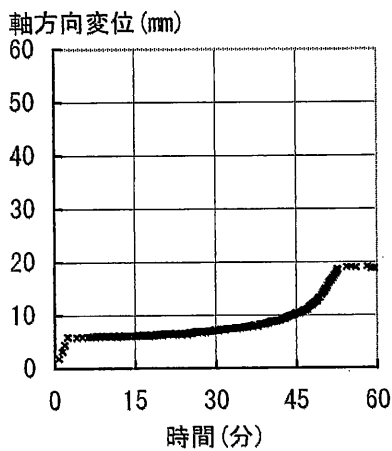
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



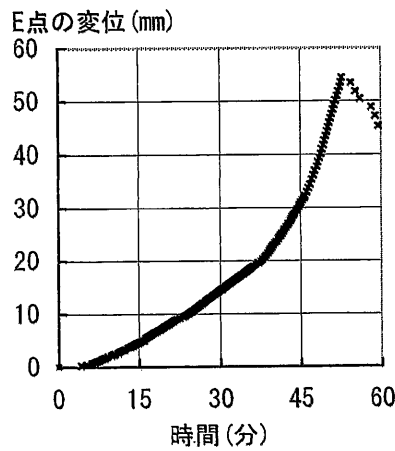
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



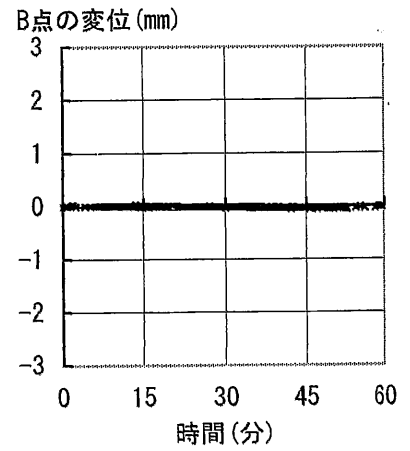
(ハ) ヒンジ支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



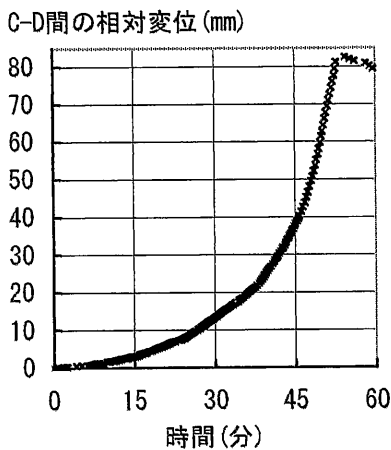
(ニ) 水平アクチュエーター変位



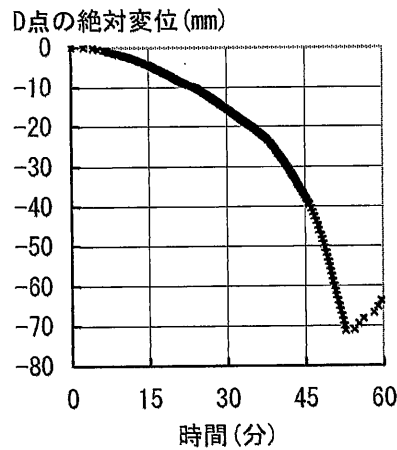
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



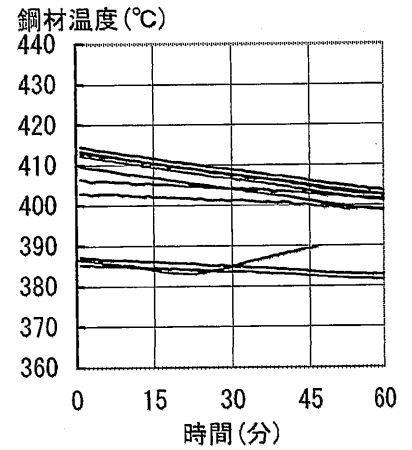
(ヘ) ヒンジ支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{cd})



(フ) 変位計2の値 (δ_d)

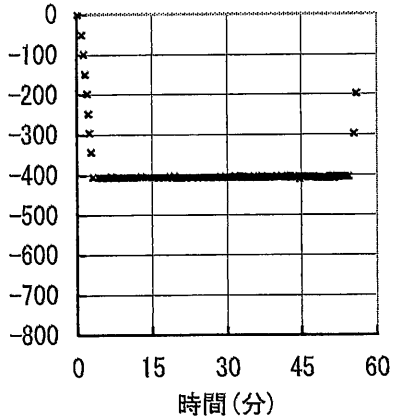


(リ) 鋼材温度

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。

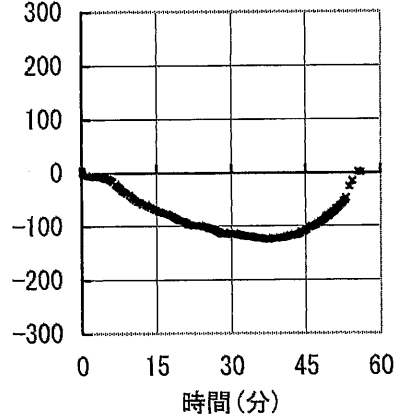
資図 6 H形断面部材, 幅厚比 $b/t=7.5$, 軸力比 0.4, 鋼材温度 400°C

存在軸力 (kN)



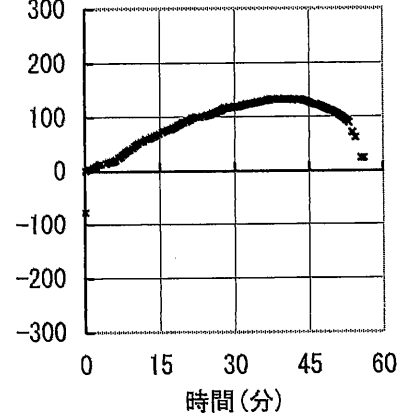
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)

E点の荷重 (kN)



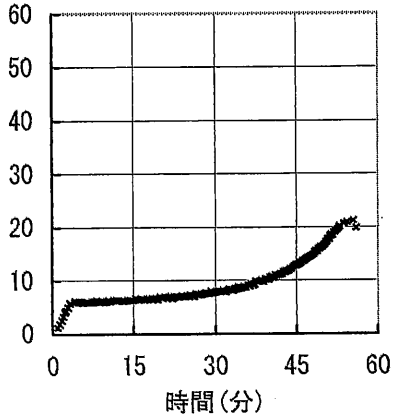
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)

B点の荷重 (kN)



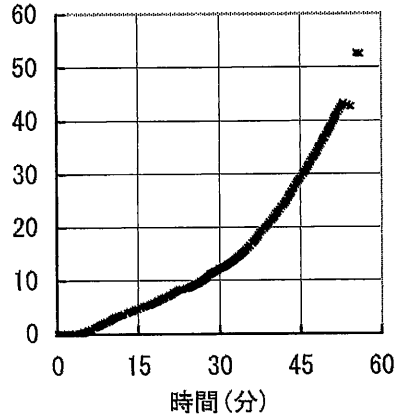
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)

軸方向変位 (mm)



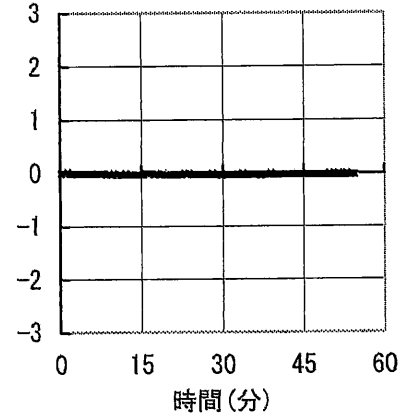
(ニ) 水平アクチュエーター変位

E点の変位 (mm)



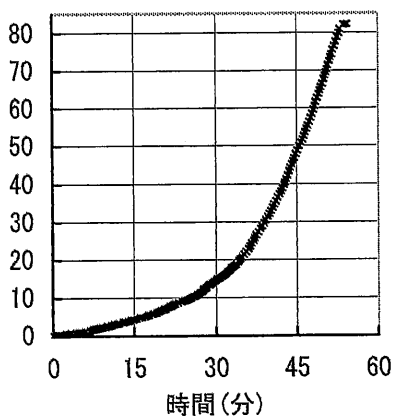
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位

B点の変位 (mm)



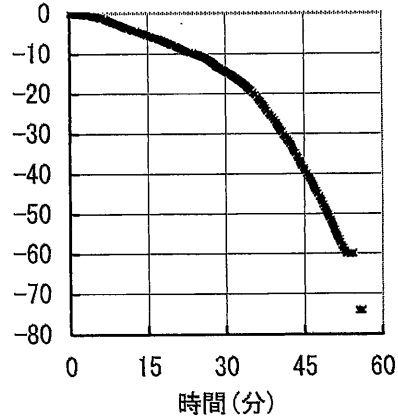
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位

C-D間の相対変位 (mm)



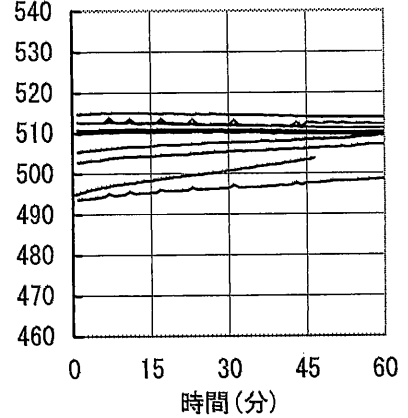
(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})

D点の絶対変位 (mm)



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

鋼材温度 ($^{\circ}\text{C}$)

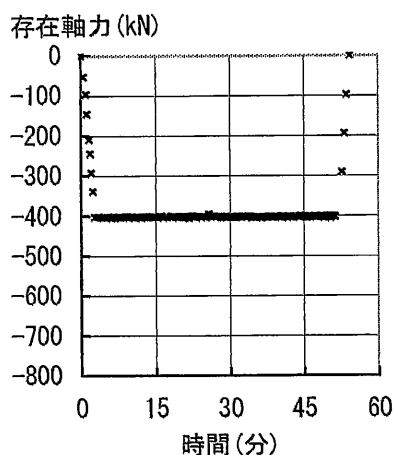


(リ) 鋼材温度

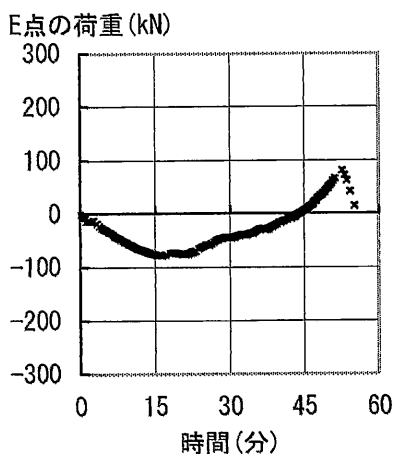
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

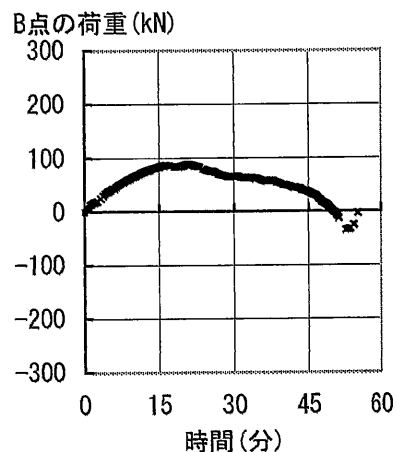
資図 7 H形断面材材, 幅厚比 $b/t=7.5$, 軸力比 0.4, 鋼材温度 500°C



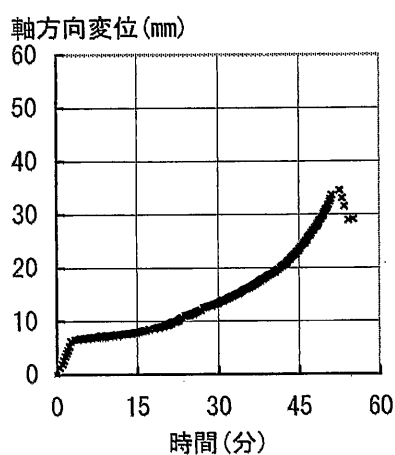
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



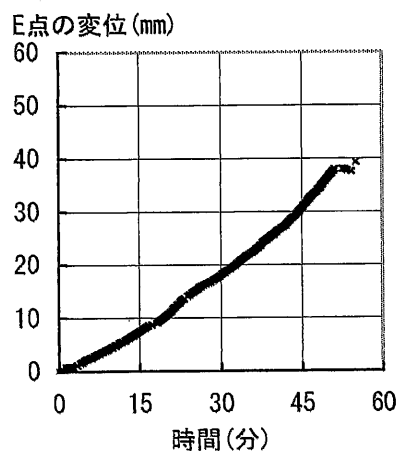
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



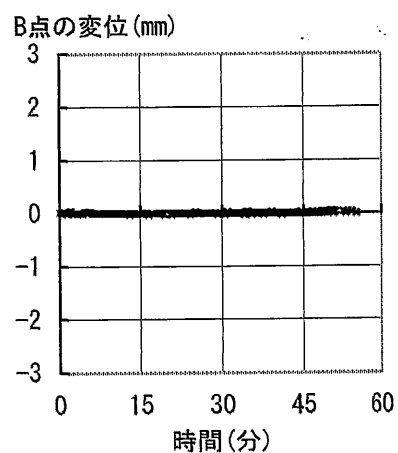
(ハ) ヒン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



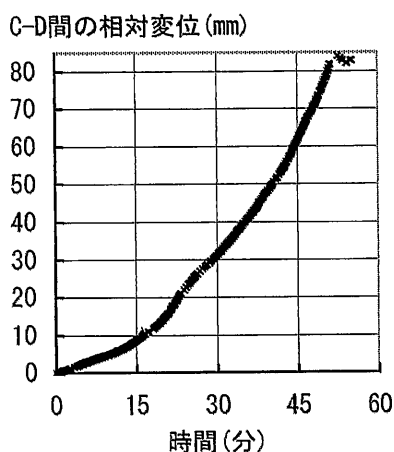
(ニ) 水平アクチュエーター変位



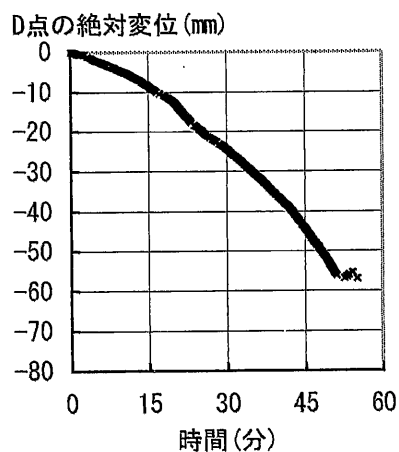
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



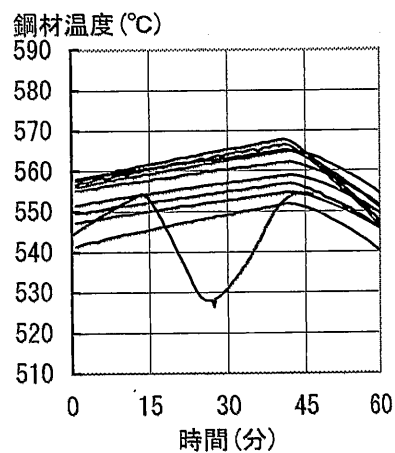
(ヘ) ヒン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

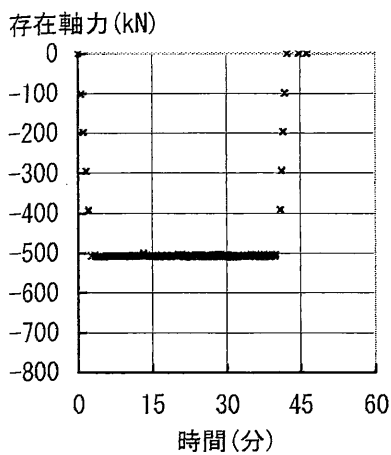


(リ) 鋼材温度

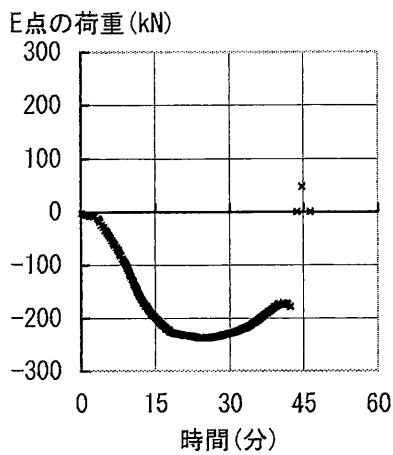
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

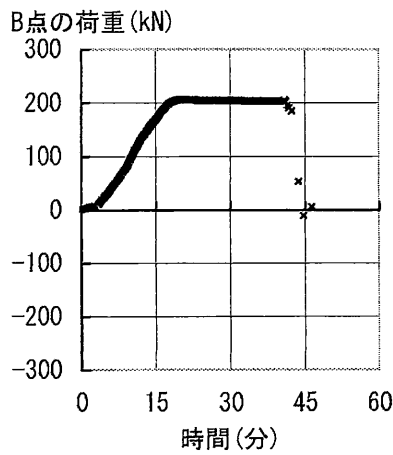
資図 8 H形断面材, 幅厚比 $b/t=7.5$, 軸力比 0.4, 鋼材温度 550°C



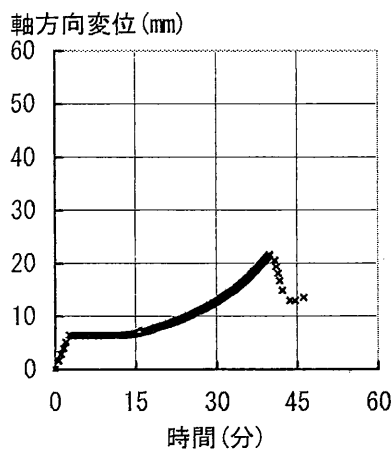
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



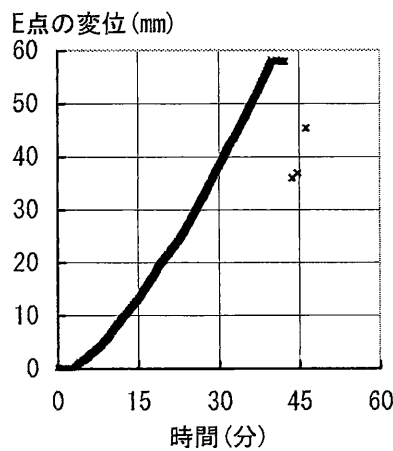
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



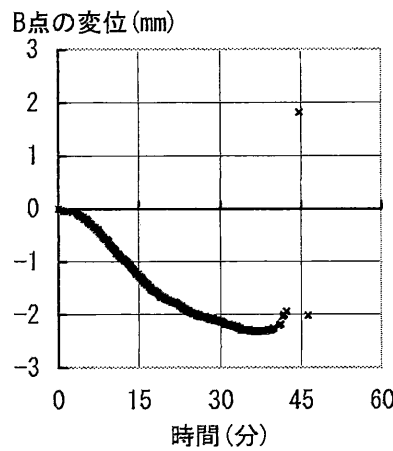
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



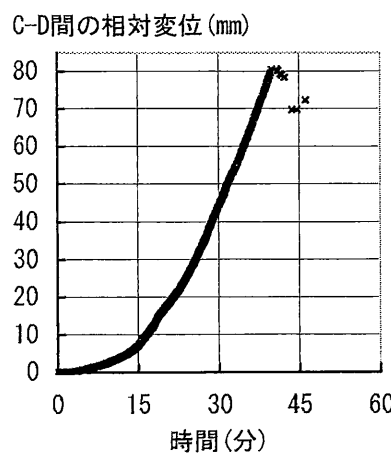
(ニ) 水平アクチュエーター変位



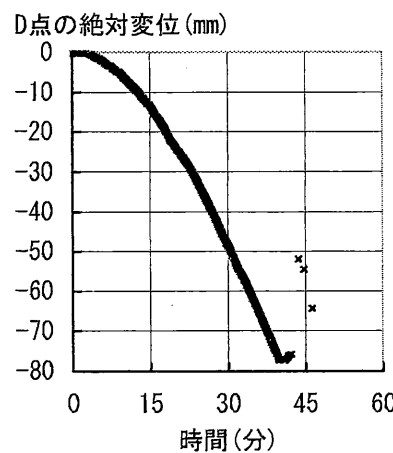
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



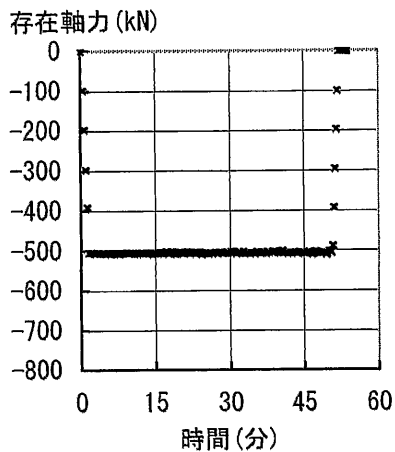
(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



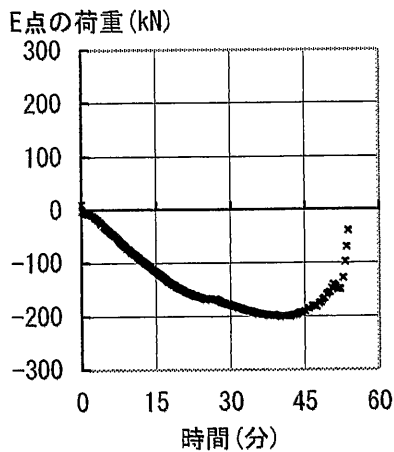
(チ) 変位計2の値 (δ_D)

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。

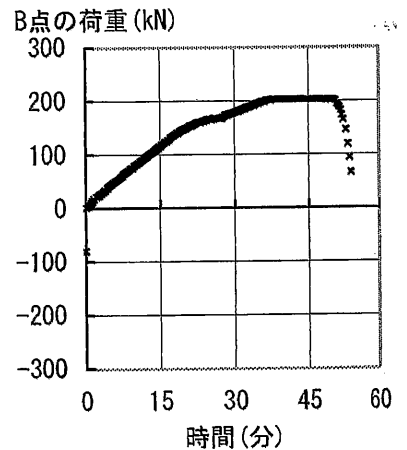
資図 9 H形断面材, 幅厚比 $b/t=7.5$, 軸力比 0.5, 常温



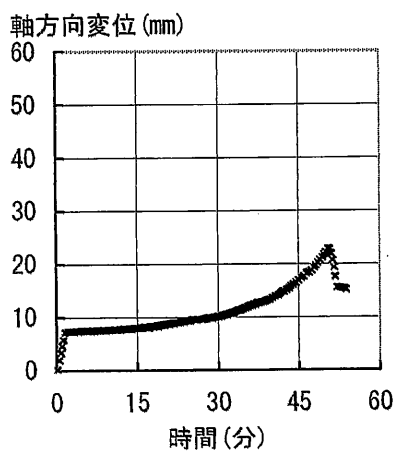
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



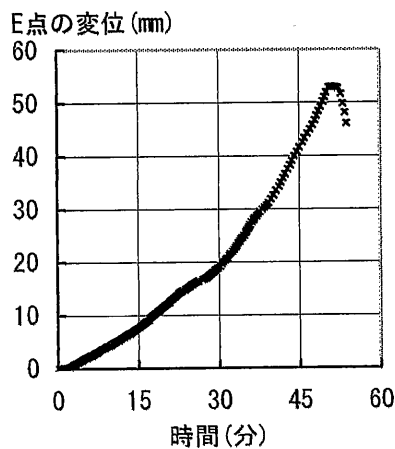
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



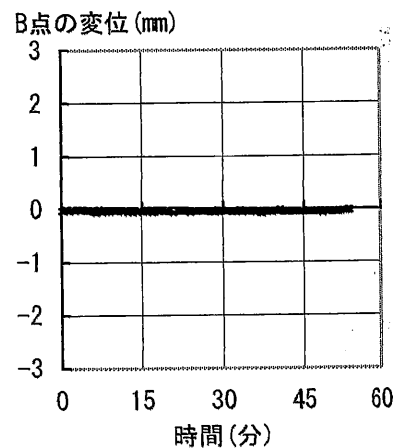
(ハ) ヒン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



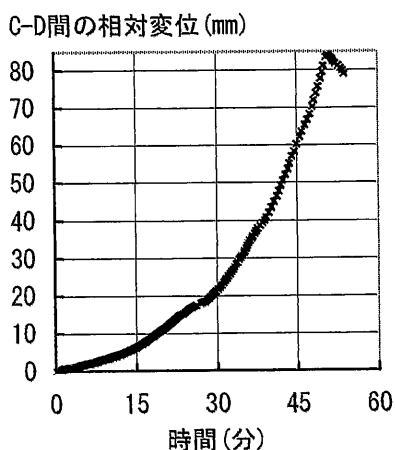
(ニ) 水平アクチュエーター変位



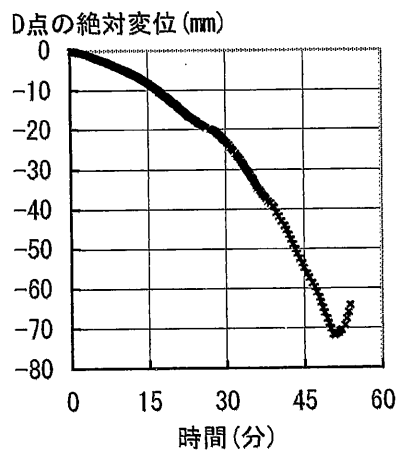
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



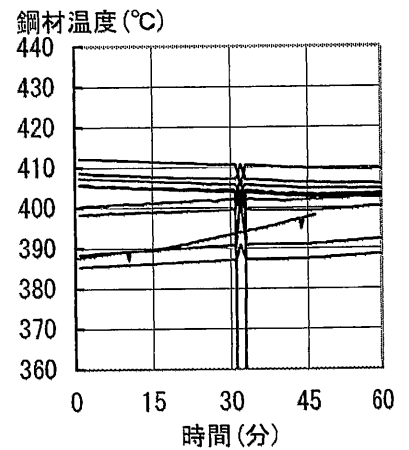
(ヘ) ヒン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



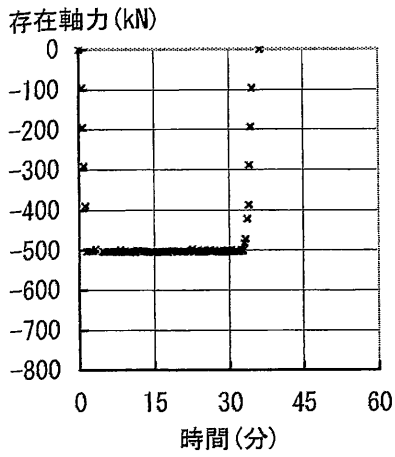
(フ) 変位計2の値 (δ_D)



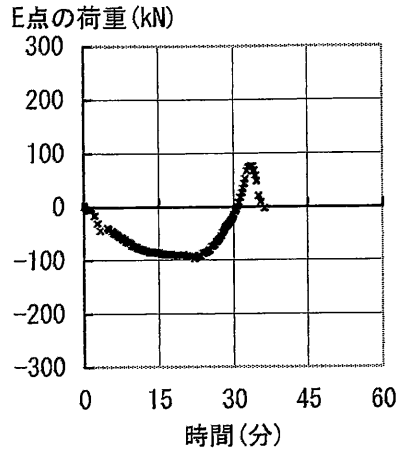
(リ) 鋼材温度

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。

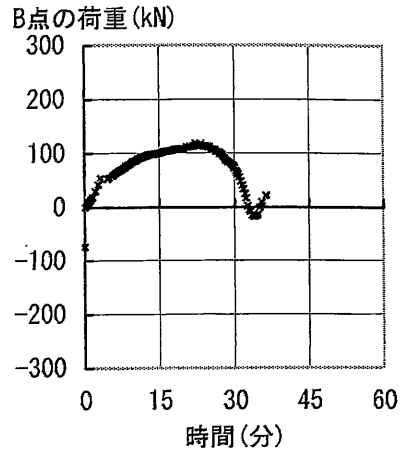
資図 10 H形断面部材，幅厚比 $b/t=7.5$ ，軸力比 0.5，鋼材温度 400°C



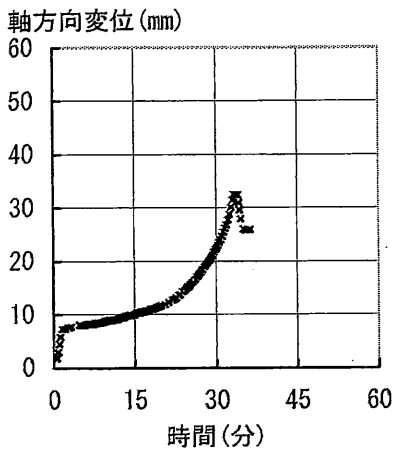
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



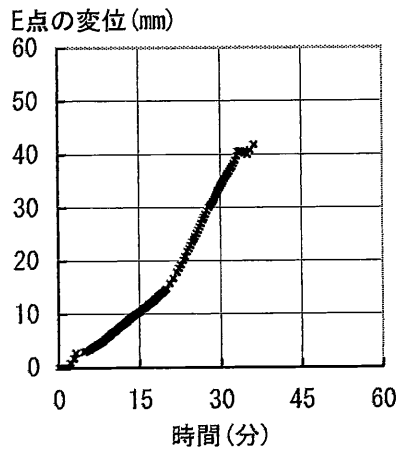
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



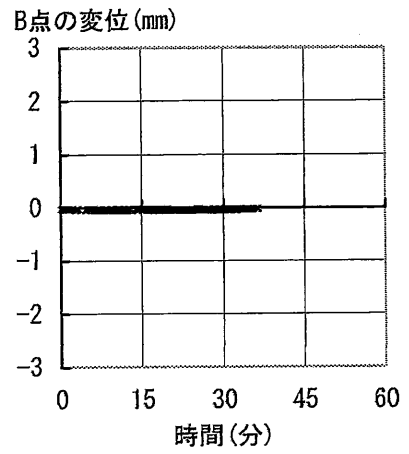
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



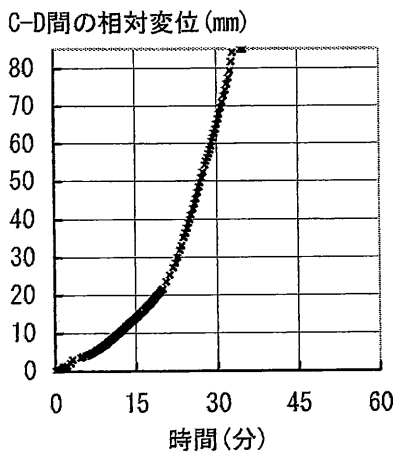
(ニ) 水平アクチュエーター変位



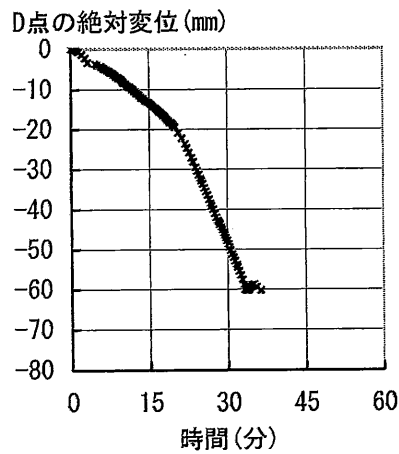
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



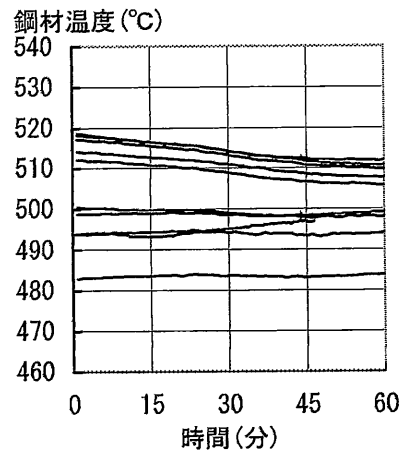
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



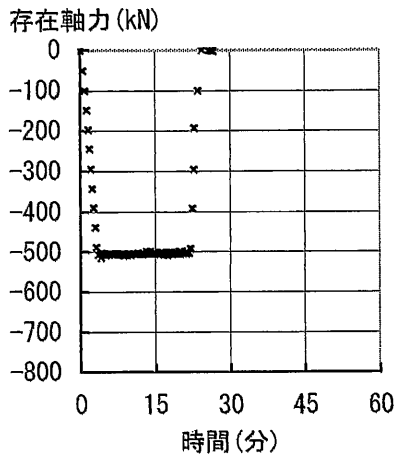
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



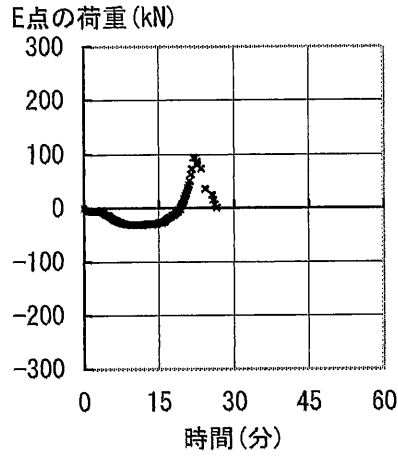
(リ) 鋼材温度

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。

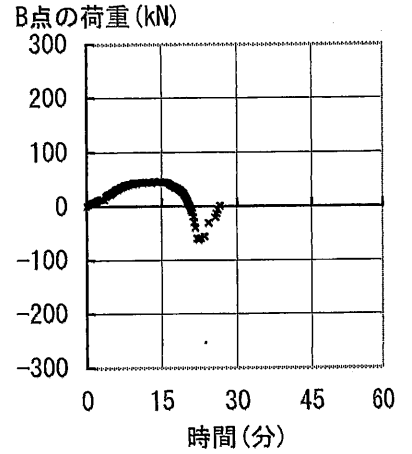
資図 11 H形断面部材，幅厚比 $b/t=7.5$ ，軸力比 0.5，鋼材温度 500°C



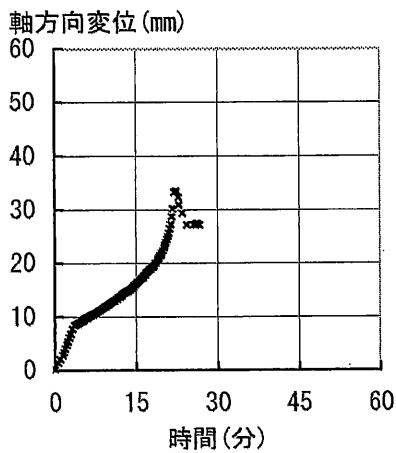
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



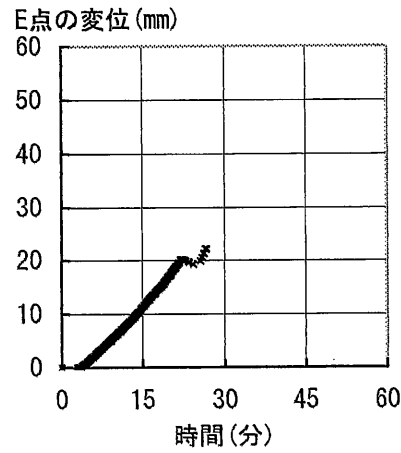
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



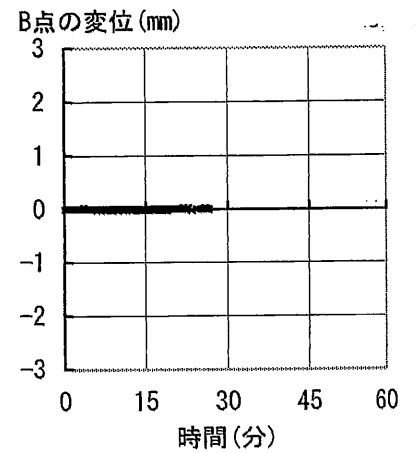
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



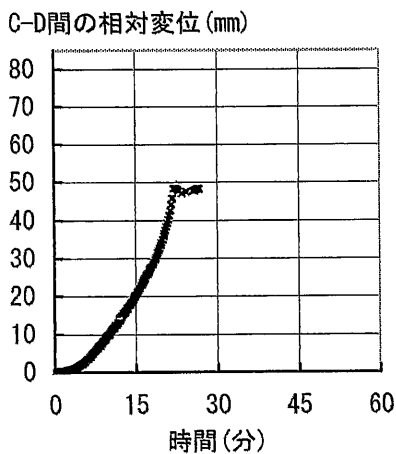
(ニ) 水平アクチュエーター変位



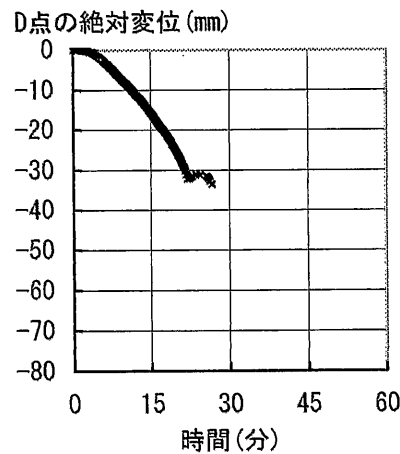
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



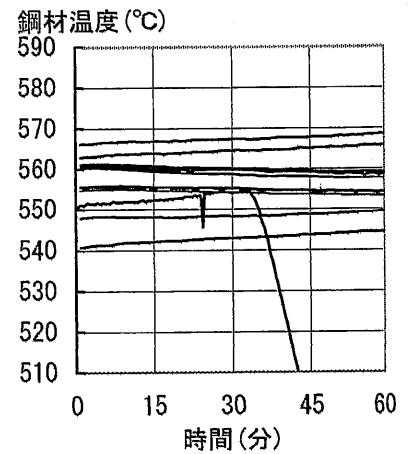
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



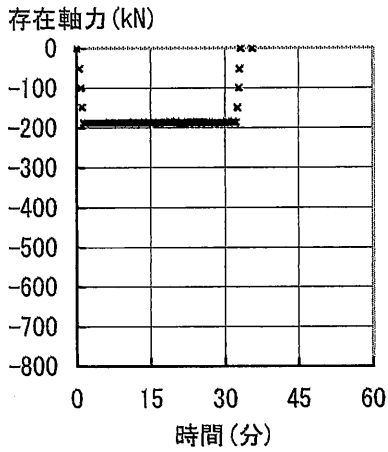
(フ) 変位計2の値 (δ_D)



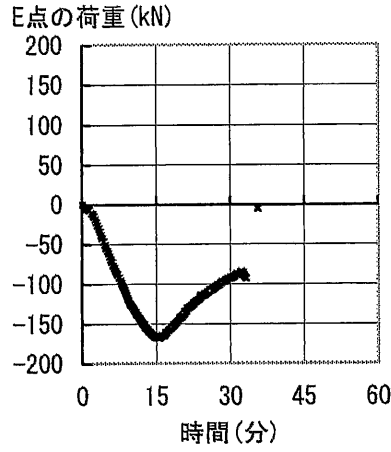
(リ) 鋼材温度

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。

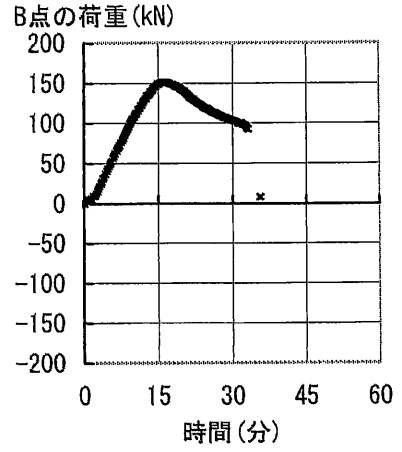
資図 12 H形断面部材，幅厚比 $b/t=7.5$ ，軸力比 0.5，鋼材温度 550°C



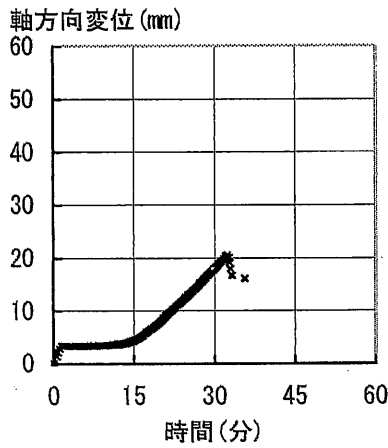
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



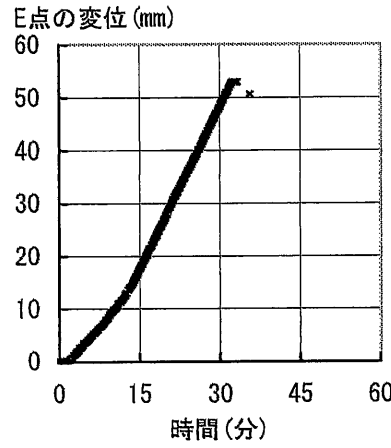
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



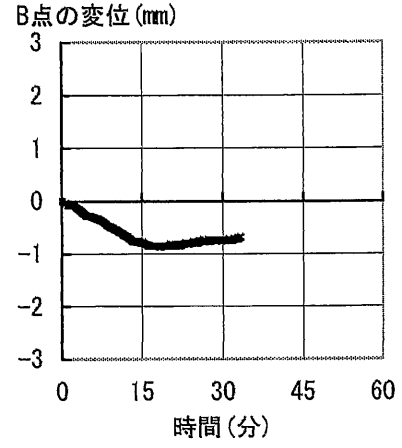
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



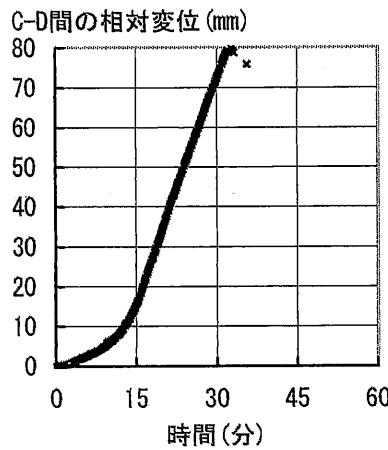
(ニ) 水平アクチュエーター変位



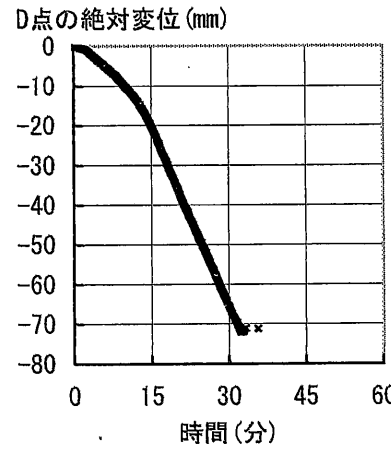
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



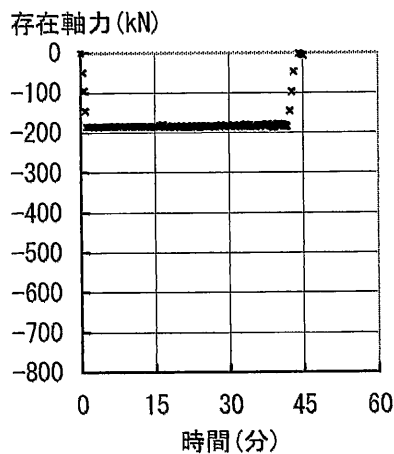
(ト) 変位計1の値 (δ_{cp})



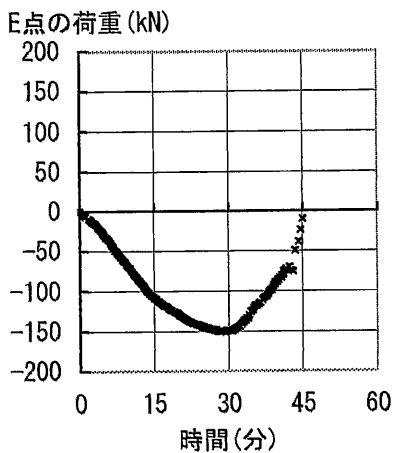
(フ) 変位計2の値 (δ_D)

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。

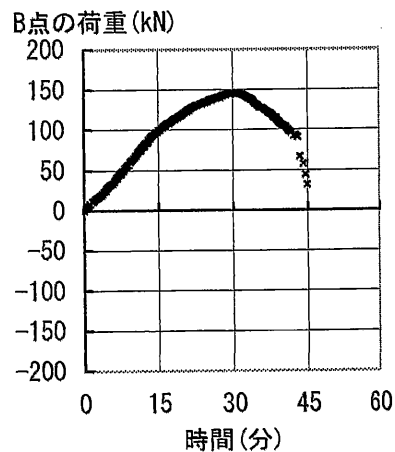
資図 13 H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ ，軸力比 0.3，常温



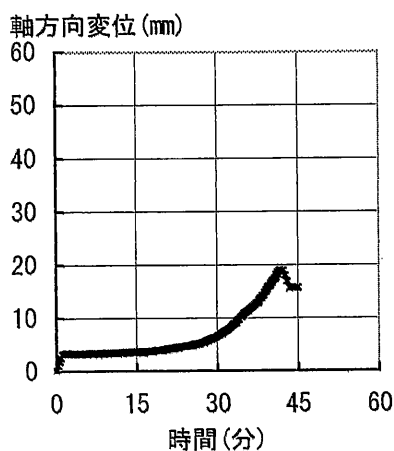
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



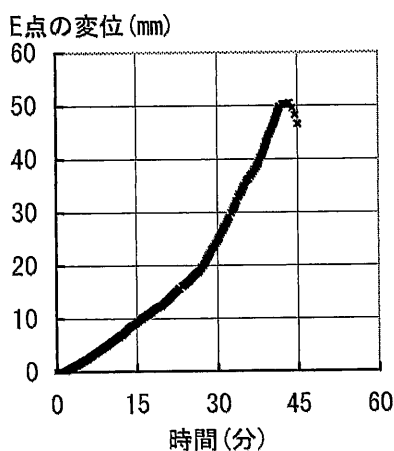
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



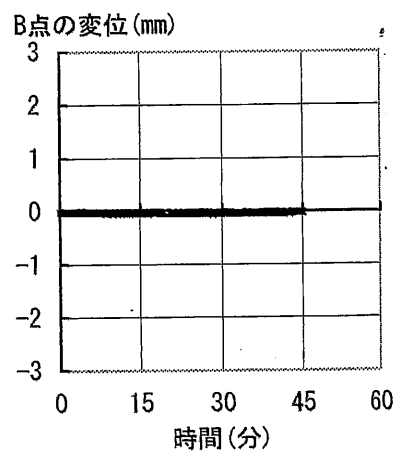
(ハ) ヒン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



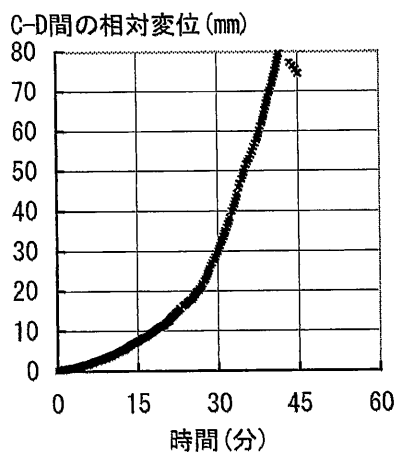
(ニ) 水平アクチュエーター変位



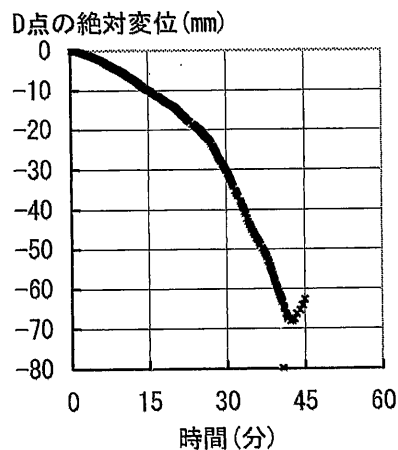
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



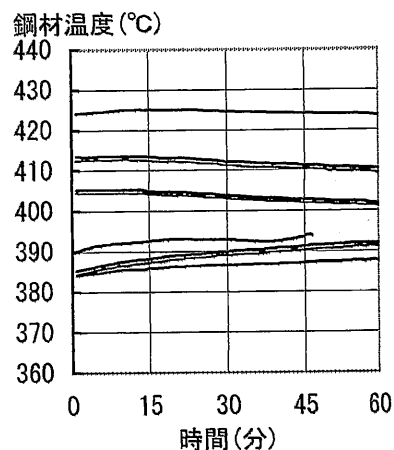
(ヘ) ヒン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

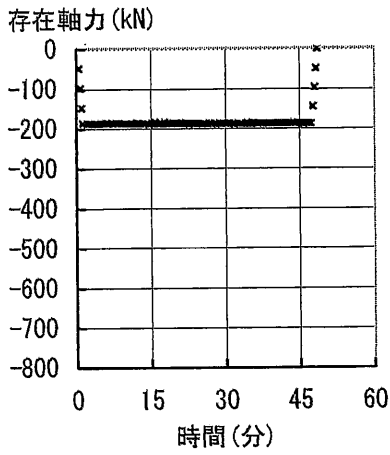


(リ) 鋼材温度

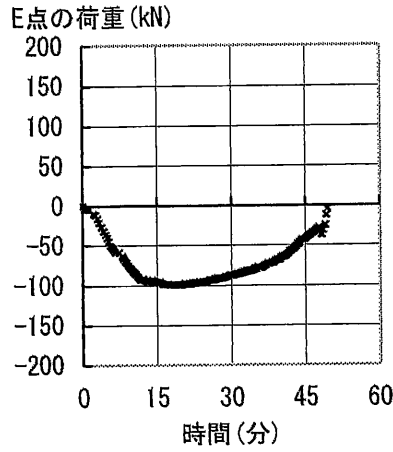
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

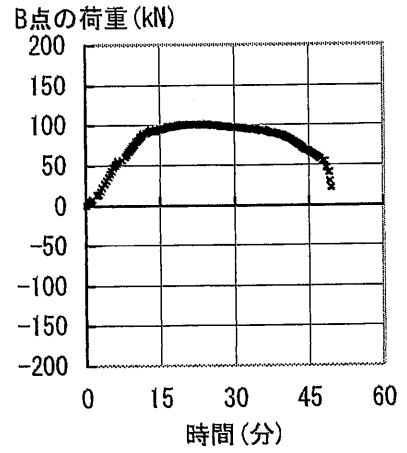
資図 14 H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ ，軸力比 0.3，鋼材温度 400°C



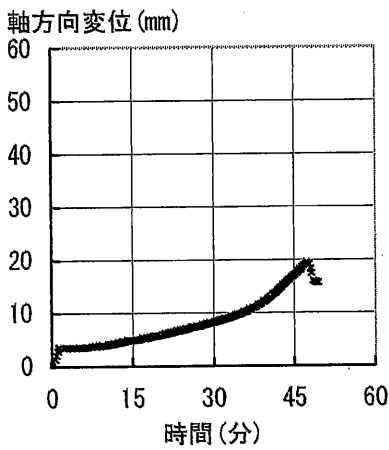
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



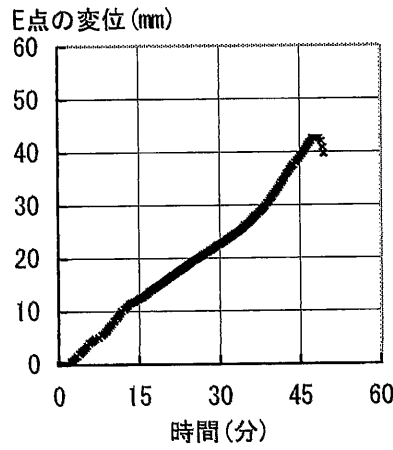
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



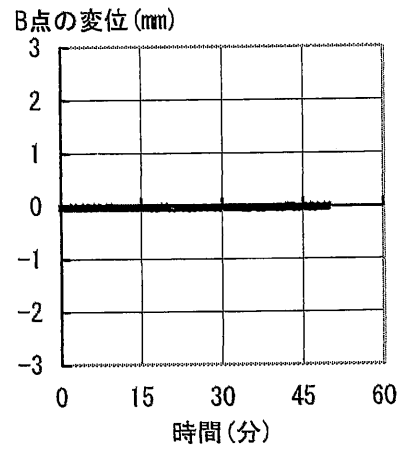
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



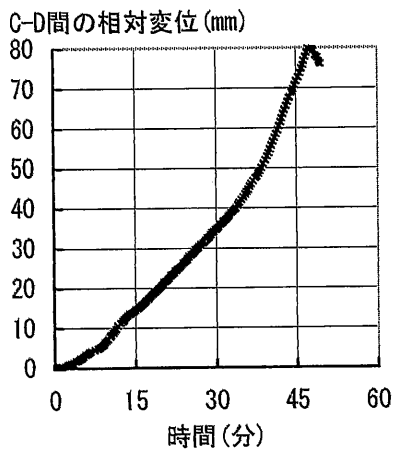
(ニ) 水平アクチュエーター変位



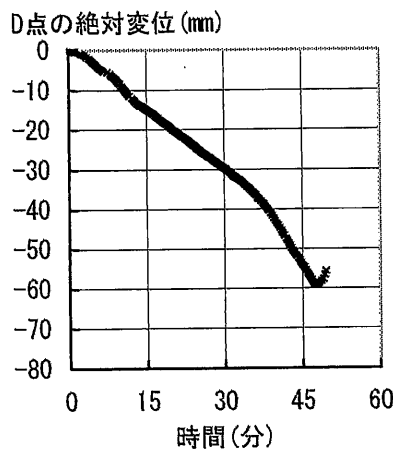
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



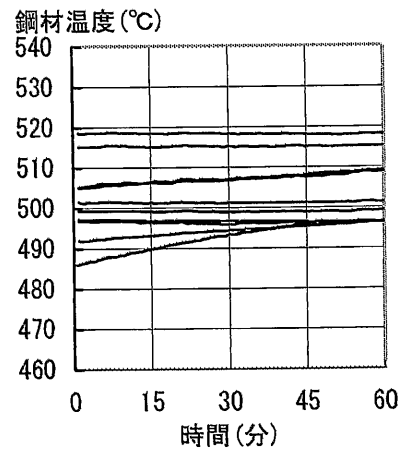
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{c0})



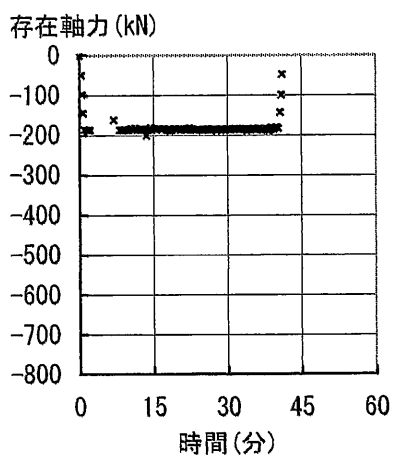
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



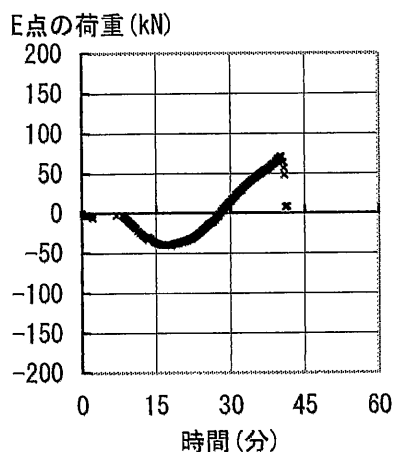
(リ) 鋼材温度

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。

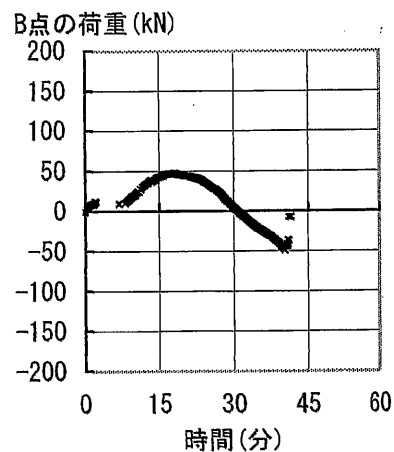
資図 15 H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ ，軸力比 0.3，鋼材温度 500°C



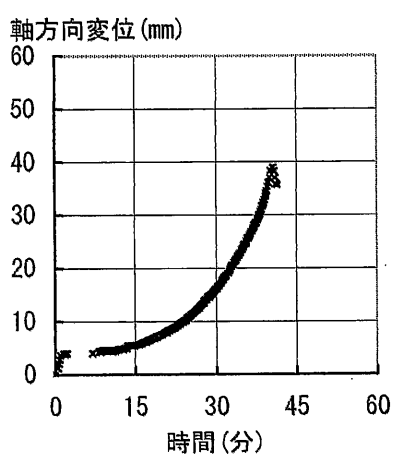
(i) 水平アクチュエーター荷重 (P)



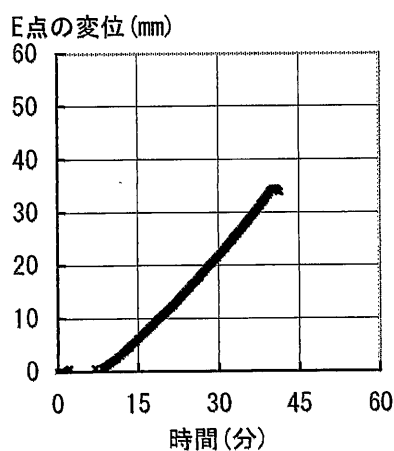
(d) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



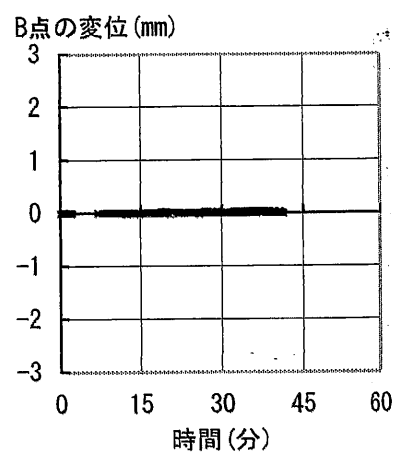
(h) ヒール支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



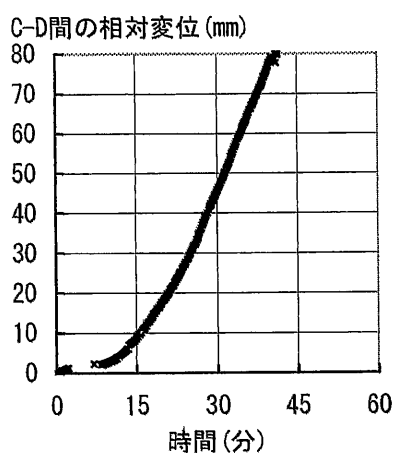
(e) 水平アクチュエーター変位



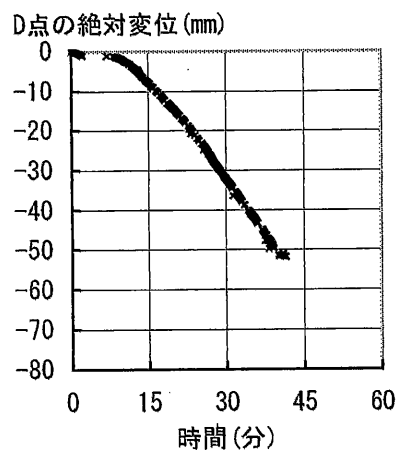
(j) 加力側垂直アクチュエーター変位



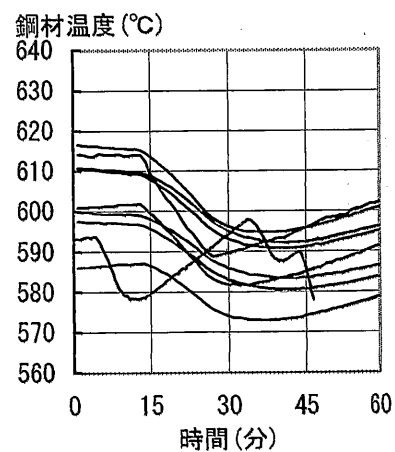
(i) ヒール支持側垂直アクチュエーター変位



(k) 変位計1の値 (δ_{CD})



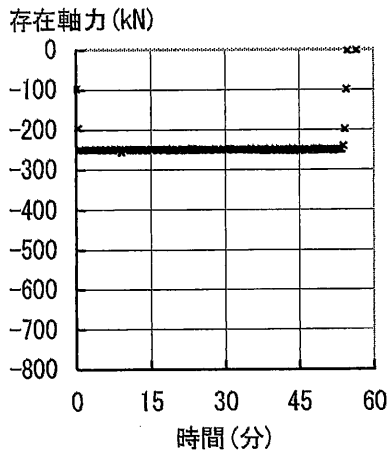
(l) 変位計2の値 (δ_D)



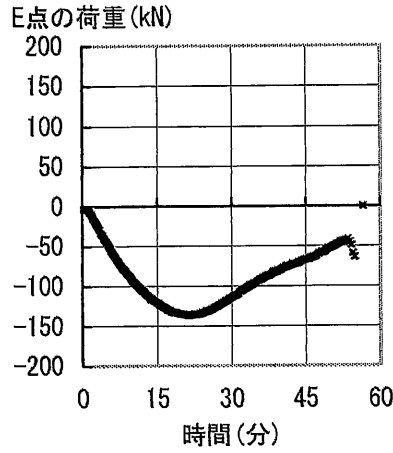
(m) 鋼材温度

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。

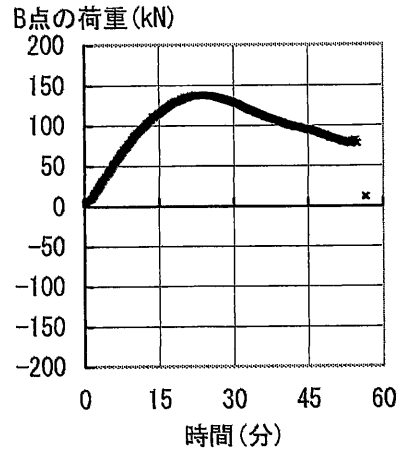
資図 16 H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ ，軸力比 0.3，鋼材温度 600°C



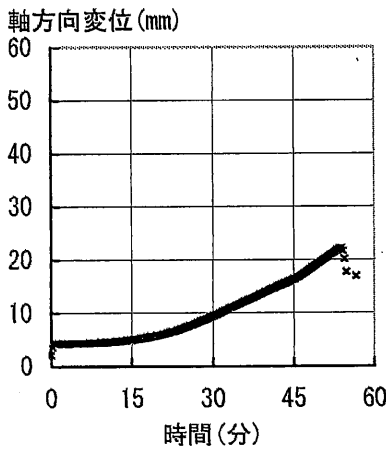
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



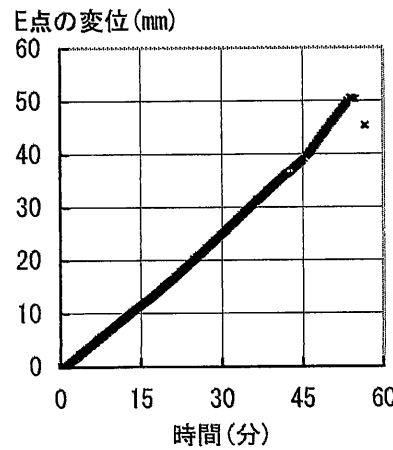
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



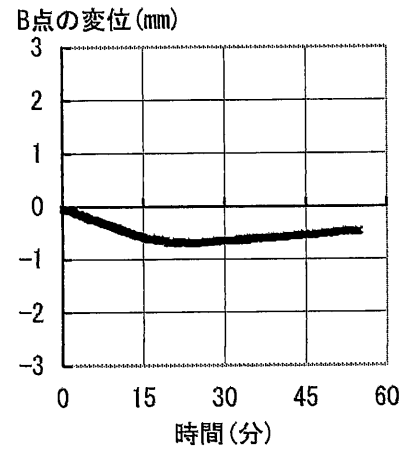
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



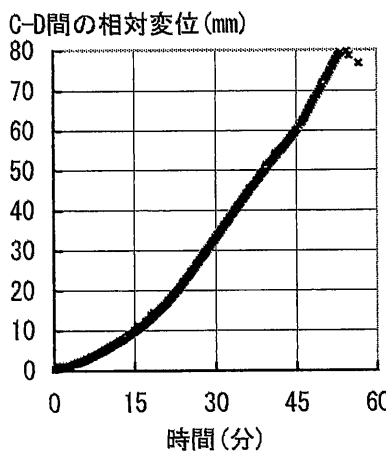
(ニ) 水平アクチュエーター変位



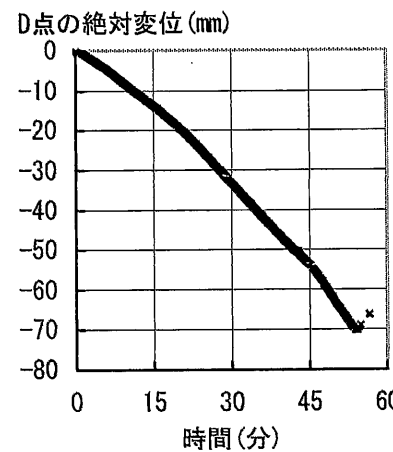
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



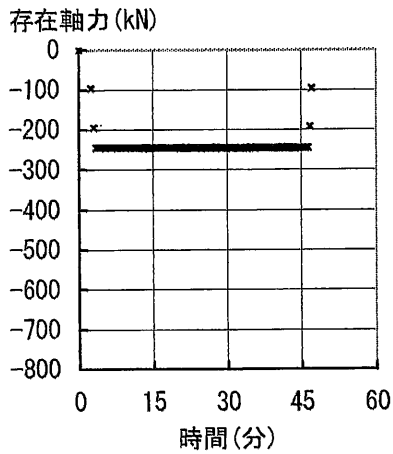
(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



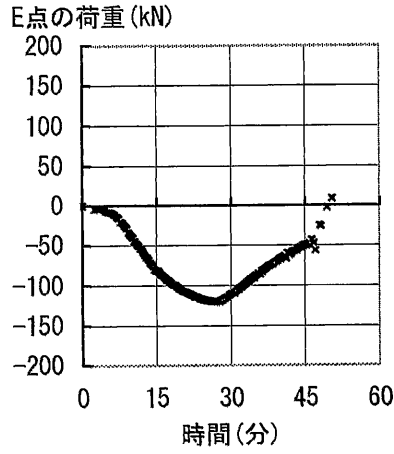
(チ) 変位計2の値 (δ_D)

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。

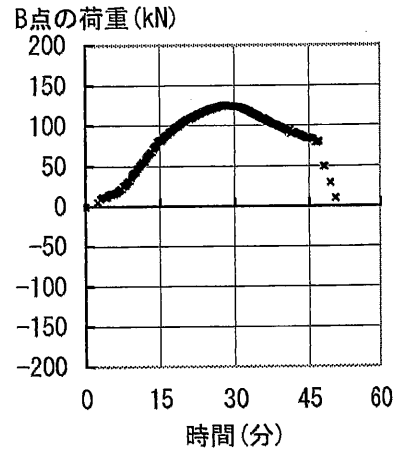
資図 17 H形断面材, 幅厚比 $b/t=10$, 軸力比 0.4, 常温



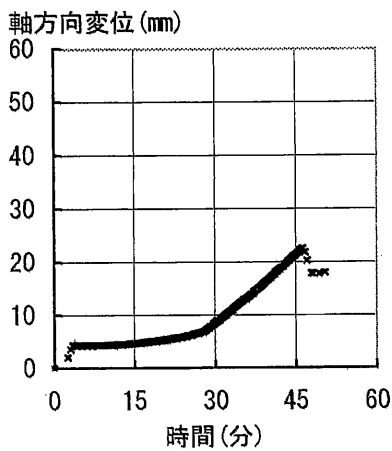
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



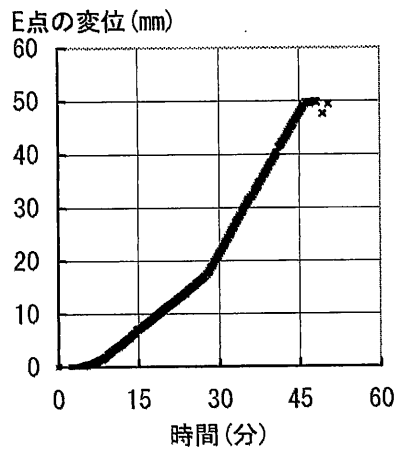
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



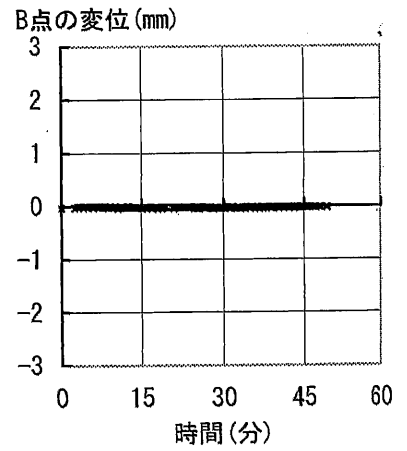
(ハ) ヒン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



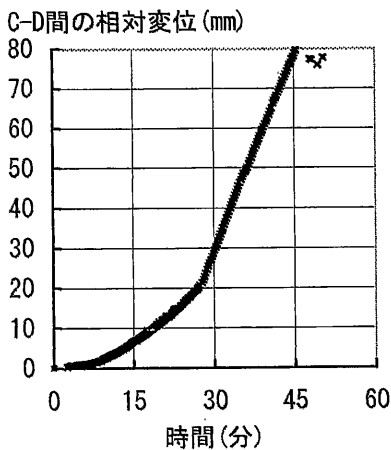
(ニ) 水平アクチュエーター変位



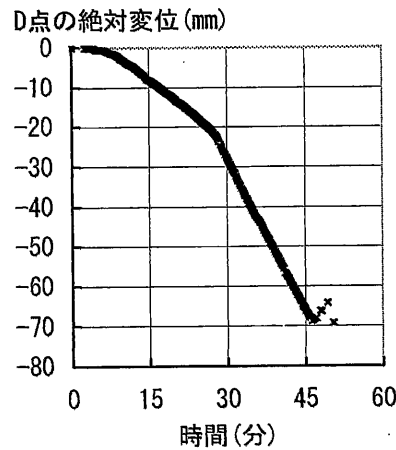
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



(ハ) ヒン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

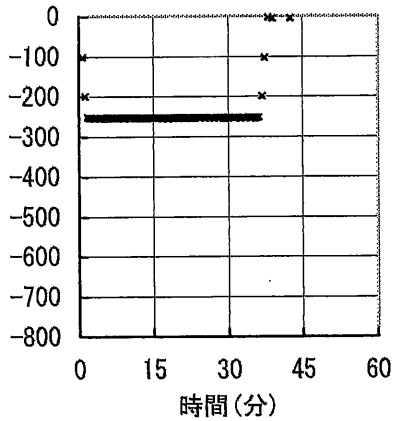
本実験における鋼材温度のデータは、実験終了時に誤って消去されたため記録として残っていない。

(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。

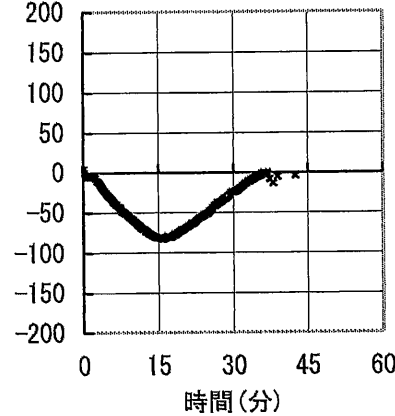
資図 18 H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ ，軸力比 0.4，鋼材温度 400°C

存在軸力 (kN)



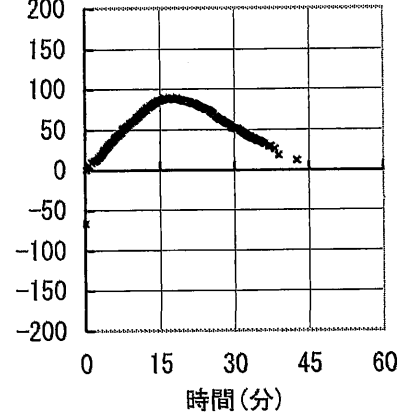
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)

E点の荷重 (kN)



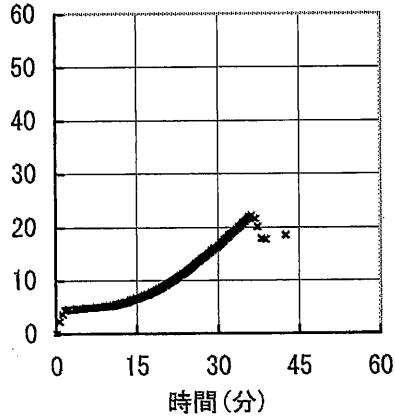
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)

B点の荷重 (kN)



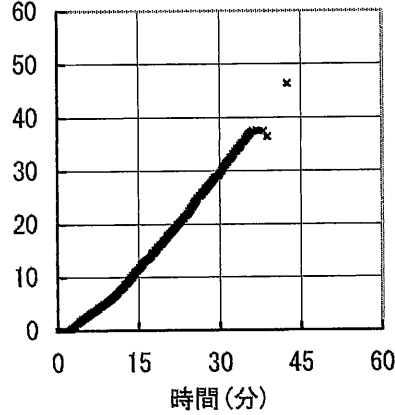
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)

軸方向変位 (mm)



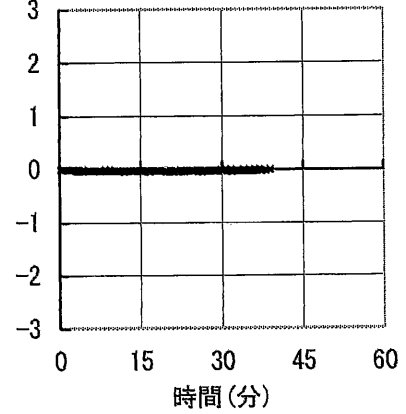
(ニ) 水平アクチュエーター変位

E点の変位 (mm)



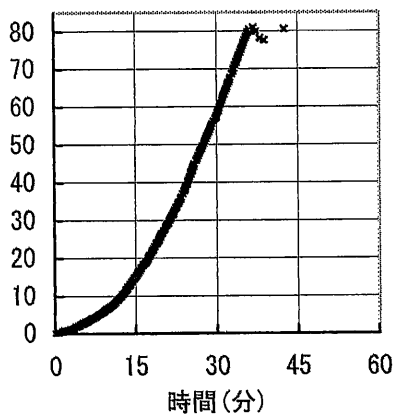
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位

B点の変位 (mm)



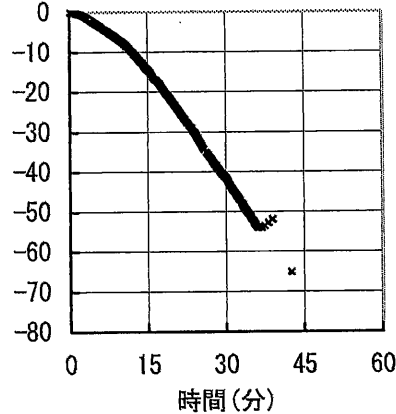
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位

C-D間の相対変位 (mm)



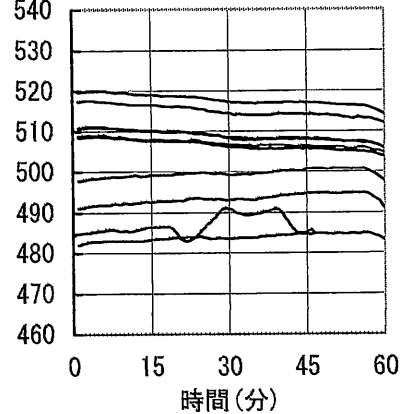
(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})

D点の絶対変位 (mm)



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

鋼材温度 ($^{\circ}\text{C}$)

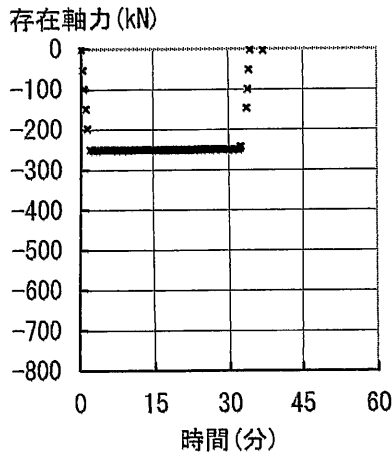


(リ) 鋼材温度

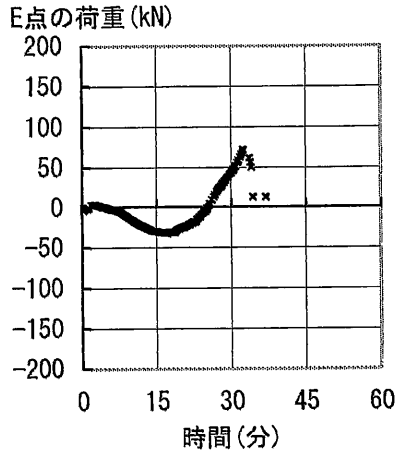
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

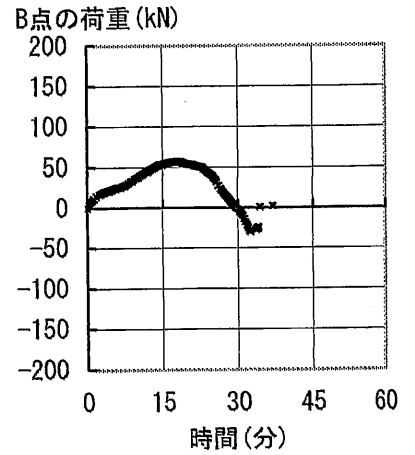
資図 19 H形断面部材, 幅厚比 $b/t=10$, 軸力比 0.4, 鋼材温度 500°C



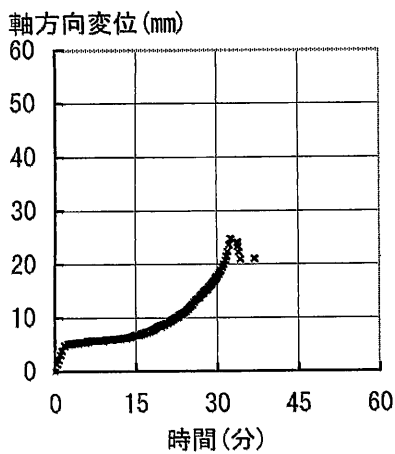
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



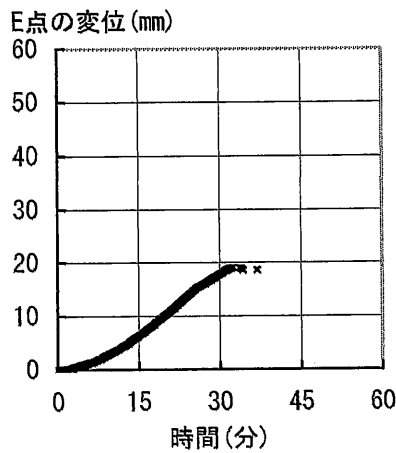
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



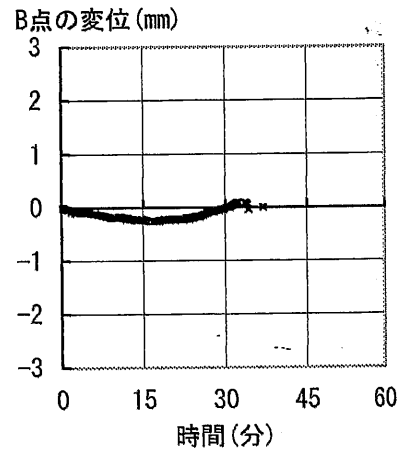
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



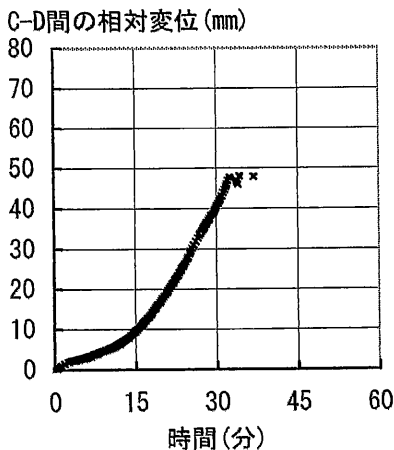
(ニ) 水平アクチュエーター変位



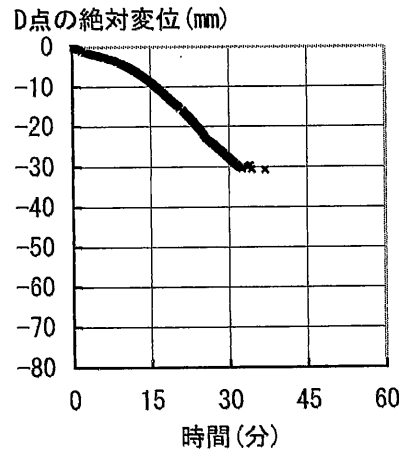
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



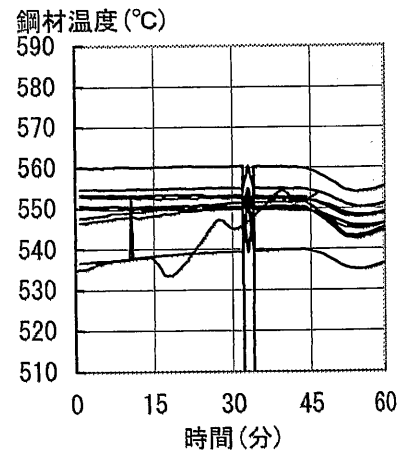
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



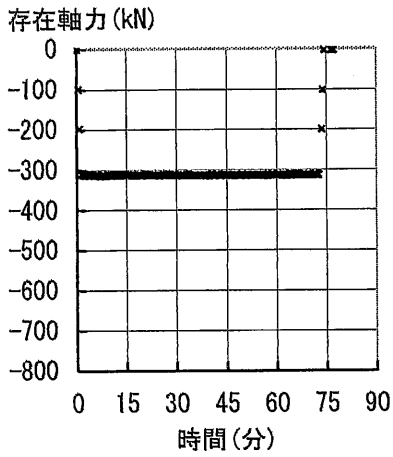
(フ) 変位計2の値 (δ_D)



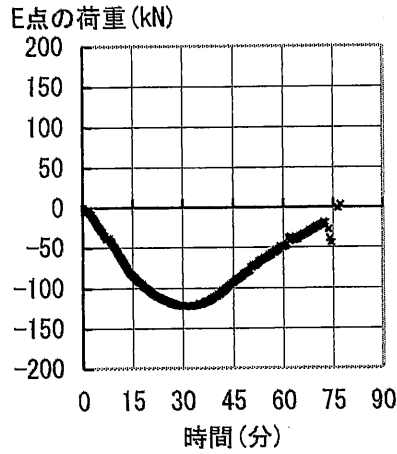
(リ) 鋼材温度

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。

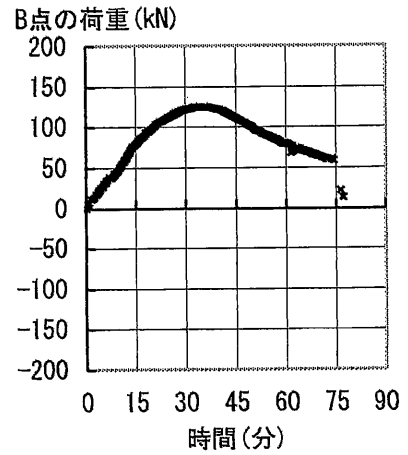
資図 20 H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ ，軸力比 0.4，鋼材温度 550°C



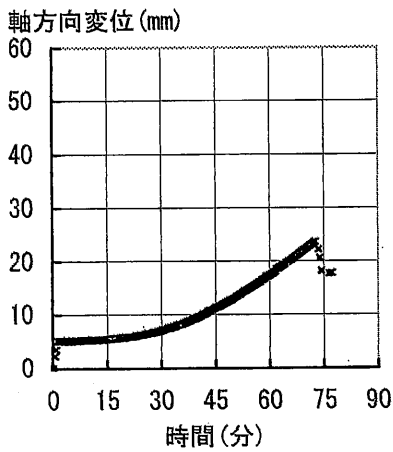
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



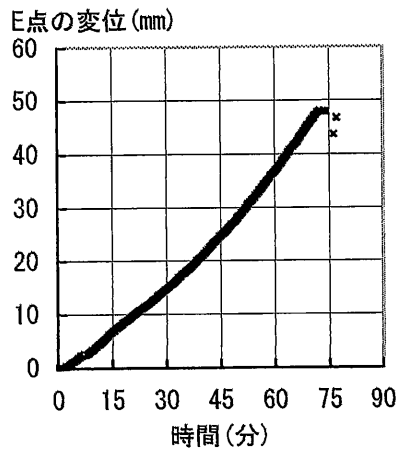
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



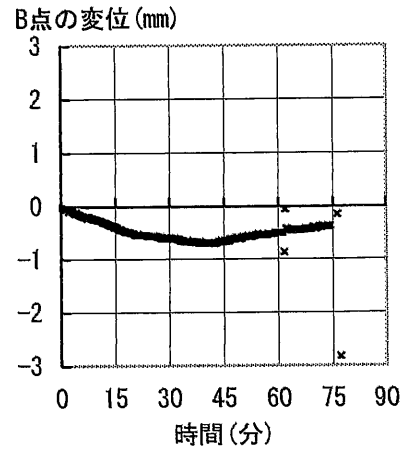
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



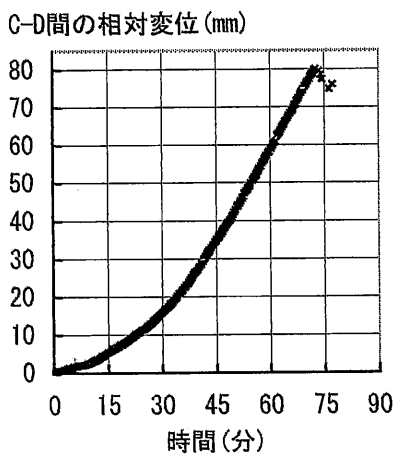
(ニ) 水平アクチュエーター変位



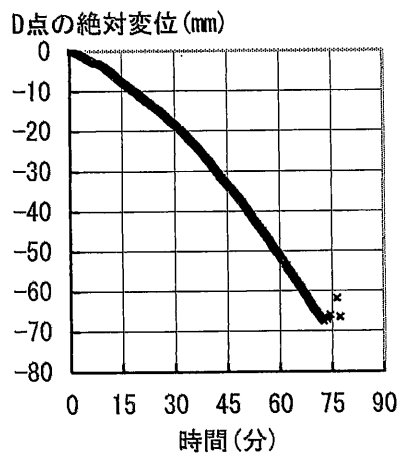
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



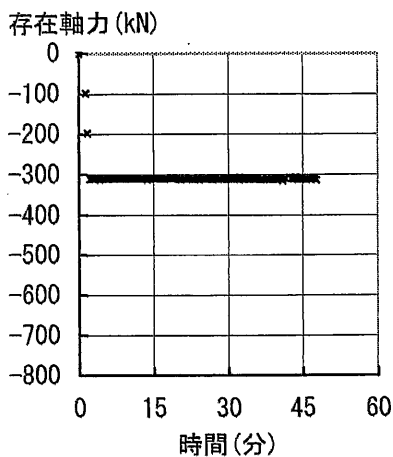
(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



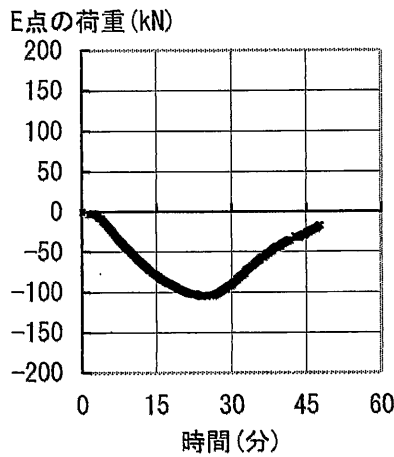
(チ) 変位計2の値 (δ_D)

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。

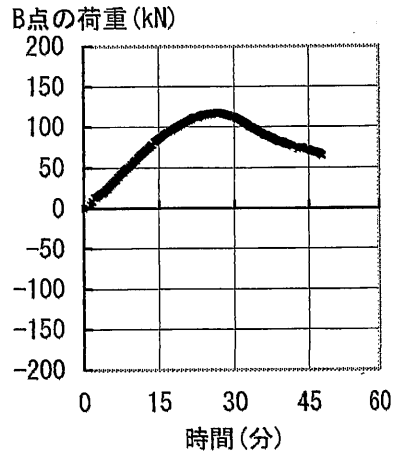
資図 21 H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ ，軸力比 0.5，常温



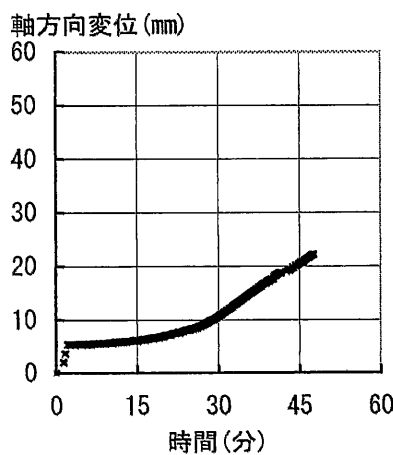
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



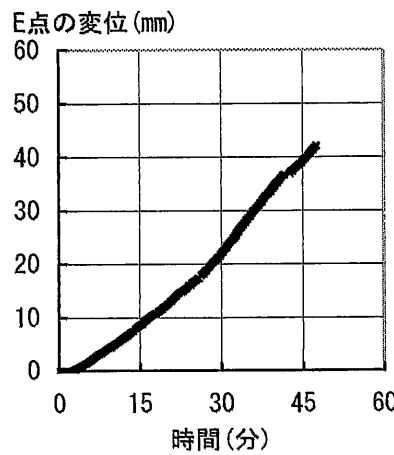
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



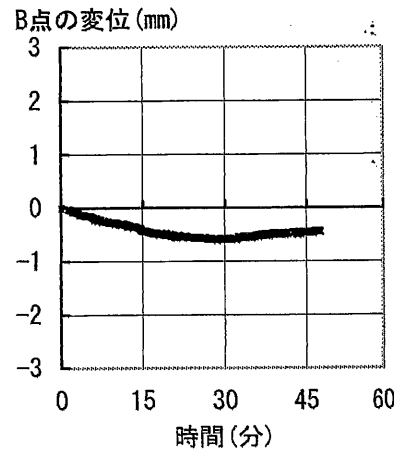
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



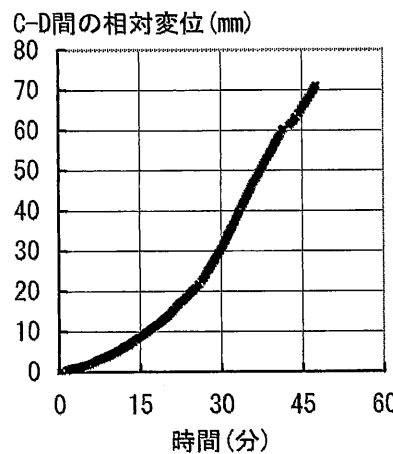
(ニ) 水平アクチュエーター変位



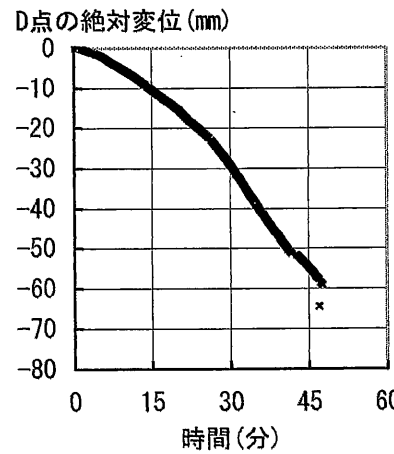
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



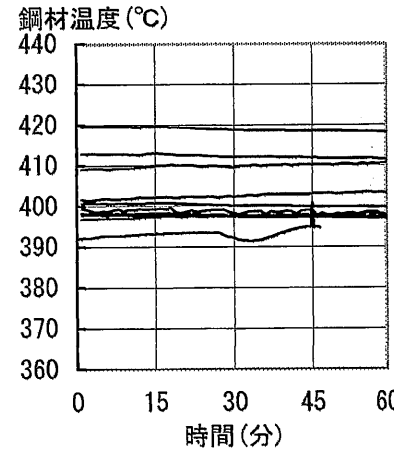
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

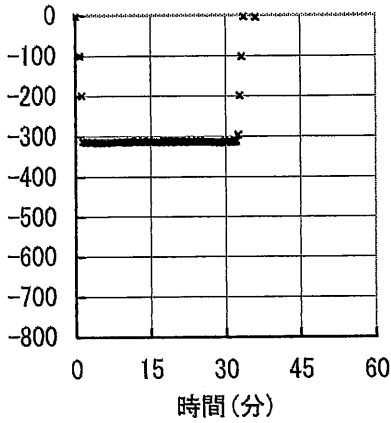


(リ) 鋼材温度

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。

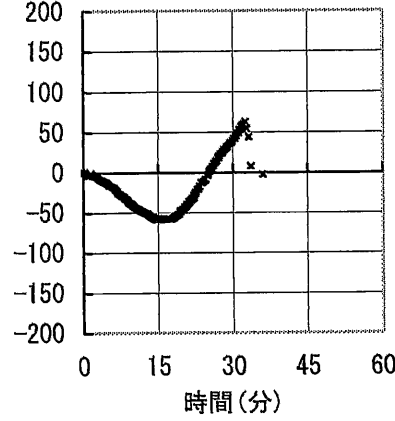
資図 22 H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ ，軸力比 0.5，鋼材温度 400°C

存在軸力 (kN)



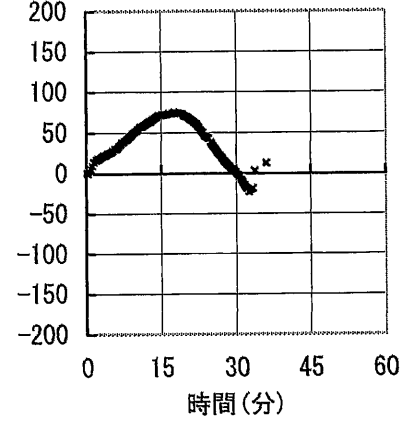
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)

E点の荷重 (kN)



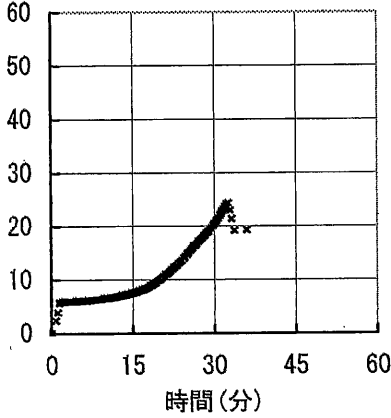
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)

B点の荷重 (kN)



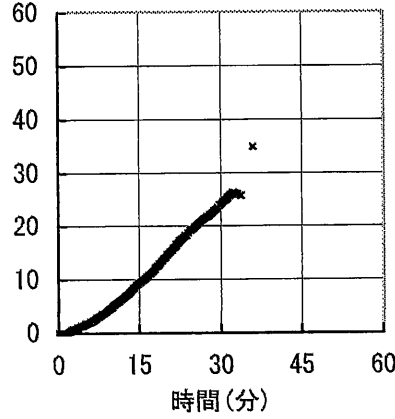
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)

軸方向変位 (mm)



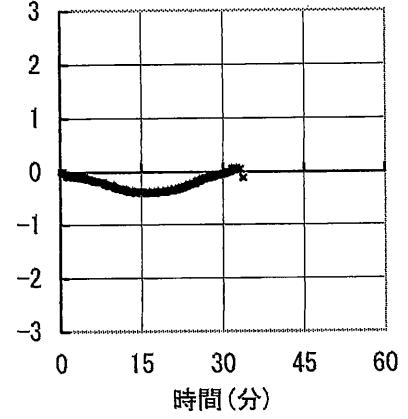
(ニ) 水平アクチュエーター変位

E点の変位 (mm)



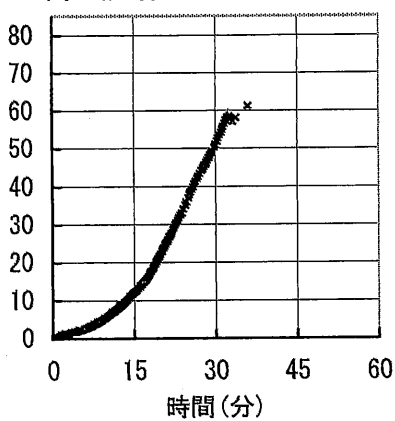
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位

B点の変位 (mm)



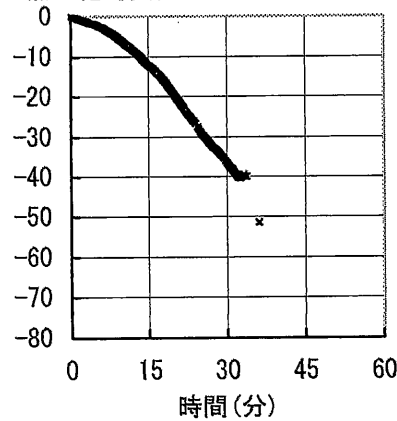
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位

C-D間の相対変位 (mm)



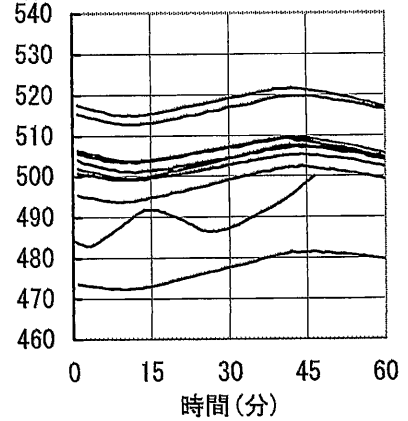
(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})

D点の絶対変位 (mm)



(フ) 変位計2の値 (δ_D)

鋼材温度 ($^{\circ}\text{C}$)

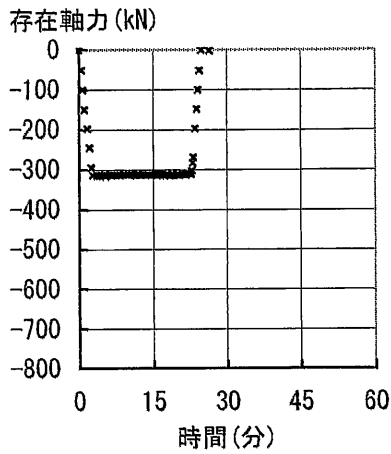


(リ) 鋼材温度

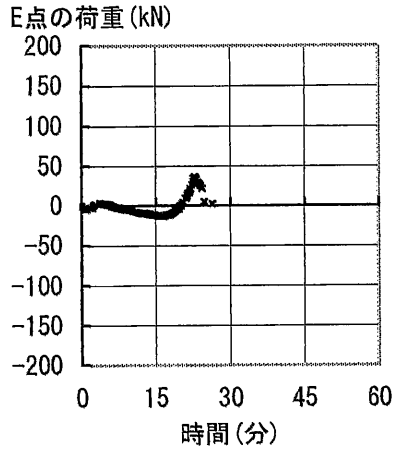
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

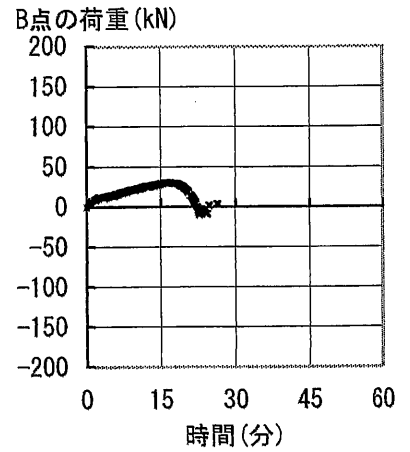
資図 23 H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ ，軸力比 0.5，鋼材温度 500°C



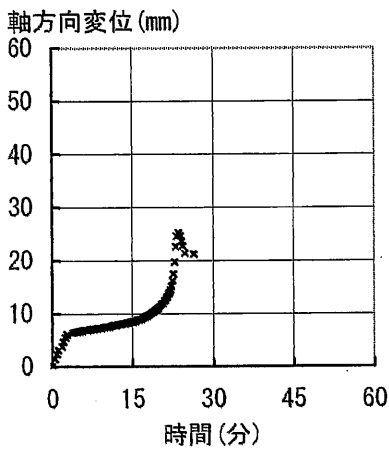
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



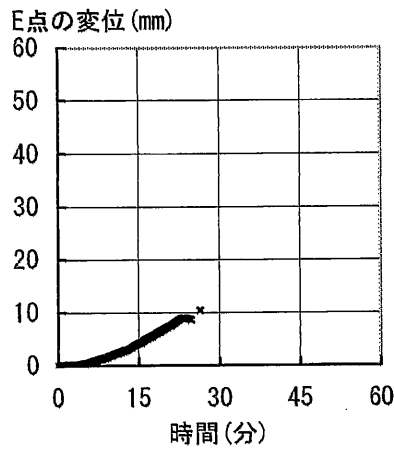
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



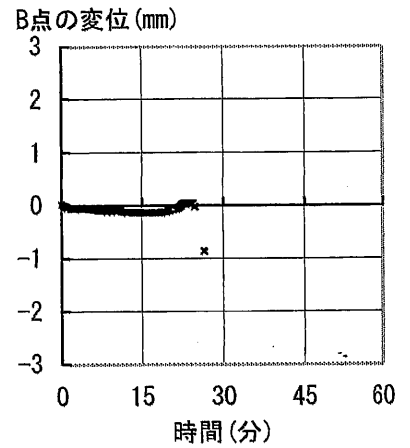
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



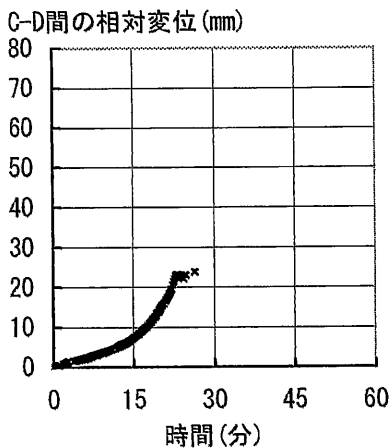
(ニ) 水平アクチュエーター変位



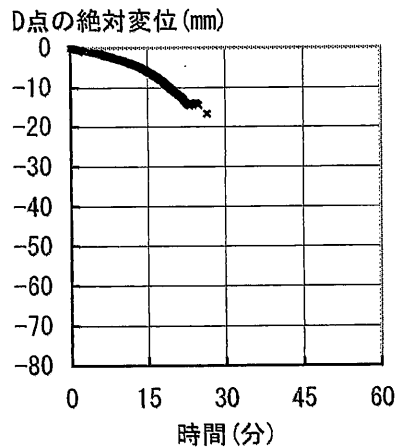
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



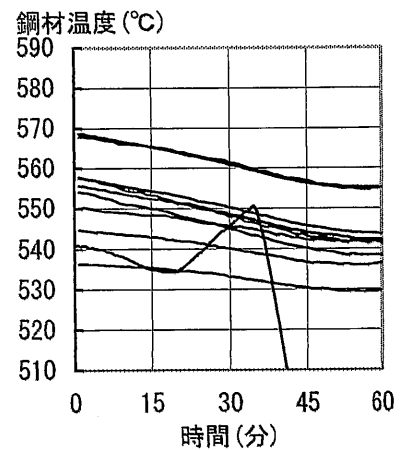
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(フ) 変位計2の値 (δ_D)



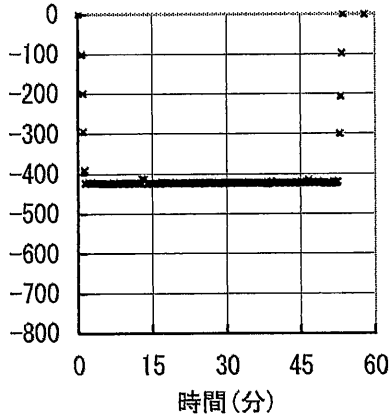
(リ) 鋼材温度

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。

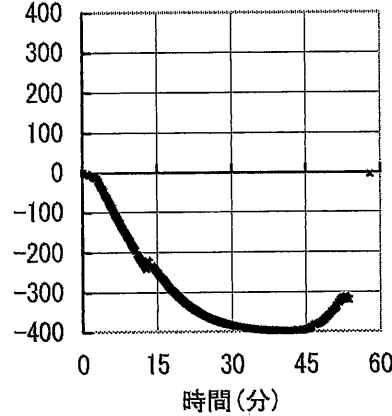
資図 24 H形断面部材，幅厚比 $b/t=10$ ，軸力比 0.5，鋼材温度 550°C

存在軸力 (kN)



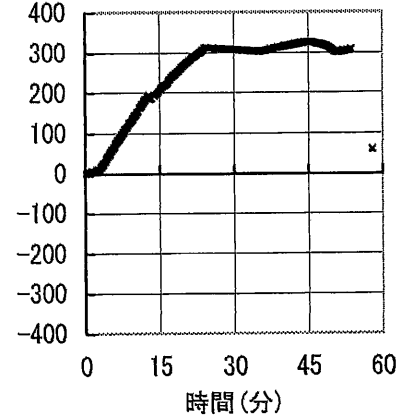
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)

E点の荷重 (kN)



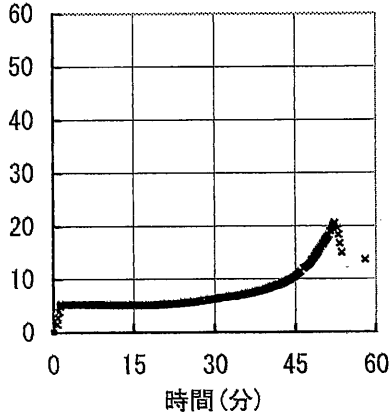
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)

B点の荷重 (kN)



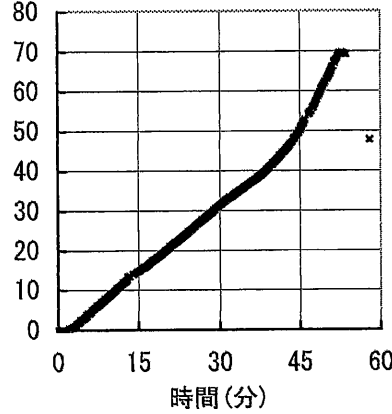
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)

軸方向変位 (mm)



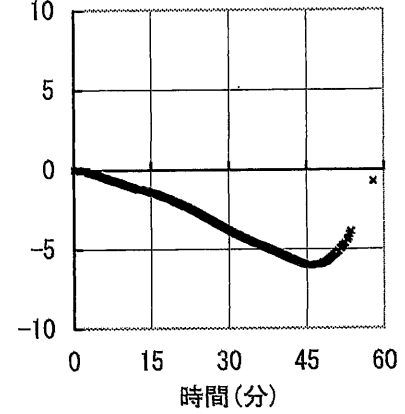
(ニ) 水平アクチュエーター変位

E点の変位 (mm)



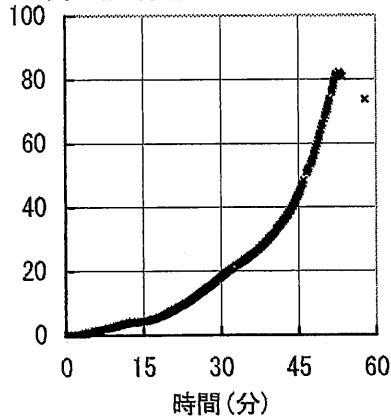
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位

B点の変位 (mm)



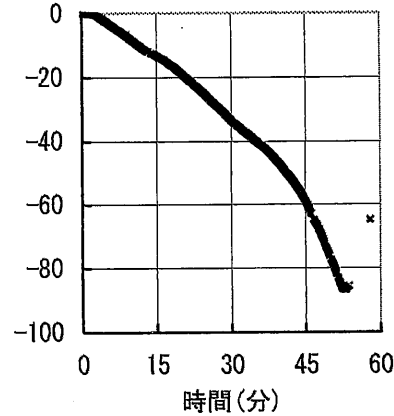
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位

C-D間の相対変位 (mm)



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})

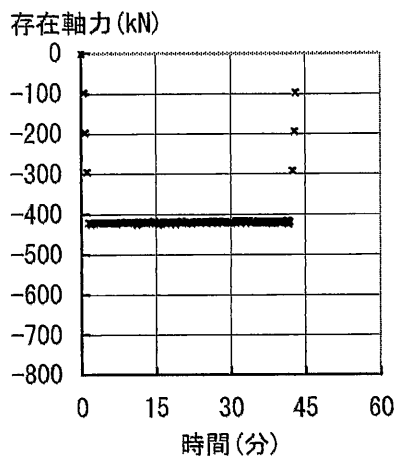
D点の絶対変位 (mm)



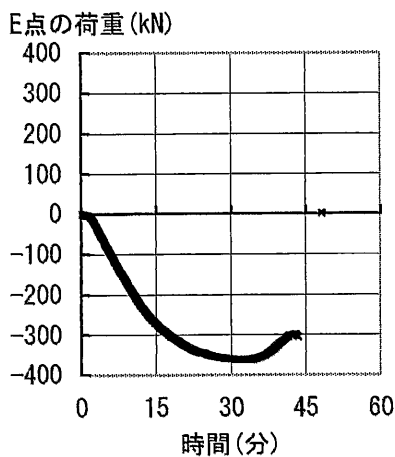
(フ) 変位計2の値 (δ_D)

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。

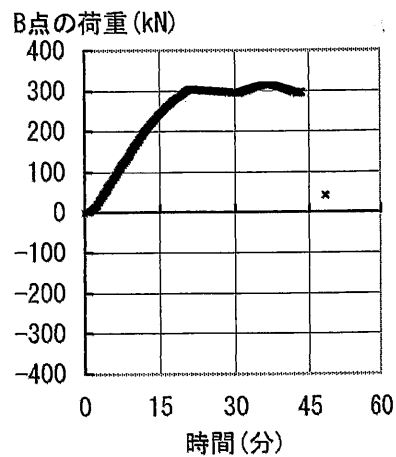
資図 25 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.3, 常温



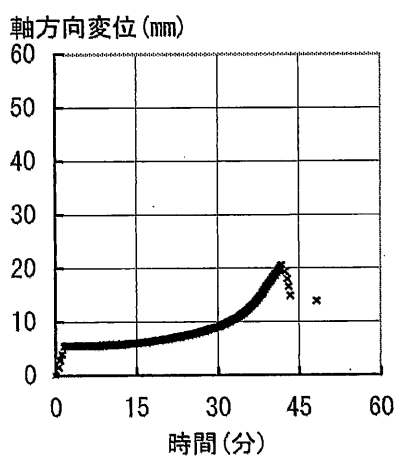
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



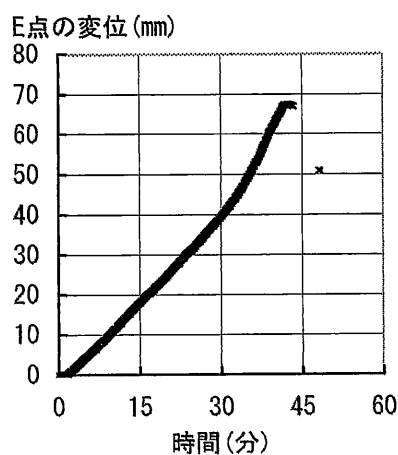
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



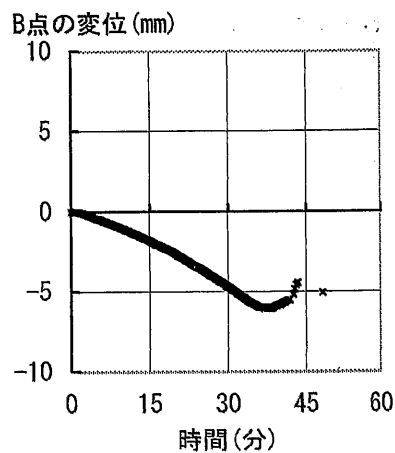
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



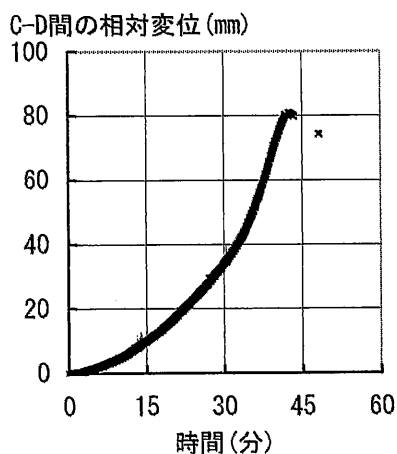
(ニ) 水平アクチュエーター変位



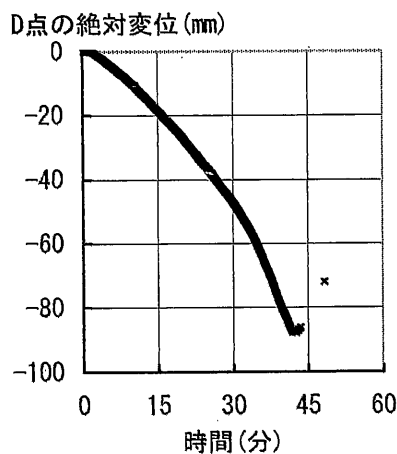
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



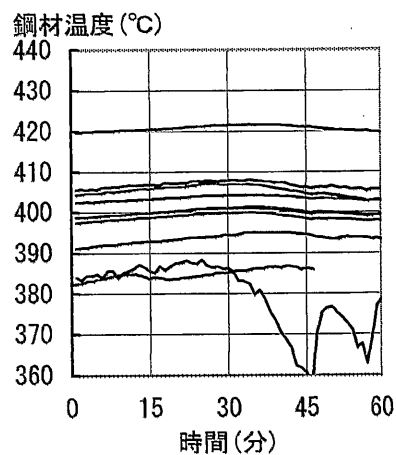
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

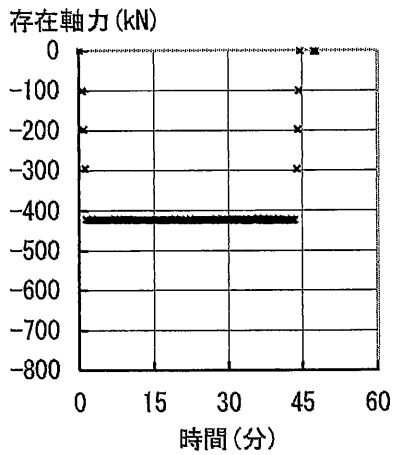


(リ) 鋼材温度

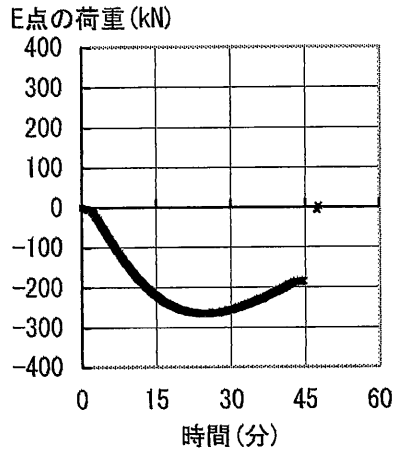
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

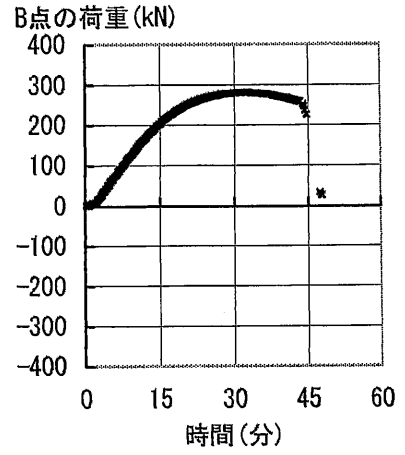
資図 26 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.3, 鋼材温度 400°C



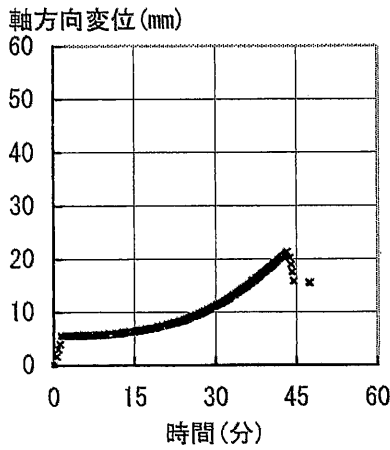
(イ) 水平アクチュエータ荷重 (P)



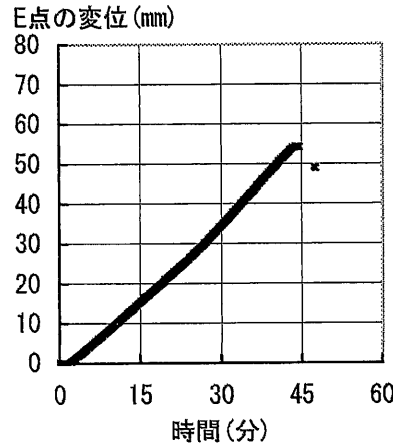
(ロ) 加力側垂直アクチュエータ荷重 (L_1)



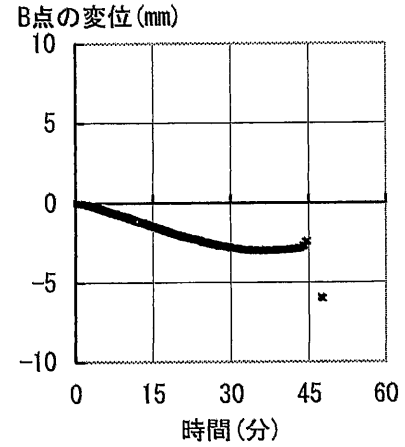
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエータ荷重 (L_2)



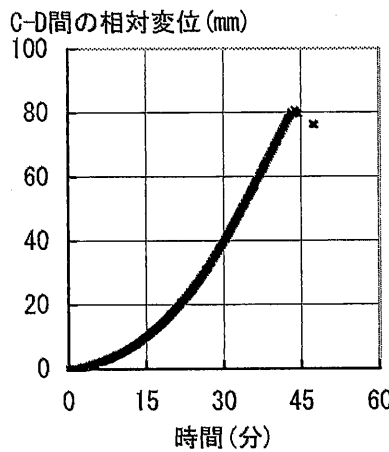
(ニ) 水平アクチュエータ変位



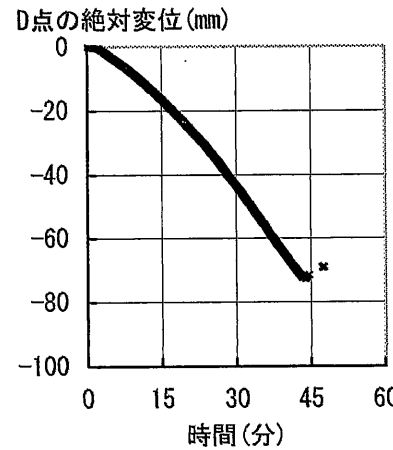
(ホ) 加力側垂直アクチュエータ変位



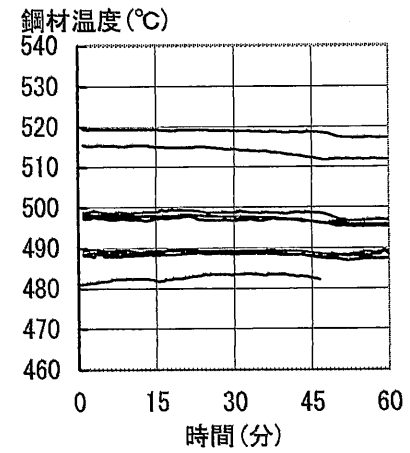
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエータ変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{cp})



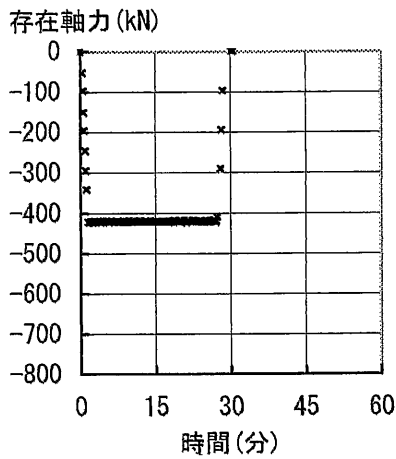
(フ) 変位計2の値 (δ_D)



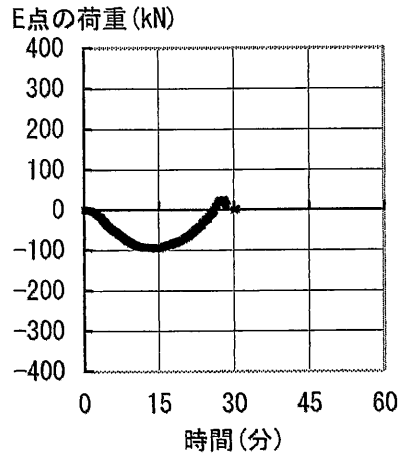
(リ) 鋼材温度

注1) アクチュエータの荷重は、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。

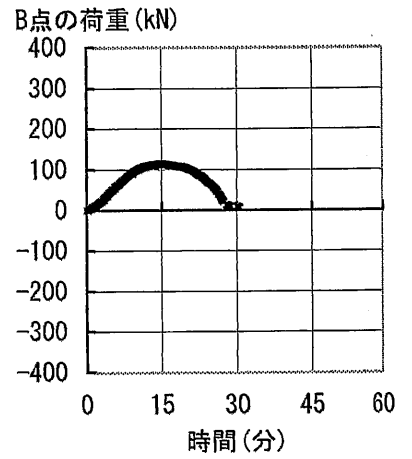
資図 27 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.3, 鋼材温度 500°C



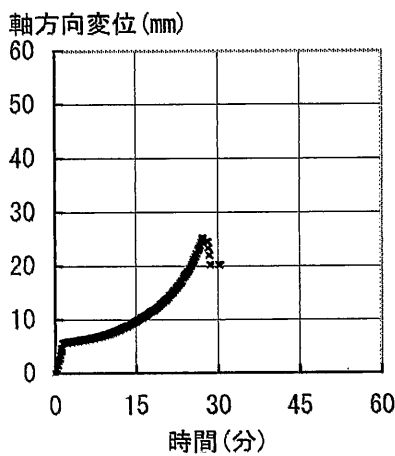
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



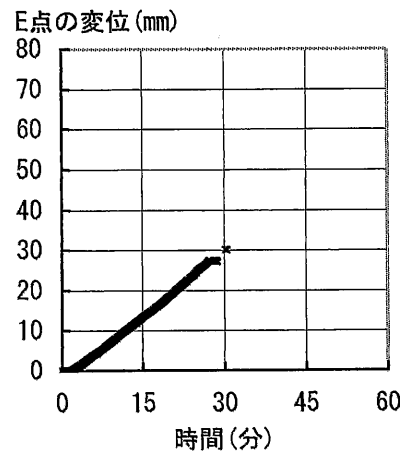
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



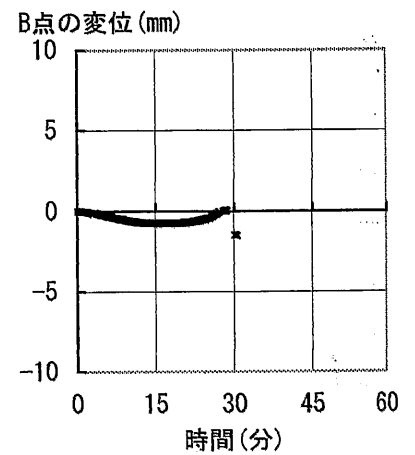
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



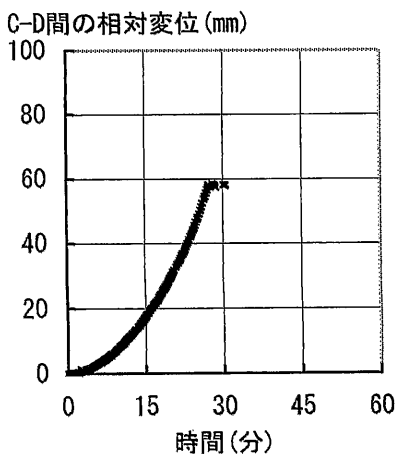
(ニ) 水平アクチュエーター変位



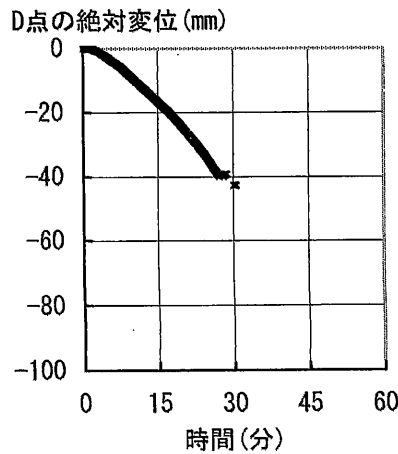
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



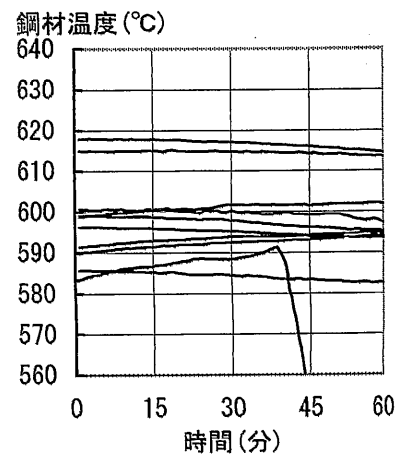
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

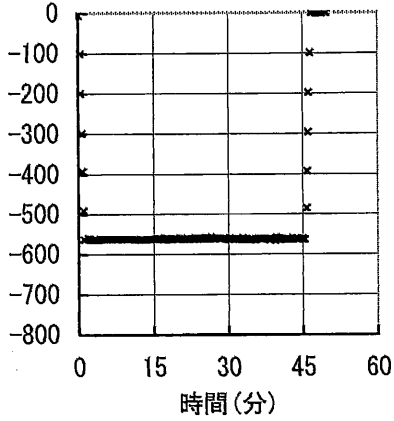


(リ) 鋼材温度

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。

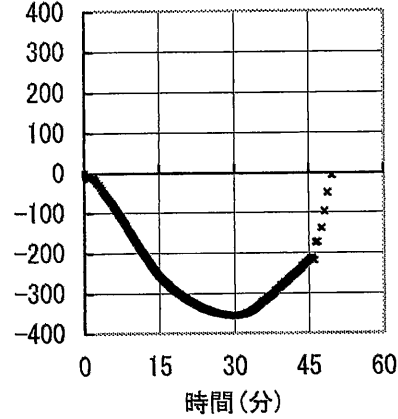
資図 28 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.3, 鋼材温度 600°C

存在軸力 (kN)



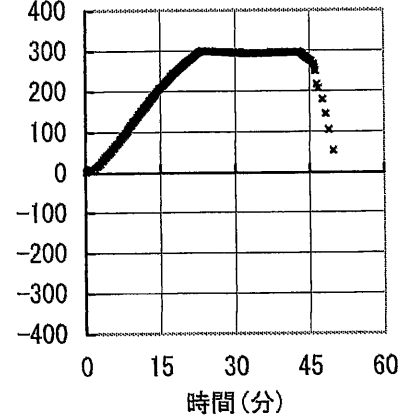
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)

E点の荷重 (kN)



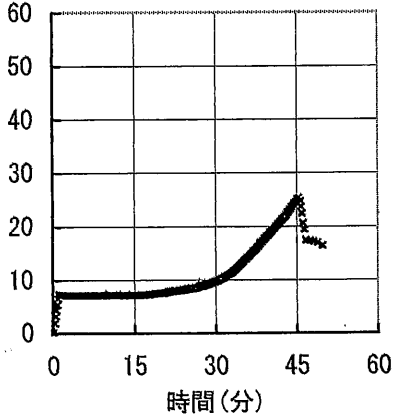
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)

B点の荷重 (kN)



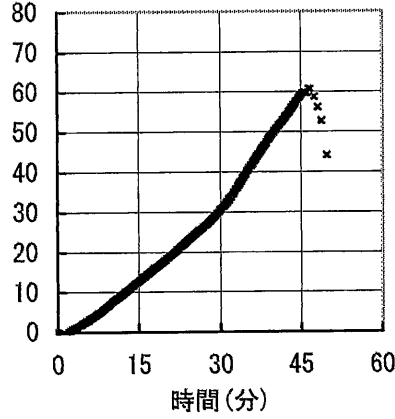
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)

軸方向変位 (mm)



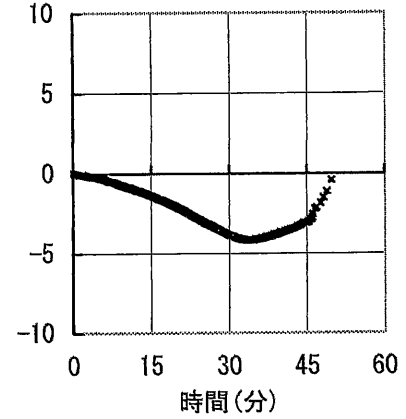
(ニ) 水平アクチュエーター変位

E点の変位 (mm)



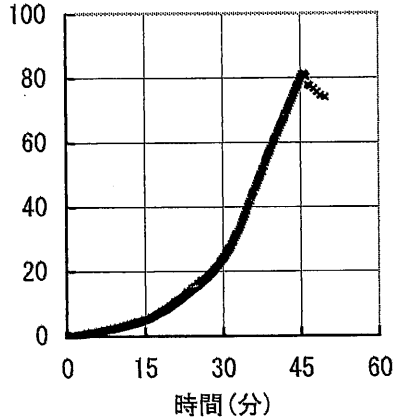
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位

B点の変位 (mm)



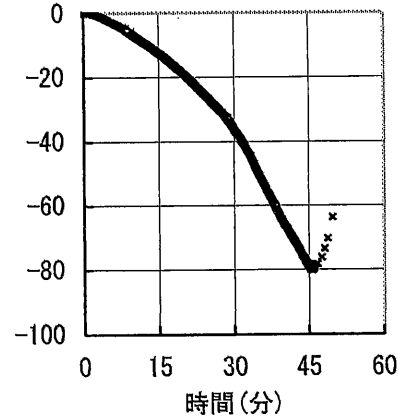
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位

C-D間の相対変位 (mm)



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})

D点の絶対変位 (mm)

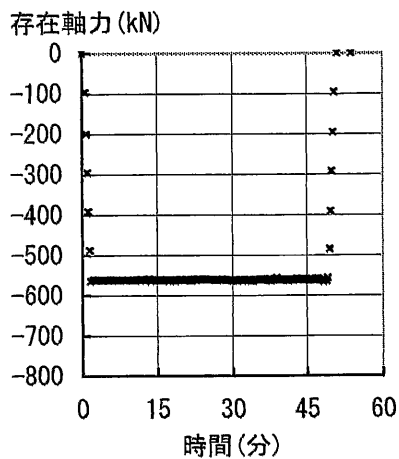


(チ) 変位計2の値 (δ_D)

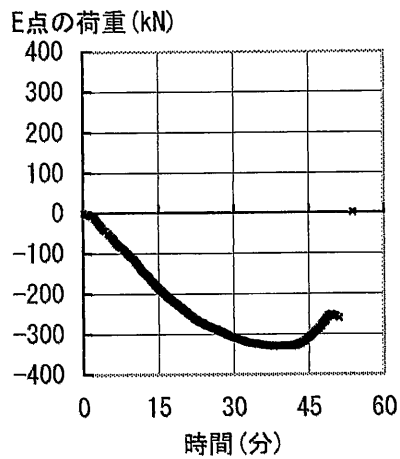
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

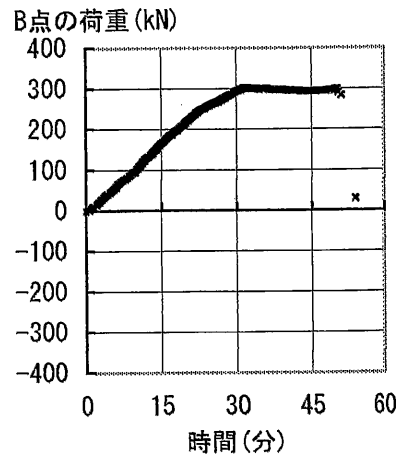
資図 29 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.4, 常温



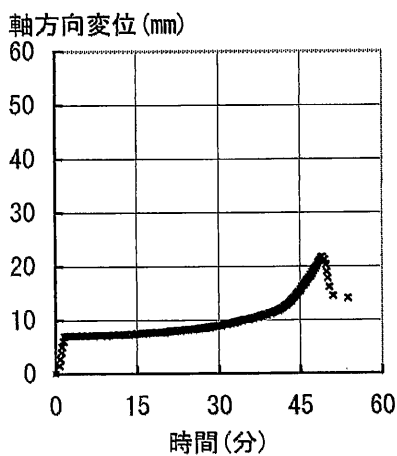
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



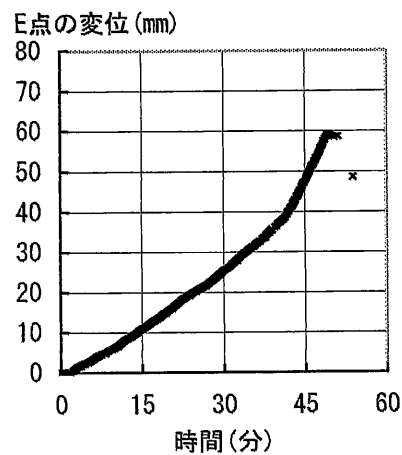
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



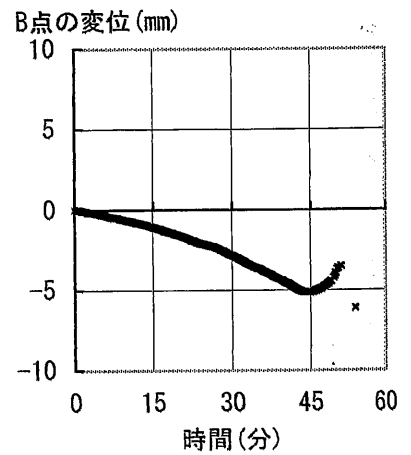
(ハ) ヒョウ支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



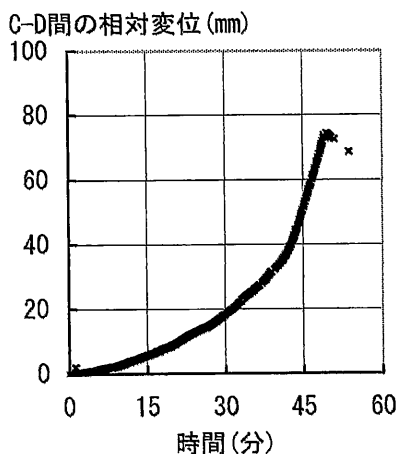
(ニ) 水平アクチュエーター変位



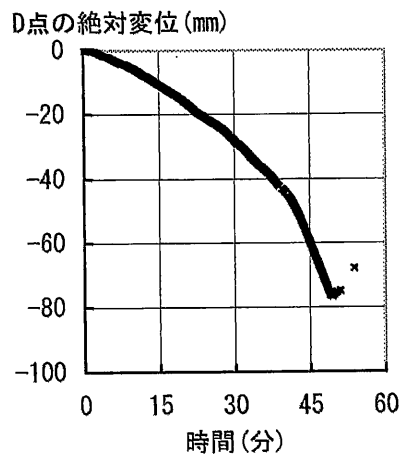
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



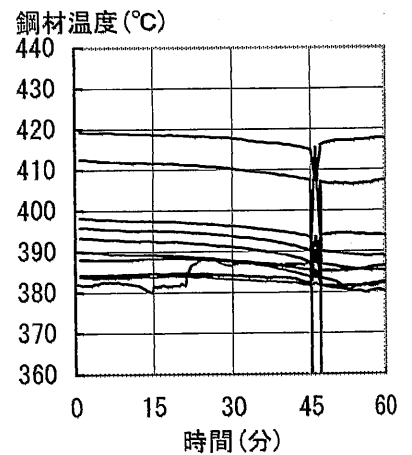
(ヘ) ヒョウ支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



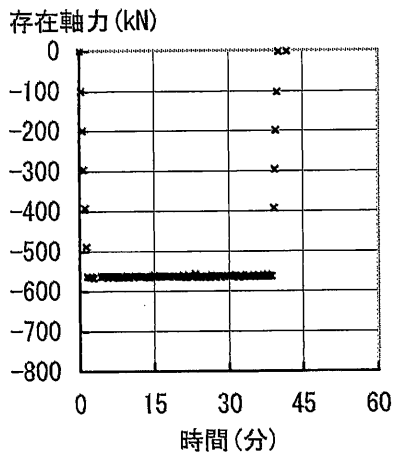
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



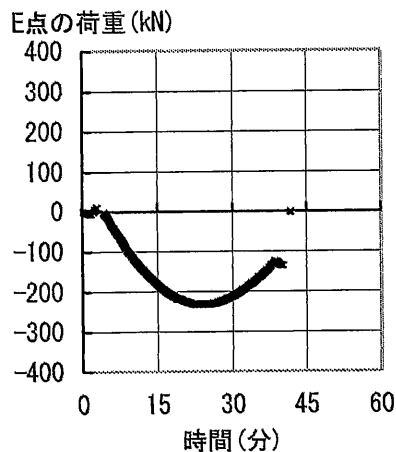
(リ) 鋼材温度

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。

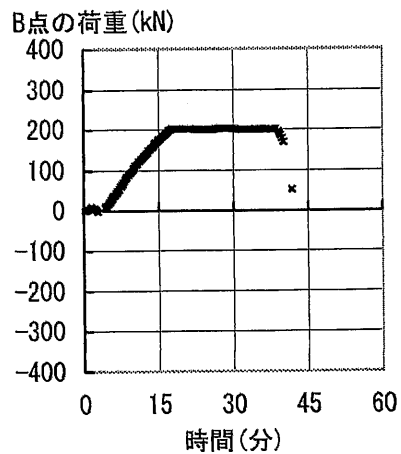
資図 30 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.4, 鋼材温度 400°C



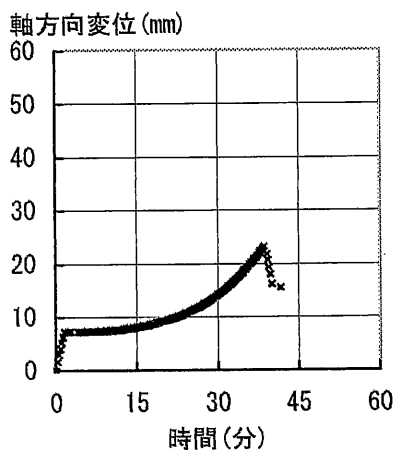
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



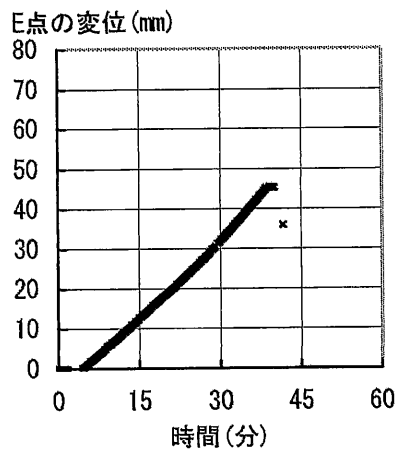
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



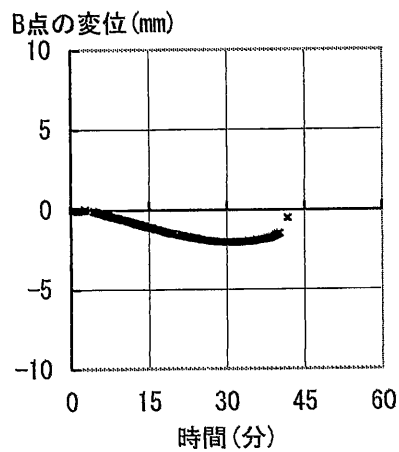
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



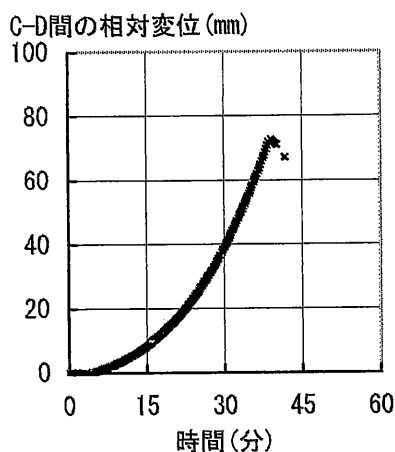
(ニ) 水平アクチュエーター変位



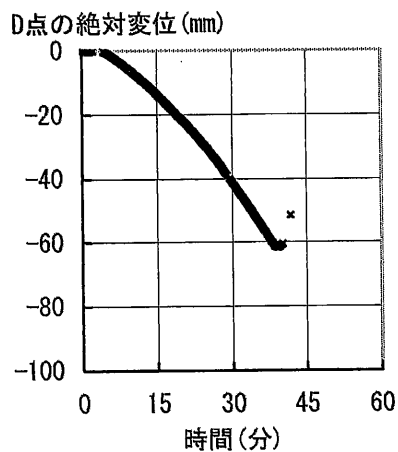
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



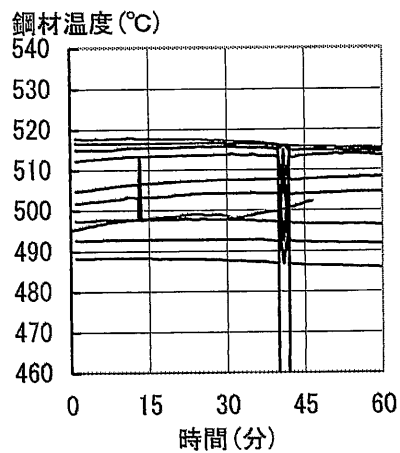
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{cp})



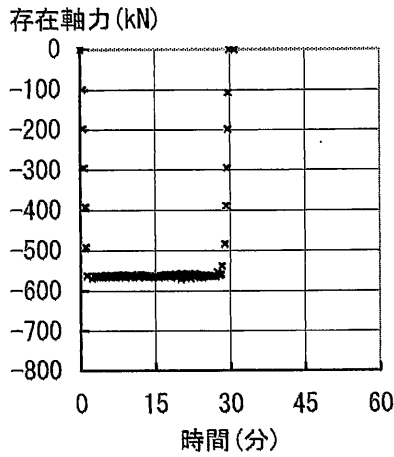
(フ) 変位計2の値 (δ_D)



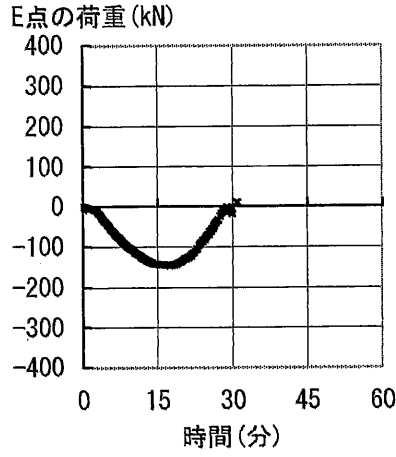
(リ) 鋼材温度

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。

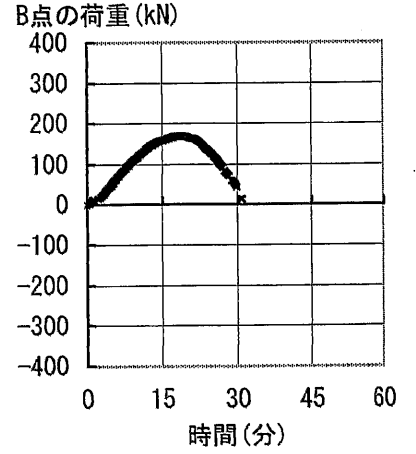
資図 31 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.4, 鋼材温度 500°C



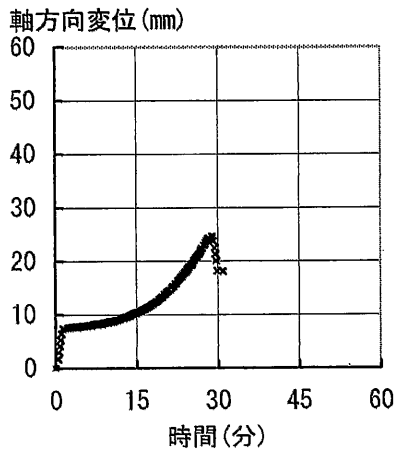
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



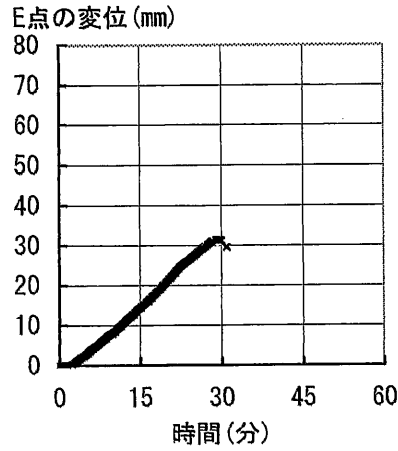
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



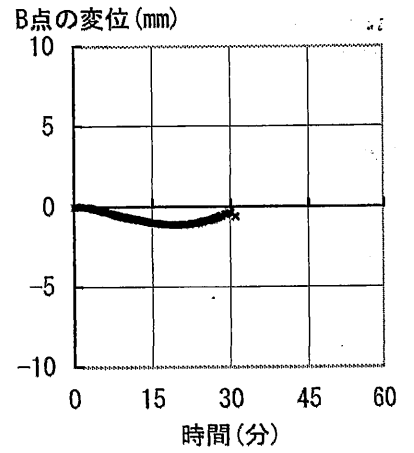
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



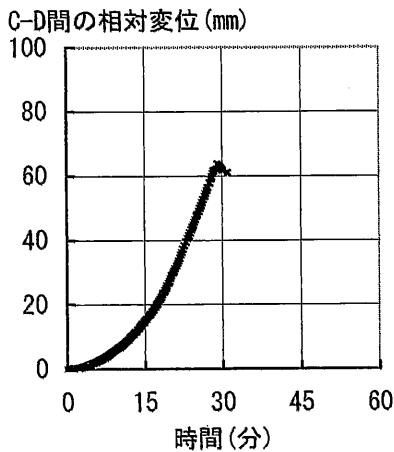
(ニ) 水平アクチュエーター変位



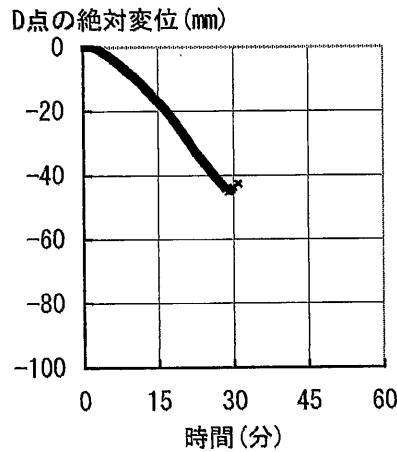
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



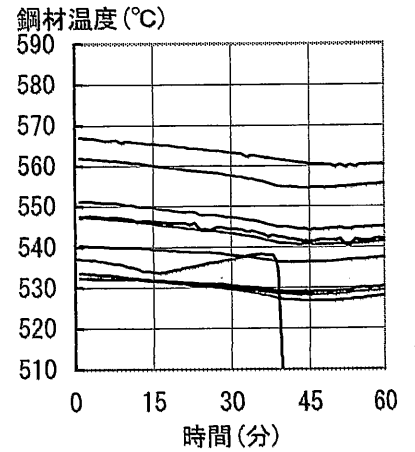
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{cp})



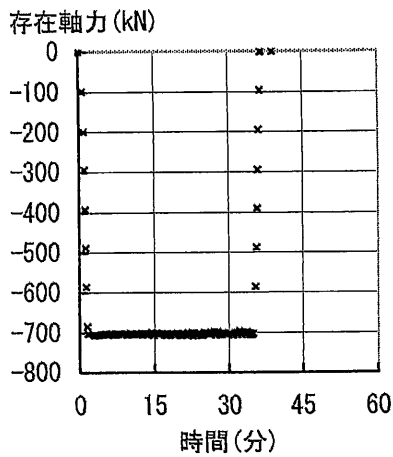
(チ) 変位計2の値 (δ_p)



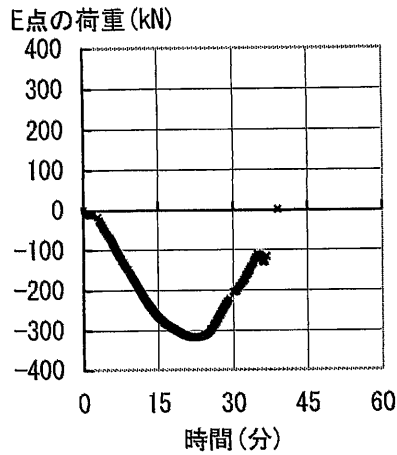
(リ) 鋼材温度

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。

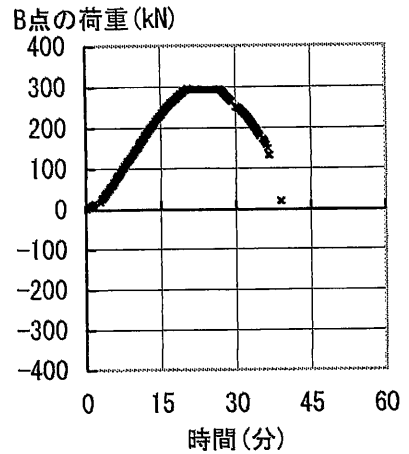
資図 32 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.4, 鋼材温度 550°C



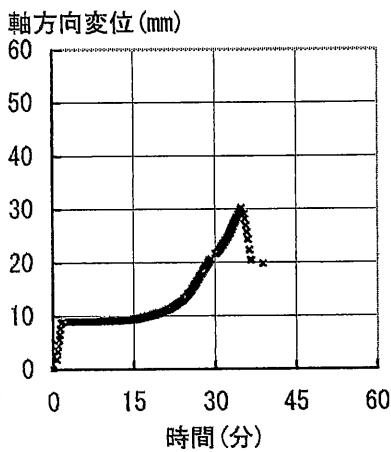
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



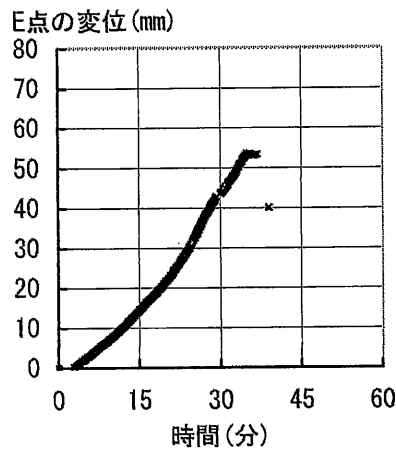
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



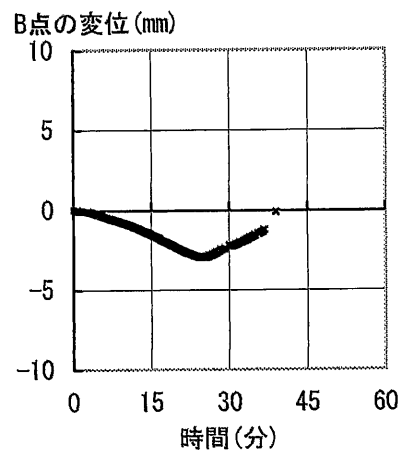
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



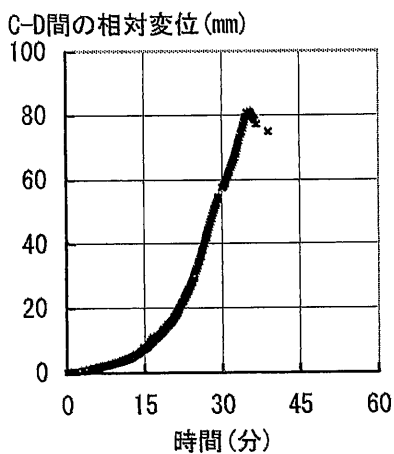
(ニ) 水平アクチュエーター変位



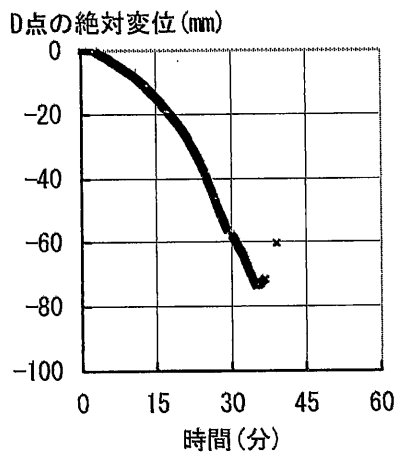
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



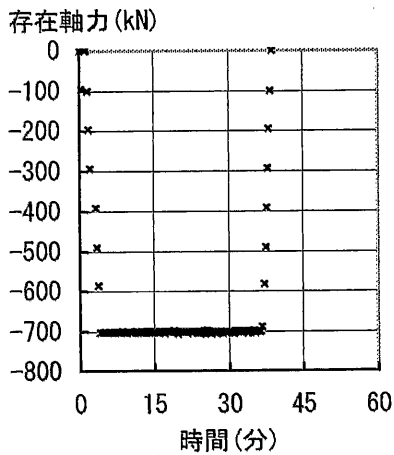
(ト) 変位計1の値 (δ_c)



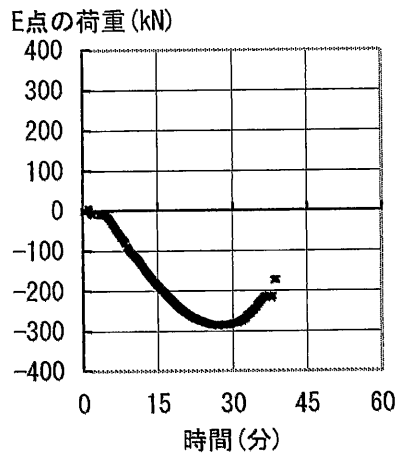
(チ) 変位計2の値 (δ_d)

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。

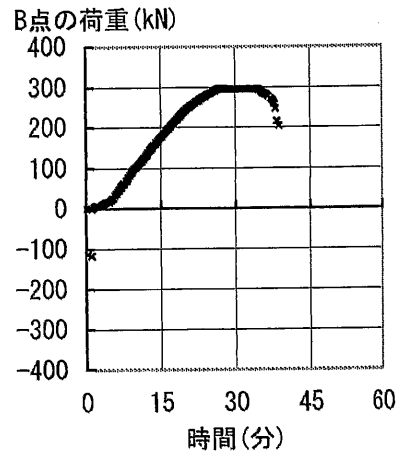
資図 33 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.5, 常温



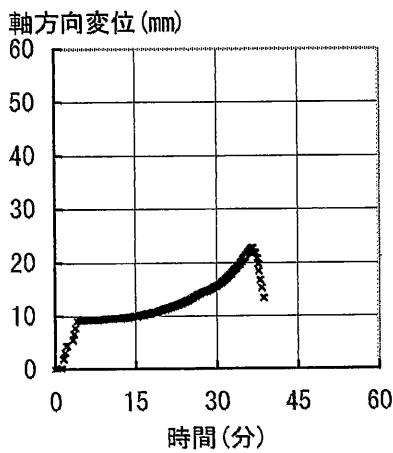
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



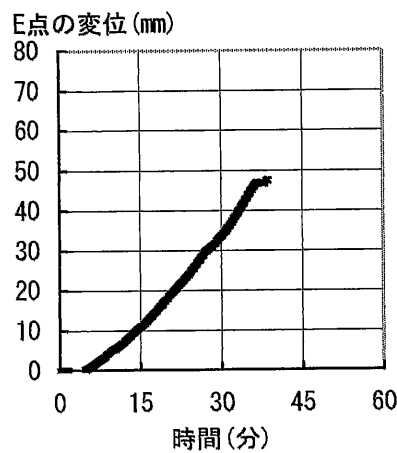
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



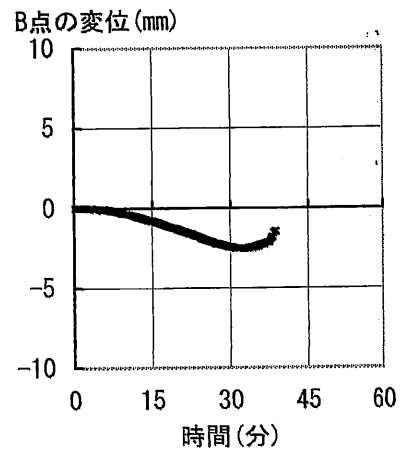
(ハ) ヒン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



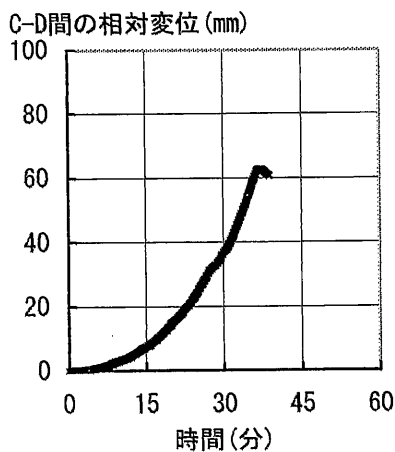
(ニ) 水平アクチュエーター変位



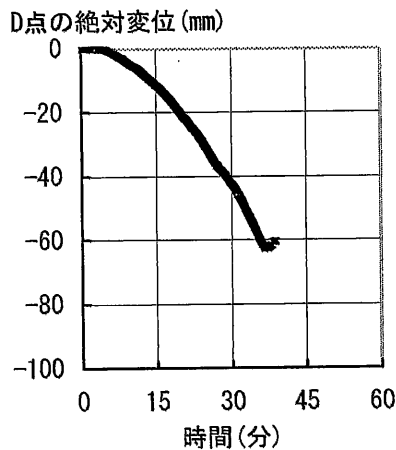
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



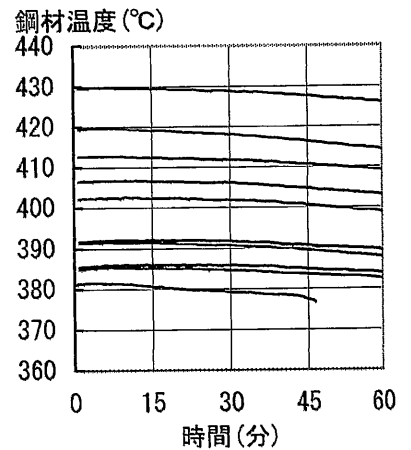
(ヘ) ヒン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(フ) 変位計2の値 (δ_D)

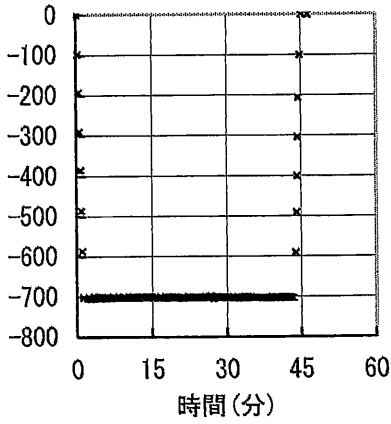


(リ) 鋼材温度

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。

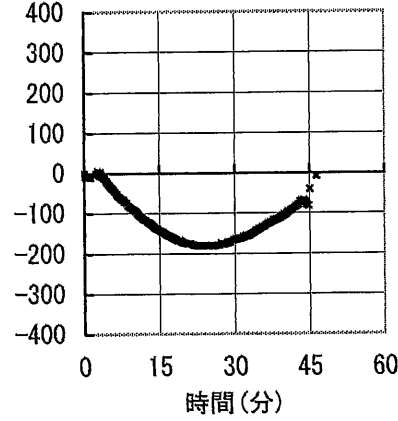
資図 34 箱形断面材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.5, 鋼材温度 400°C

存在軸力 (kN)



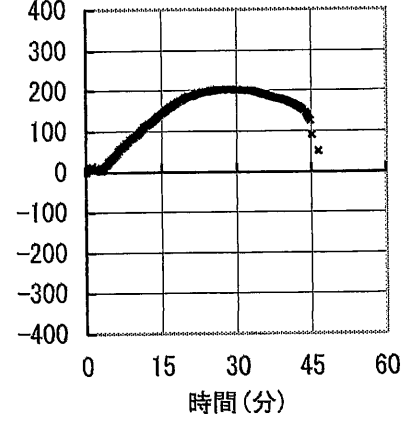
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)

E点の荷重 (kN)



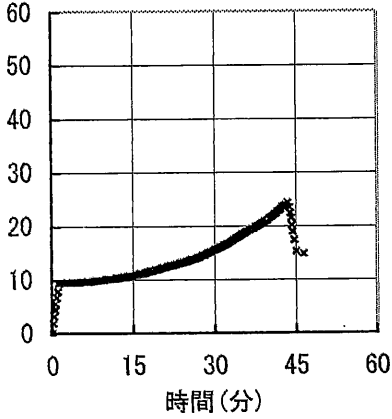
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)

B点の荷重 (kN)



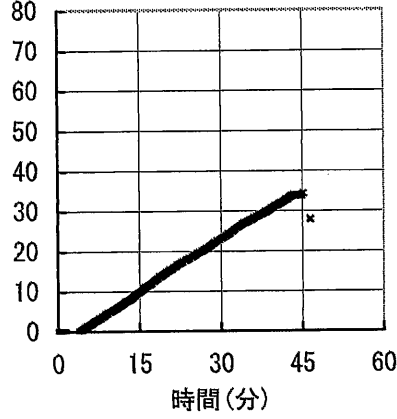
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)

軸方向変位 (mm)



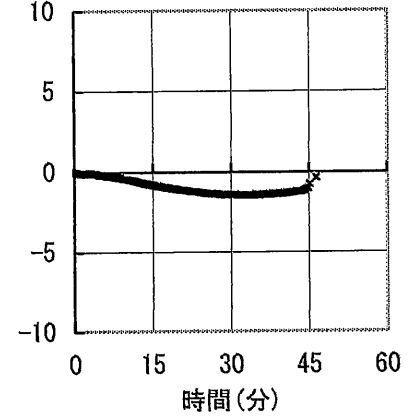
(ニ) 水平アクチュエーター変位

E点の変位 (mm)



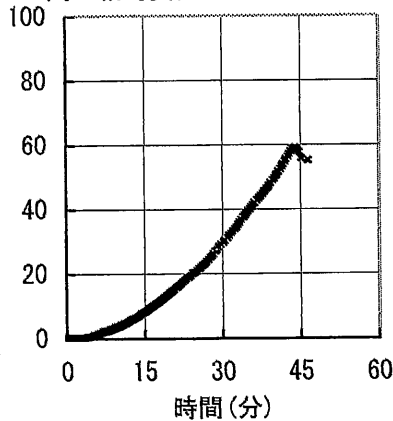
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位

B点の変位 (mm)



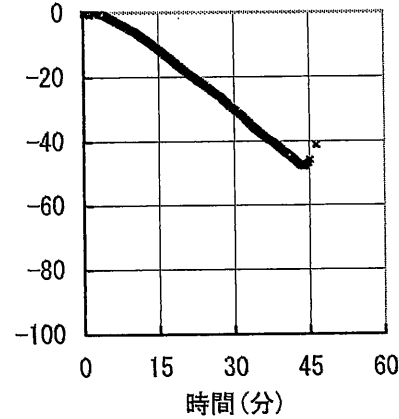
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位

C-D間の相対変位 (mm)



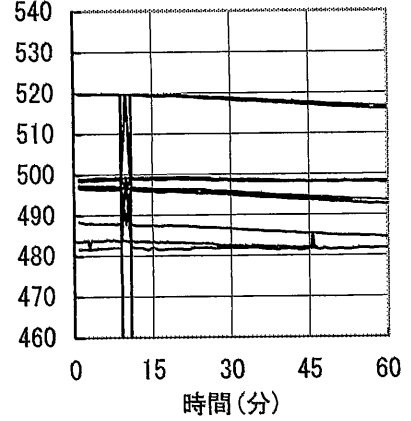
(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})

D点の絶対変位 (mm)



(フ) 変位計2の値 (δ_D)

鋼材温度 ($^{\circ}\text{C}$)

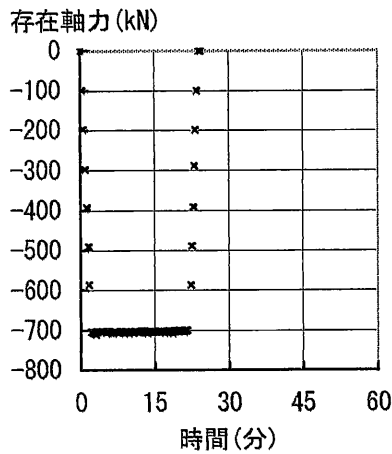


(リ) 鋼材温度

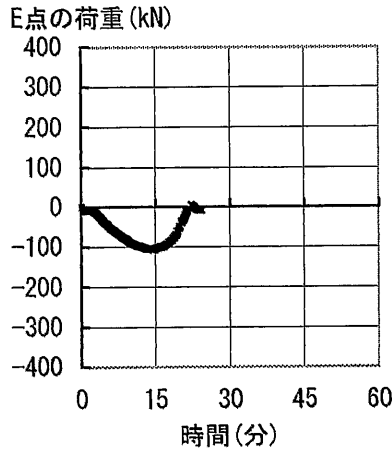
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

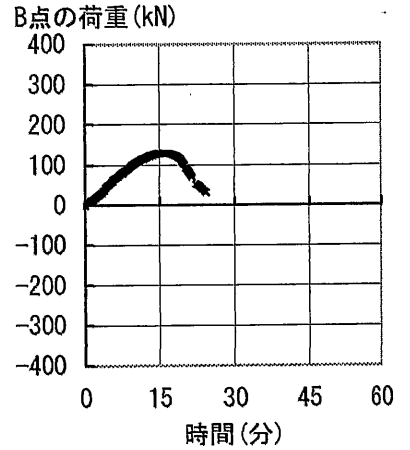
資図 35 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.5, 鋼材温度 500°C



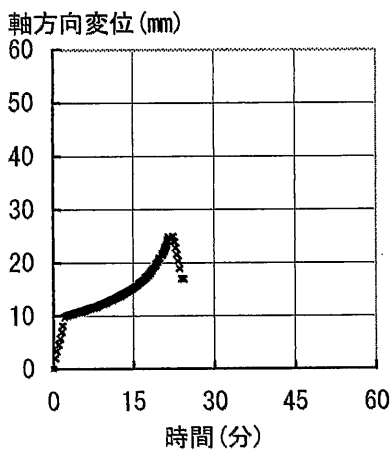
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



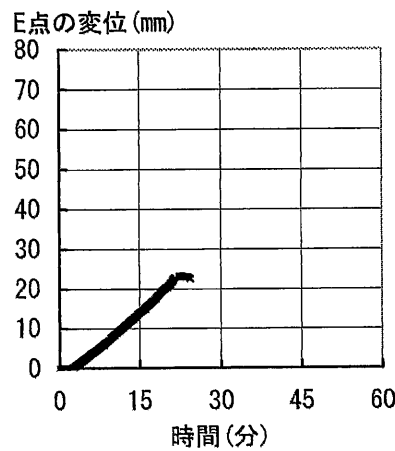
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



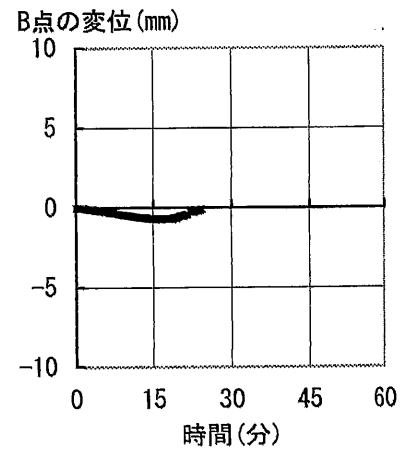
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



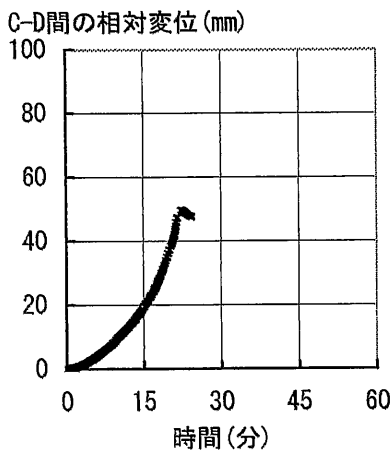
(ニ) 水平アクチュエーター変位



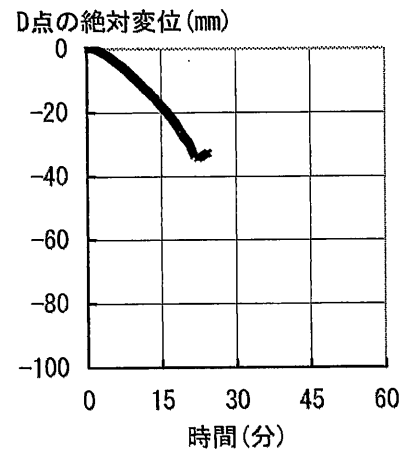
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



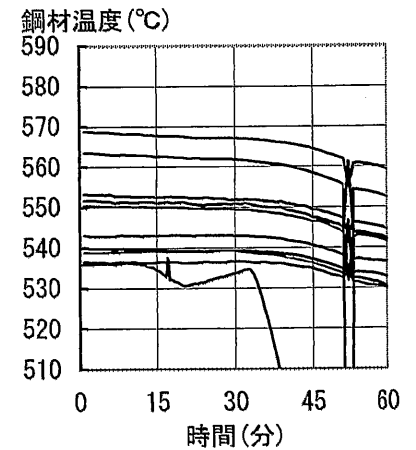
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{cD})



(フ) 変位計2の値 (δ_D)

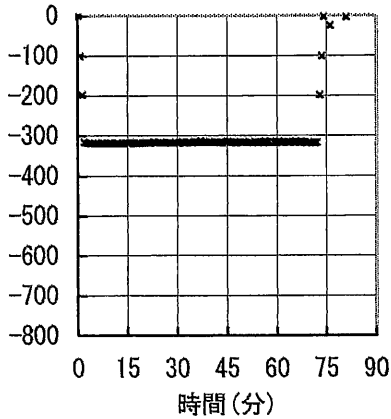


(リ) 鋼材温度

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。

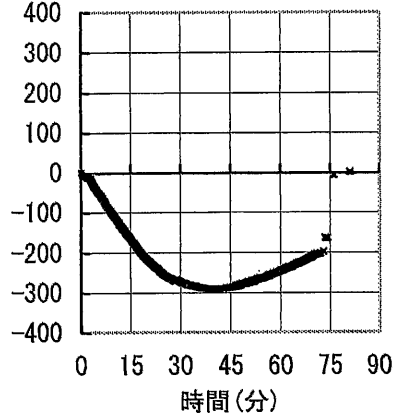
資図 36 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.5, 鋼材温度 550°C

存在軸力 (kN)



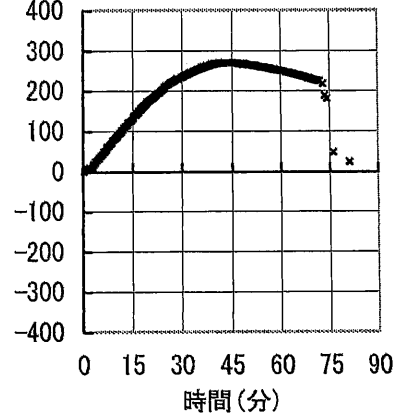
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)

E点の荷重 (kN)



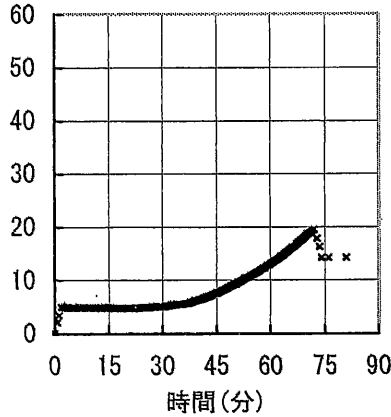
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)

B点の荷重 (kN)



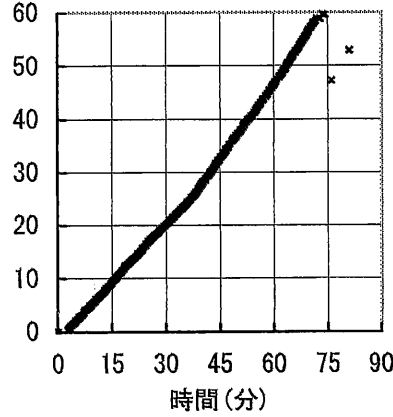
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)

軸方向変位 (mm)



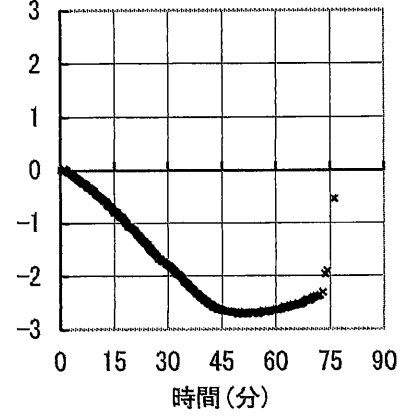
(ニ) 水平アクチュエーター変位

E点の変位 (mm)



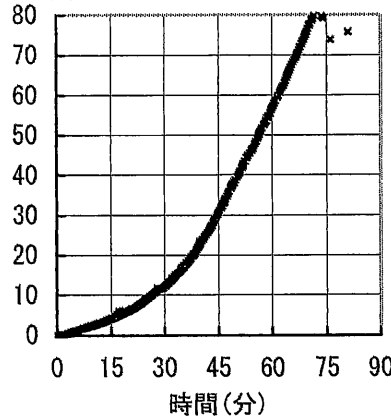
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位

B点の変位 (mm)



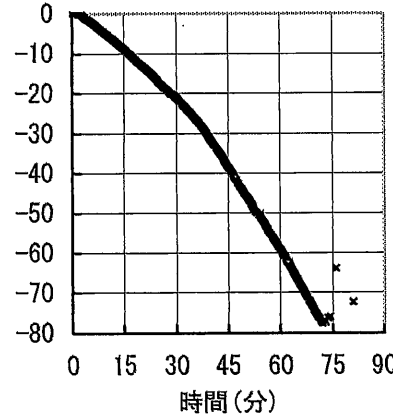
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位

C-D間の相対変位 (mm)



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})

D点の絶対変位 (mm)

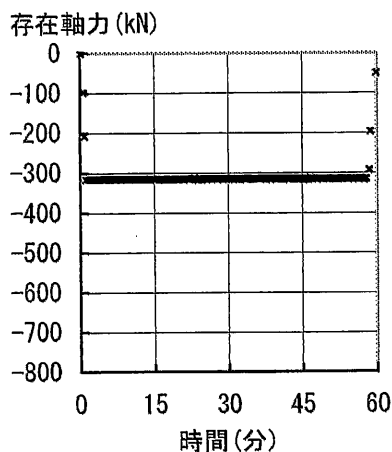


(フ) 変位計2の値 (δ_D)

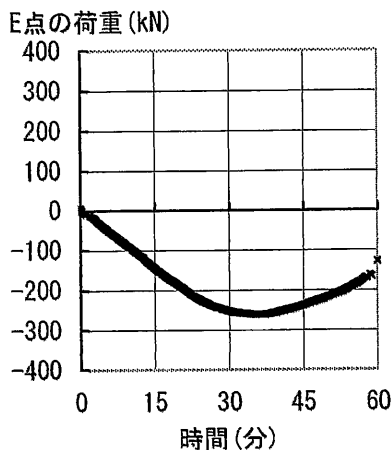
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

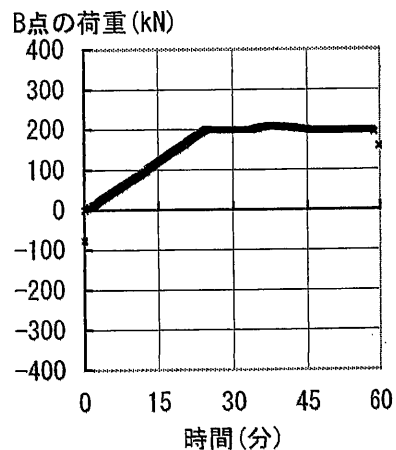
資図 37 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.3, 常温



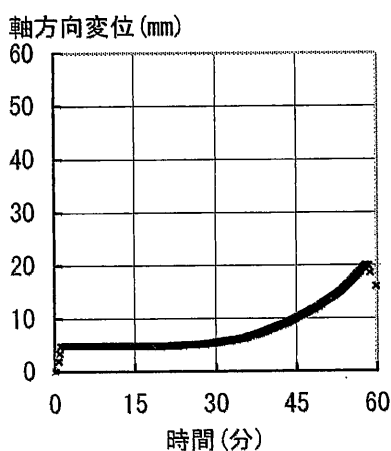
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



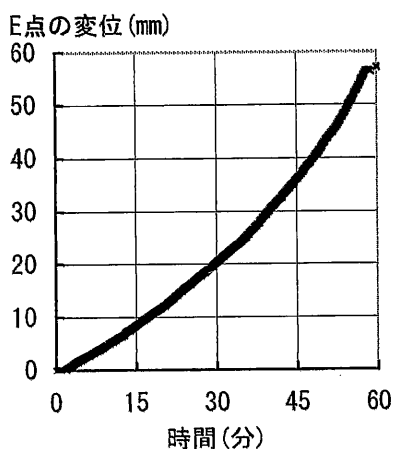
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



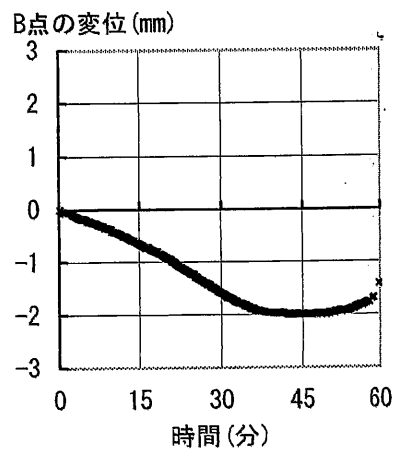
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



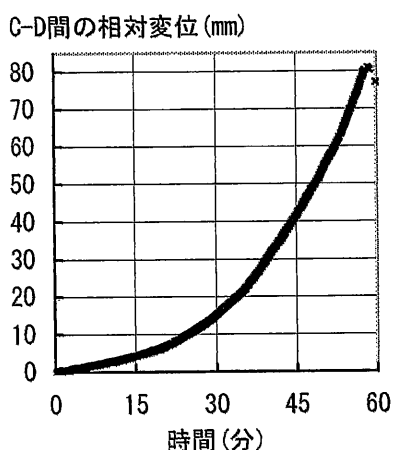
(ニ) 水平アクチュエーター変位



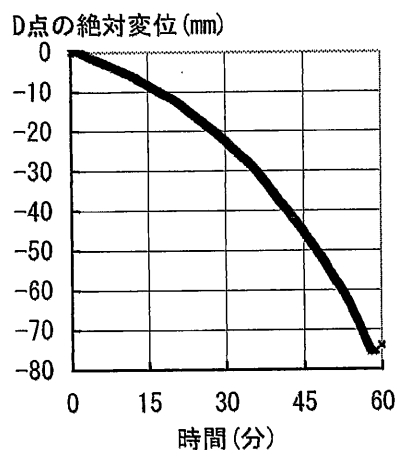
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



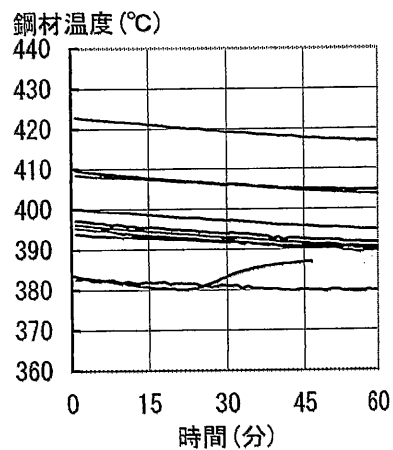
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(フ) 変位計2の値 (δ_D)

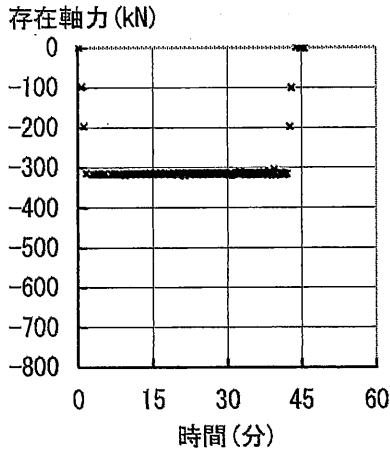


(リ) 鋼材温度

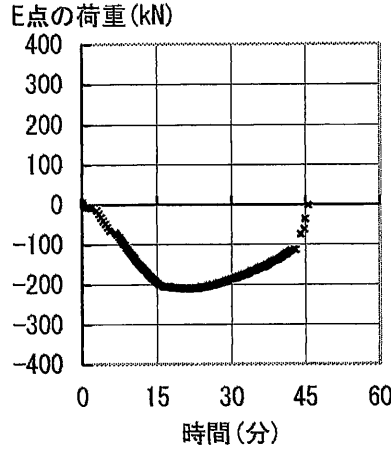
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

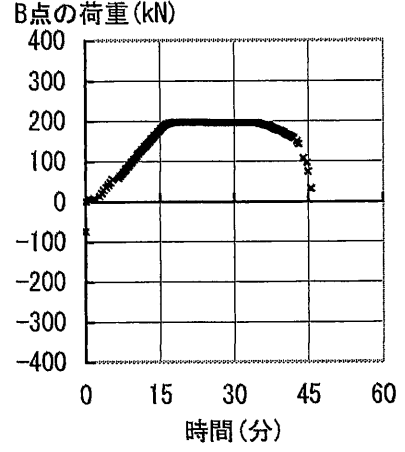
資図 38 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.3, 鋼材温度 400°C



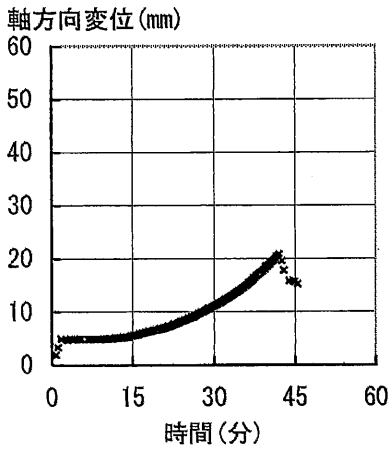
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



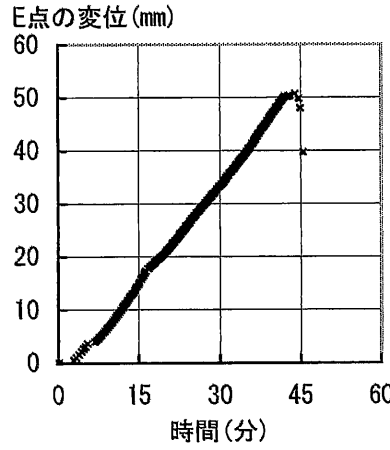
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



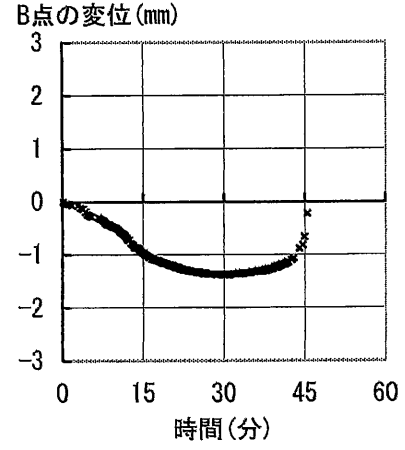
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



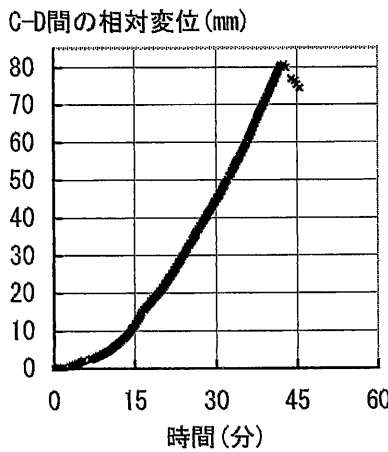
(ニ) 水平アクチュエーター変位



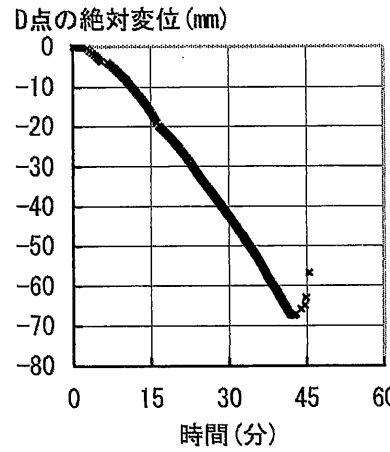
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



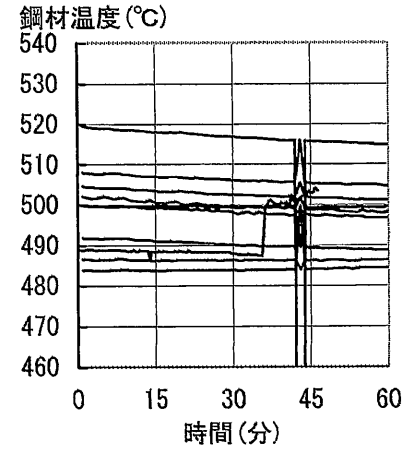
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{c0})



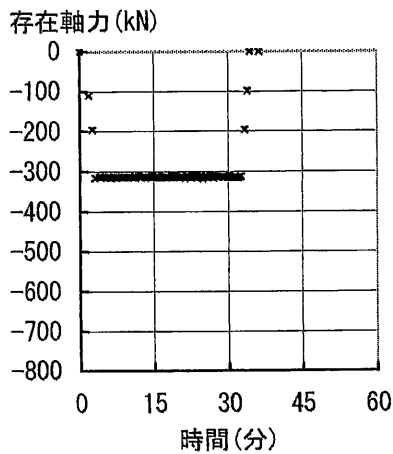
(チ) 変位計2の値 (δ_b)



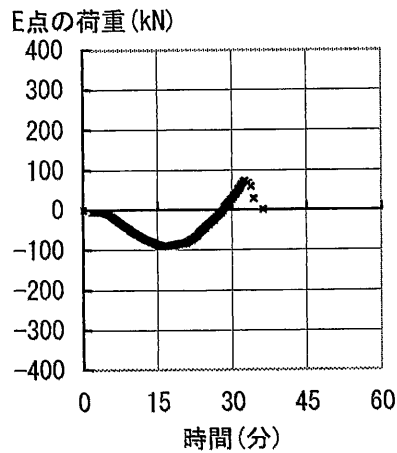
(リ) 鋼材温度

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。

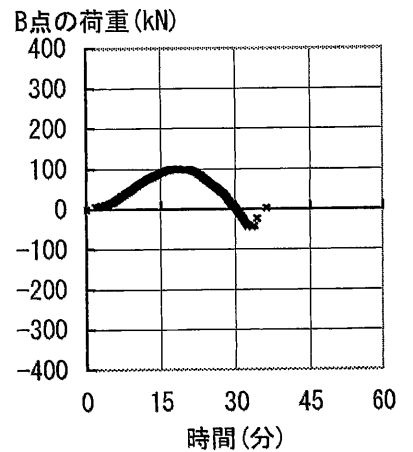
資図 39 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.3, 鋼材温度 500°C



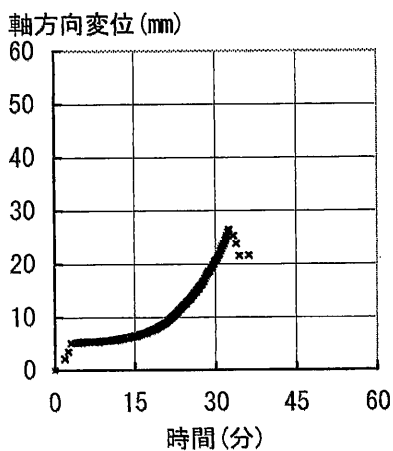
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



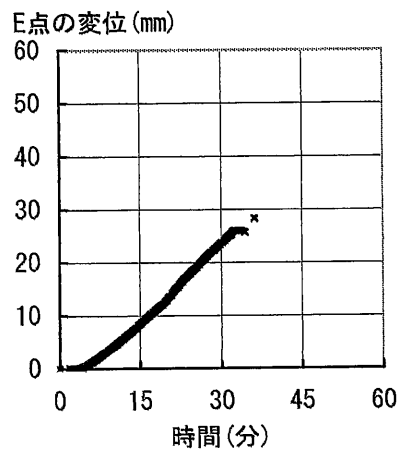
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



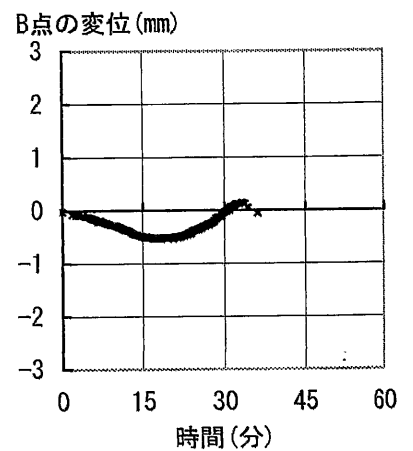
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



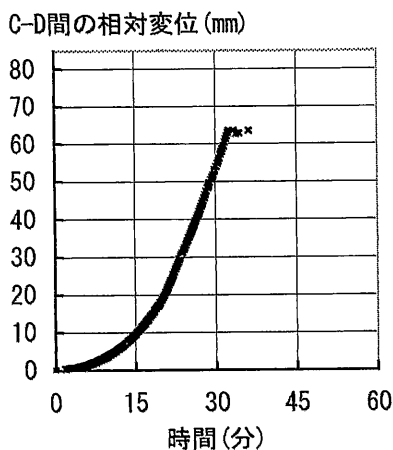
(ニ) 水平アクチュエーター変位



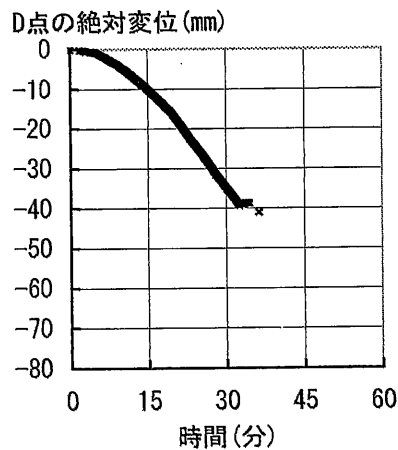
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



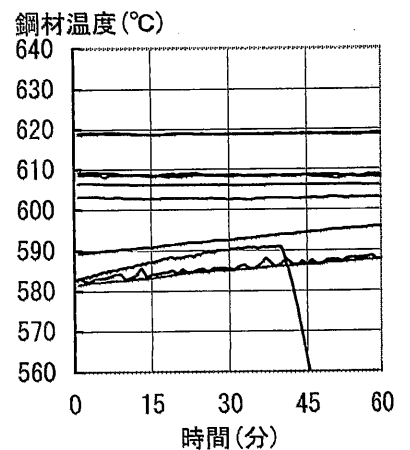
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

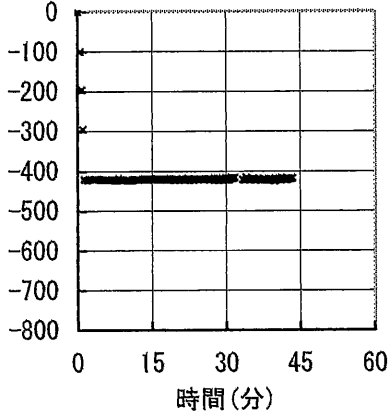


(リ) 鋼材温度

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。

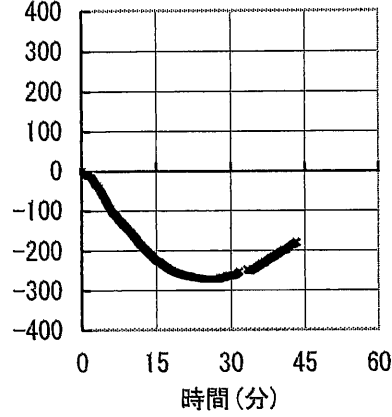
資図 40 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.3, 鋼材温度 600°C

存在軸力 (kN)



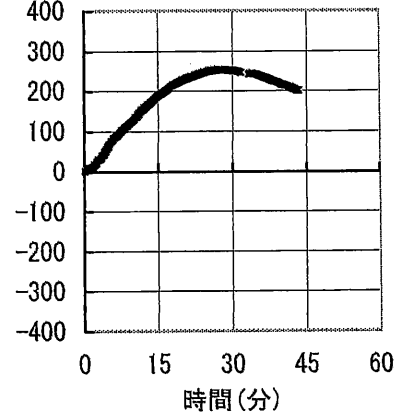
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)

E点の荷重 (kN)



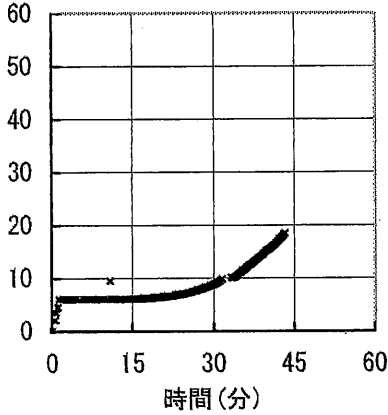
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)

B点の荷重 (kN)



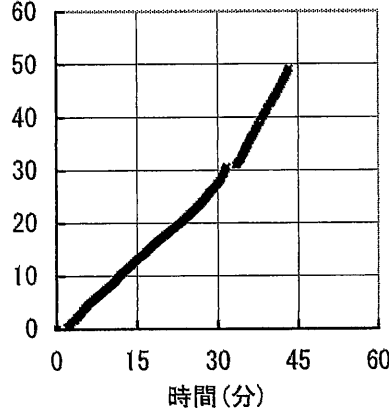
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)

軸方向変位 (mm)



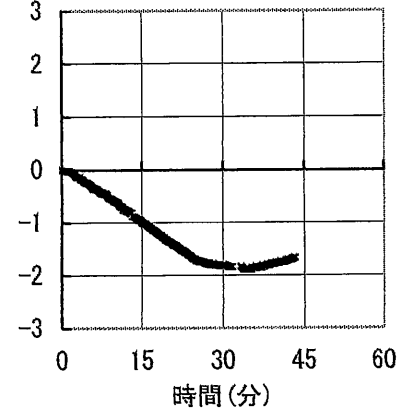
(ニ) 水平アクチュエーター変位

E点の変位 (mm)



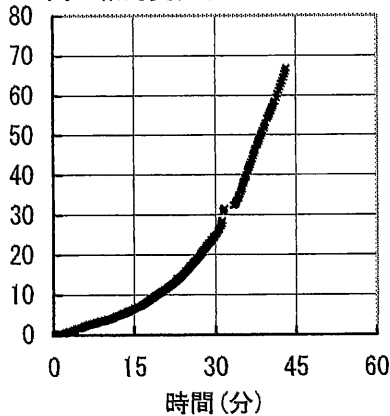
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位

B点の変位 (mm)



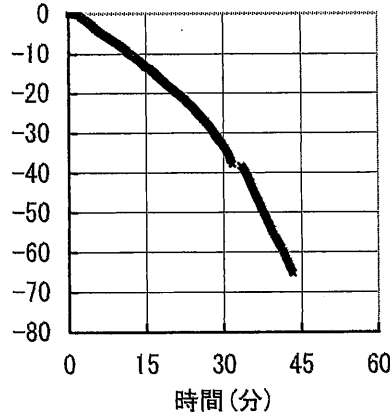
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位

C-D間の相対変位 (mm)



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})

D点の絶対変位 (mm)

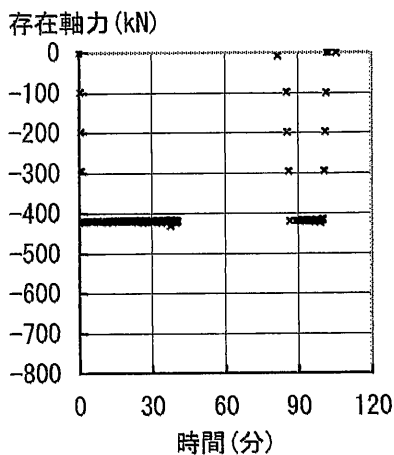


(フ) 変位計2の値 (δ_D)

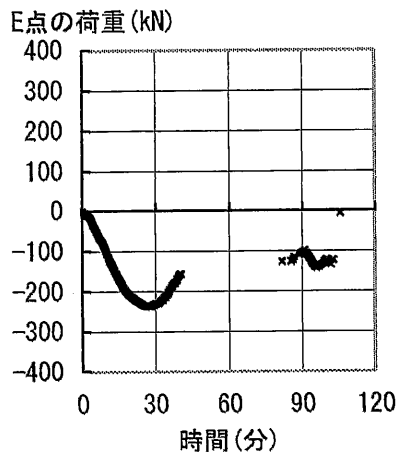
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

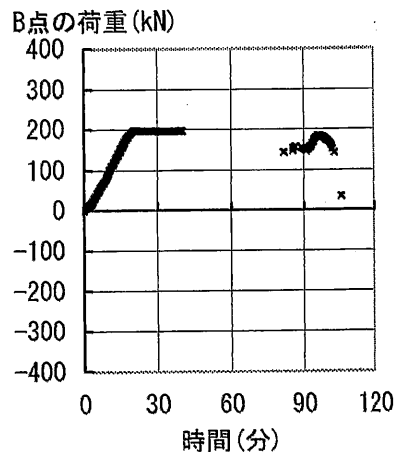
資図 41 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.4, 常温



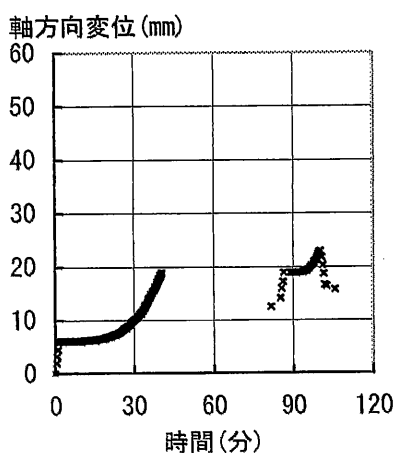
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



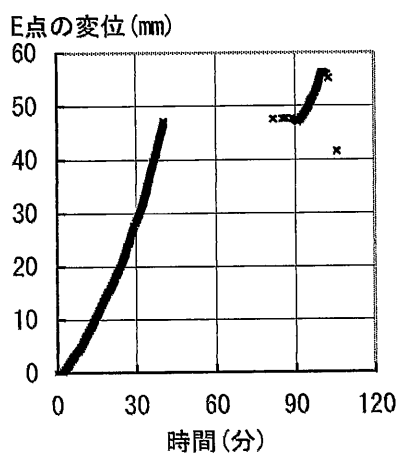
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



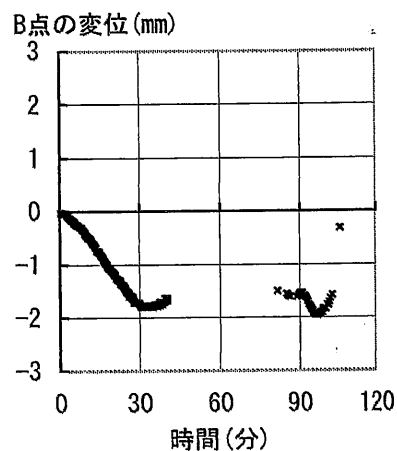
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



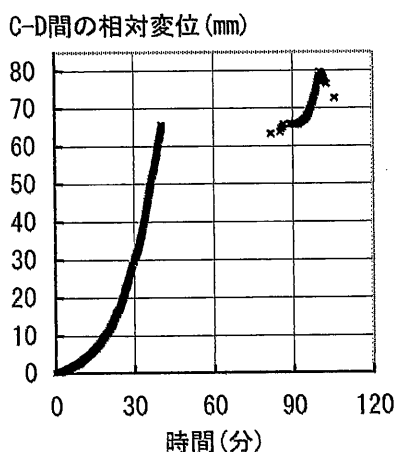
(ニ) 水平アクチュエーター変位



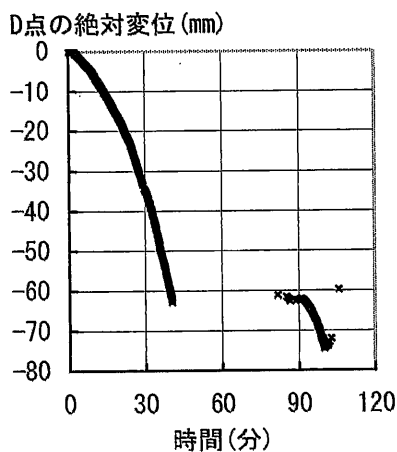
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



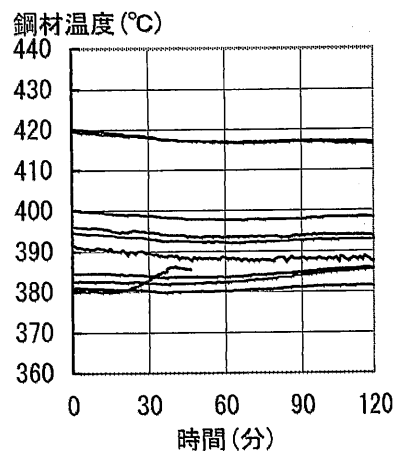
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



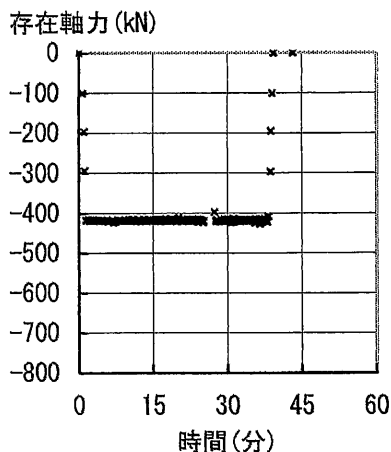
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



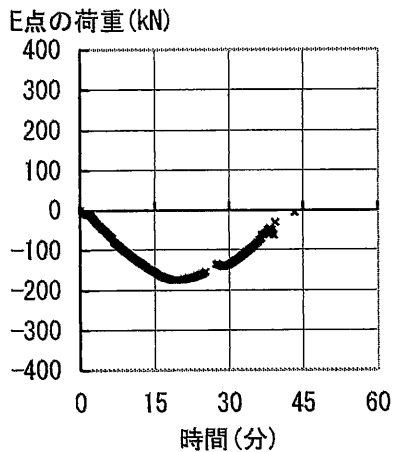
(リ) 鋼材温度

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。

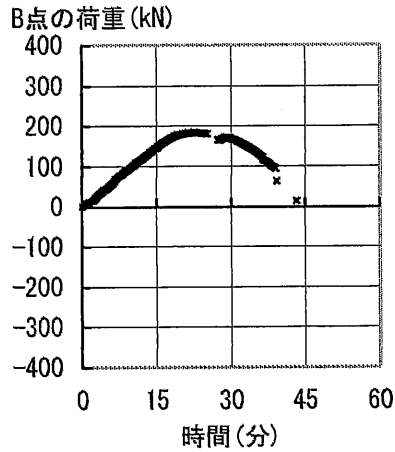
資図 42 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.4, 鋼材温度 400°C



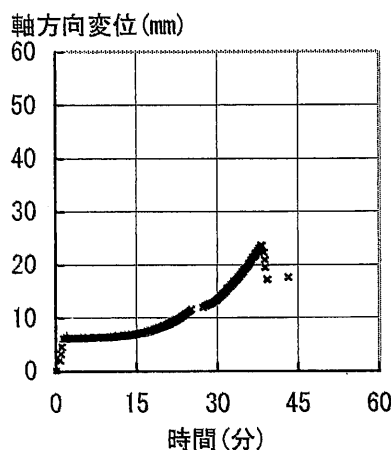
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



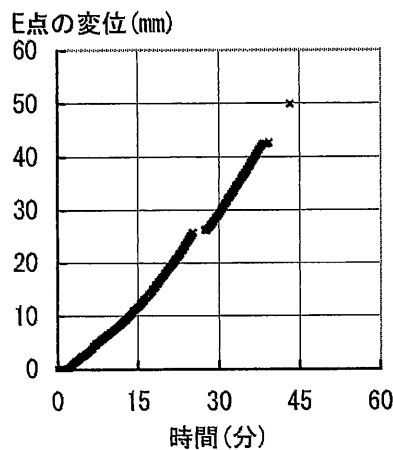
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



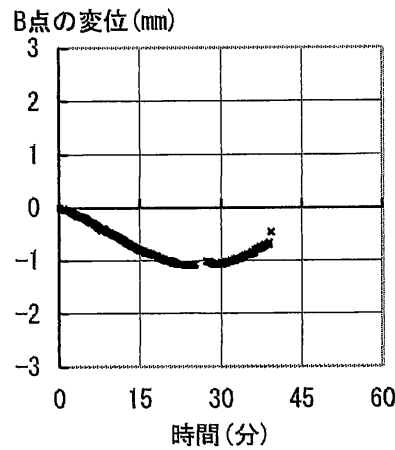
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



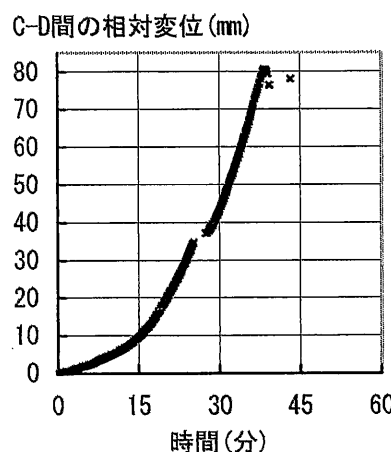
(ニ) 水平アクチュエーター変位



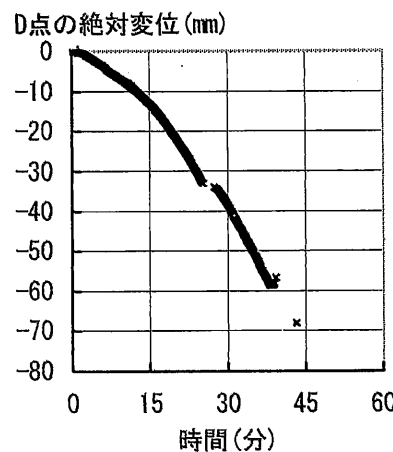
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



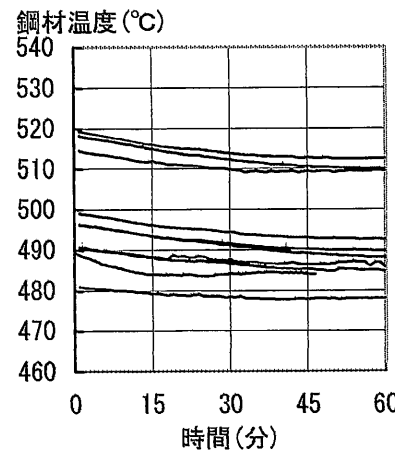
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{cp})



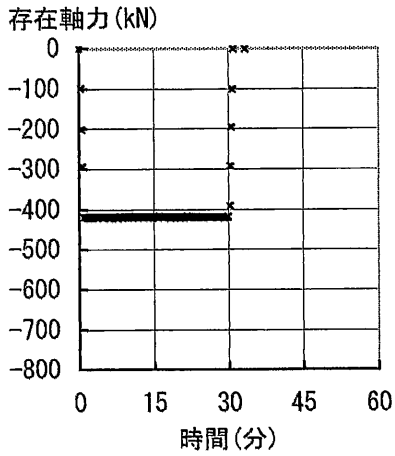
(フ) 変位計2の値 (δ_p)



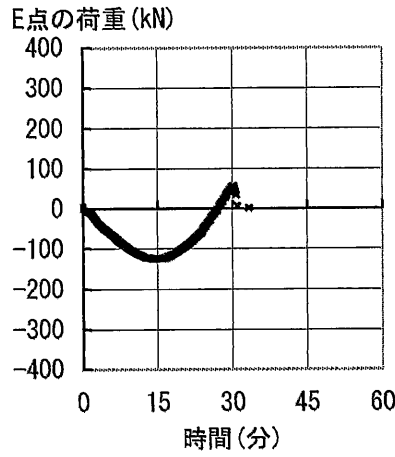
(リ) 鋼材温度

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。

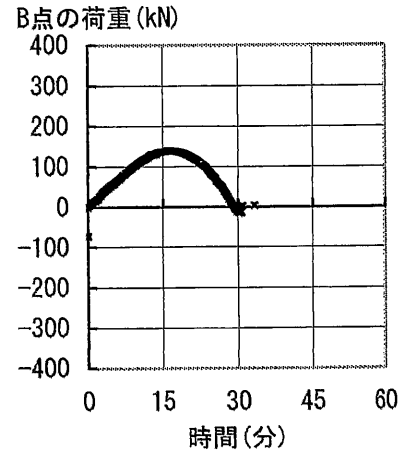
資図 43 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.4, 鋼材温度 500°C



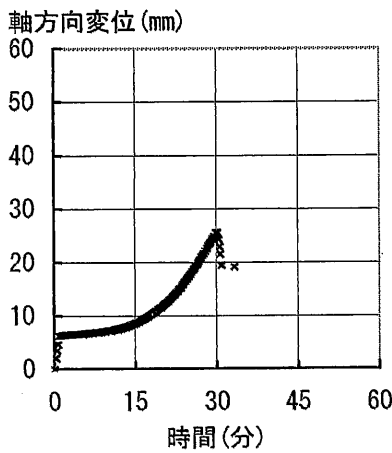
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



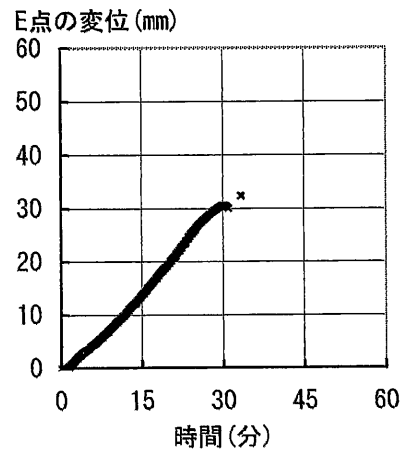
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



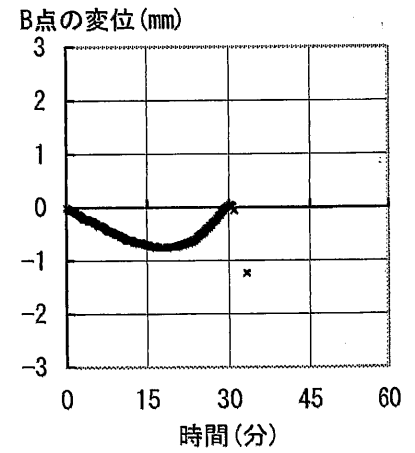
(ハ) ヒン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



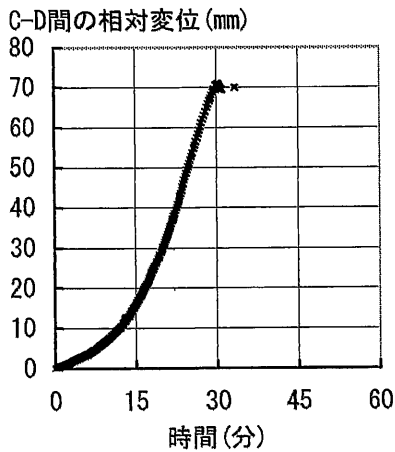
(ニ) 水平アクチュエーター変位



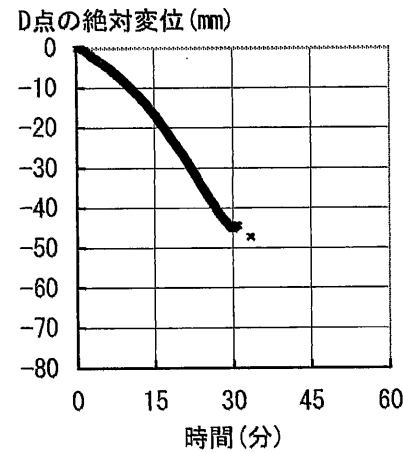
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



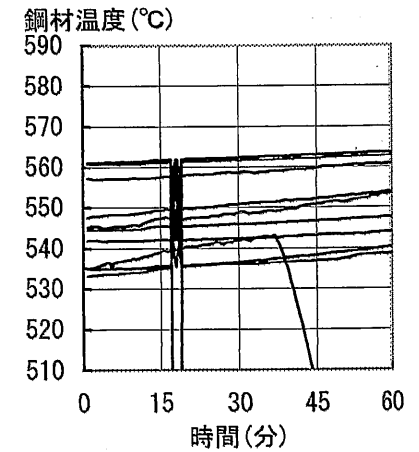
(ヘ) ヒン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{cp})



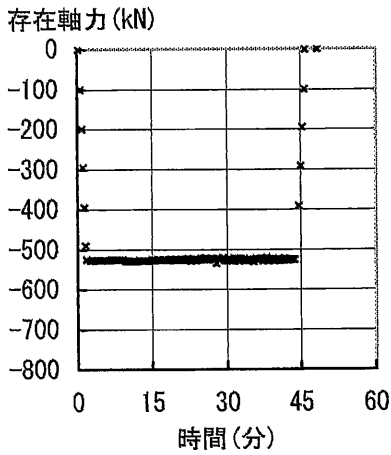
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



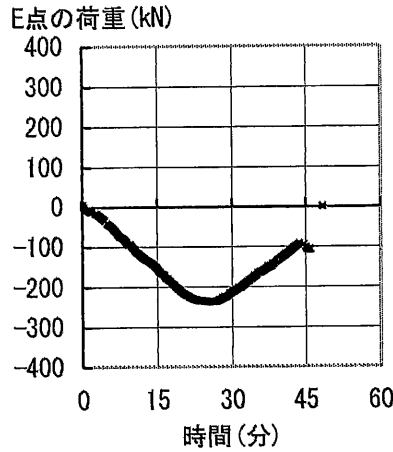
(リ) 鋼材温度

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。

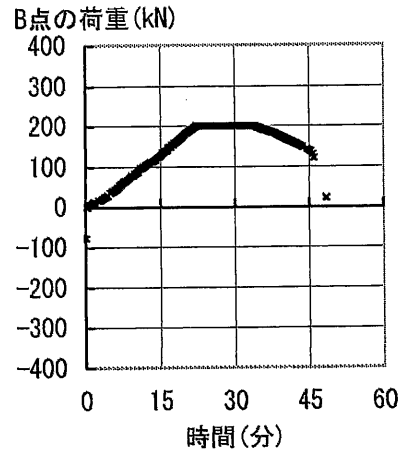
資図 44 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.4, 鋼材温度 550°C



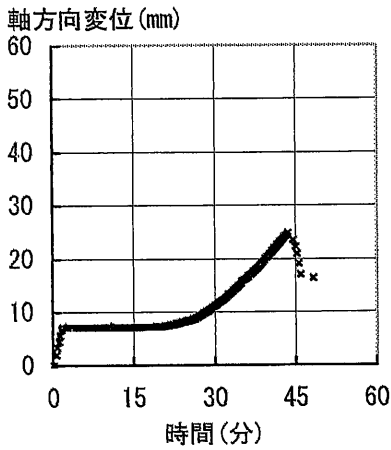
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



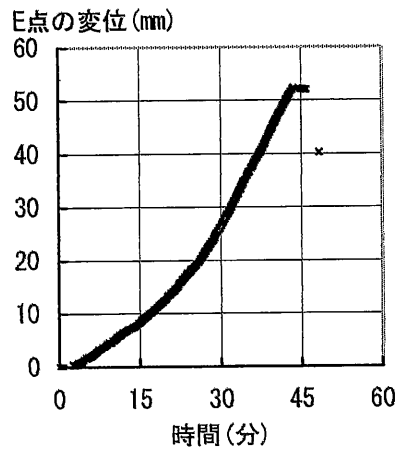
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



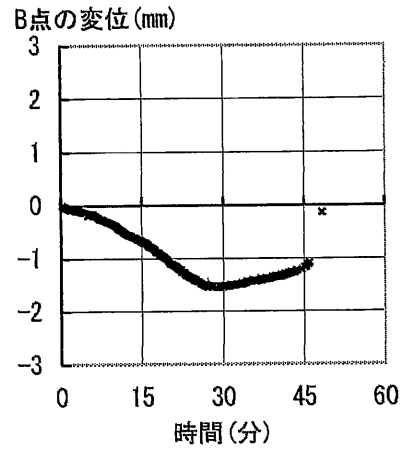
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



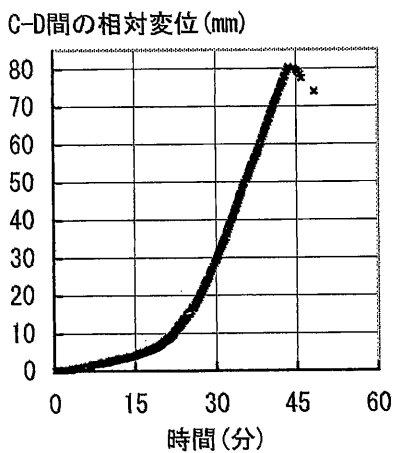
(ニ) 水平アクチュエーター変位



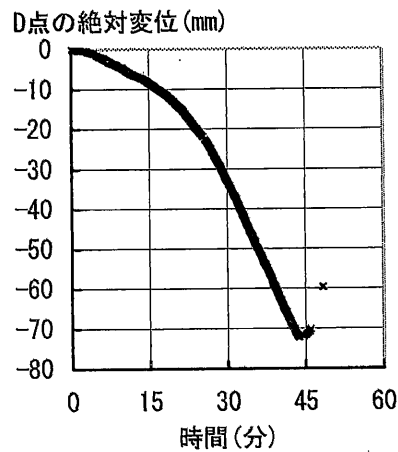
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



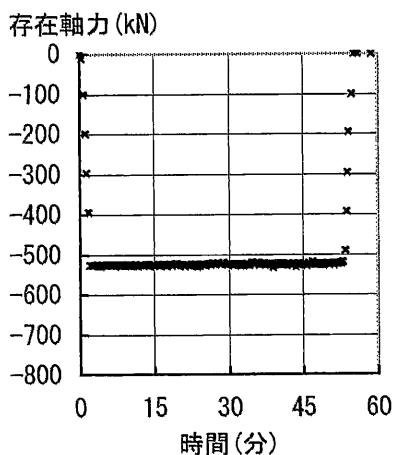
(ト) 変位計1の値 (δ_{cD})



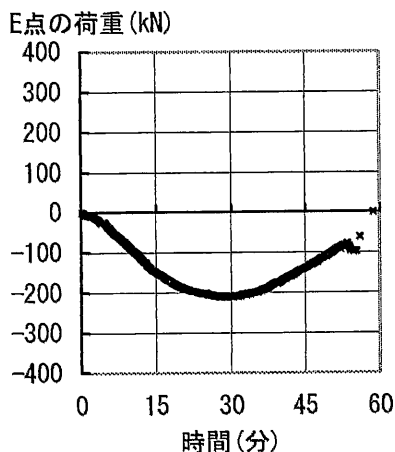
(チ) 変位計2の値 (δ_D)

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。

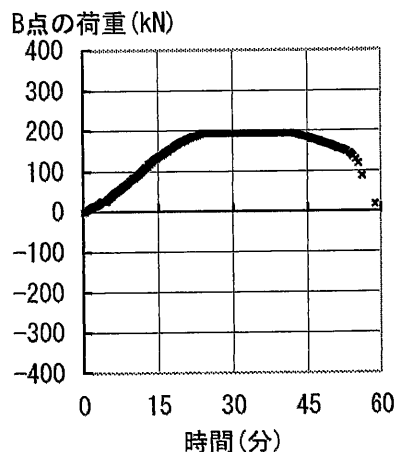
資図 45 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.5, 常温



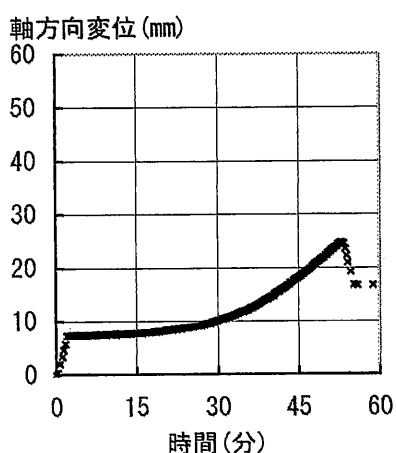
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



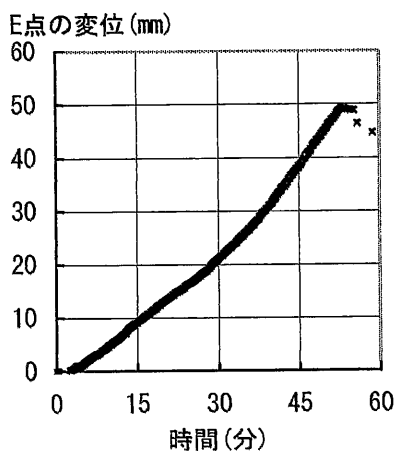
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



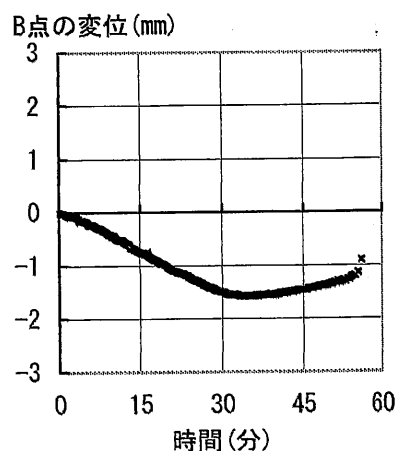
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



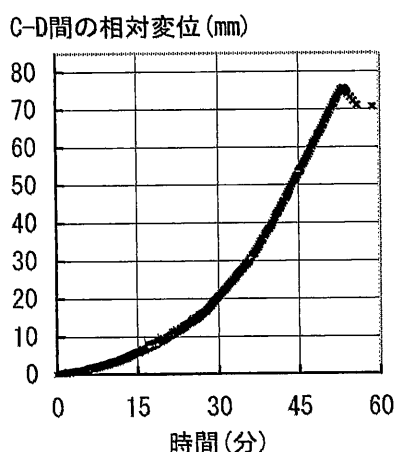
(ニ) 水平アクチュエーター変位



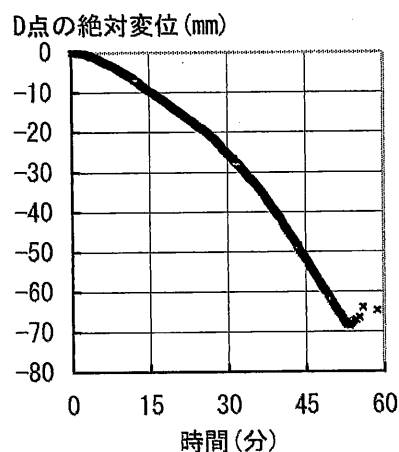
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



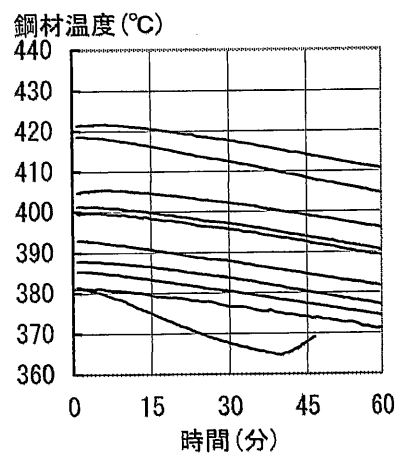
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



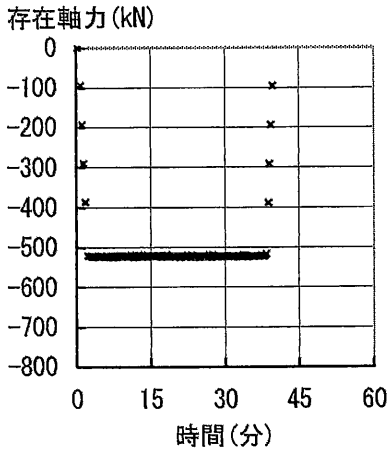
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



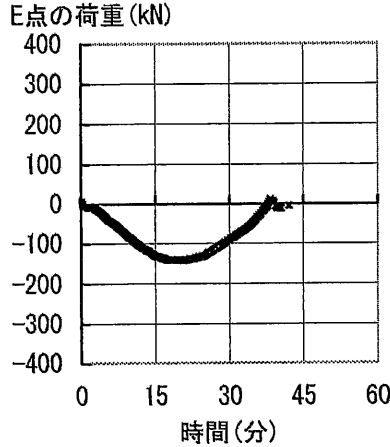
(リ) 鋼材温度

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。

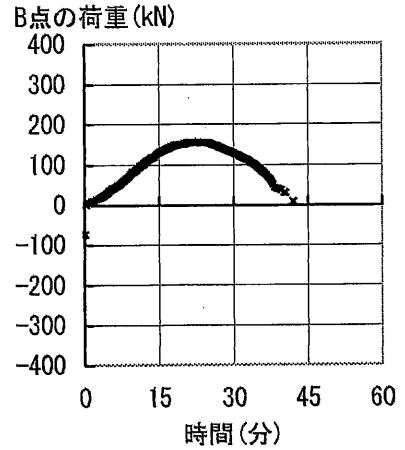
資図 46 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.5, 鋼材温度 400°C



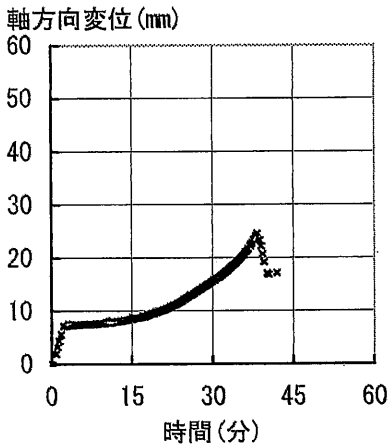
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



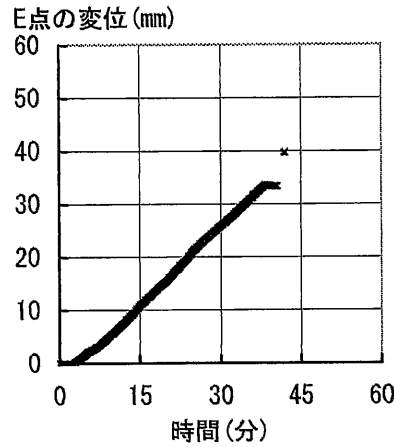
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



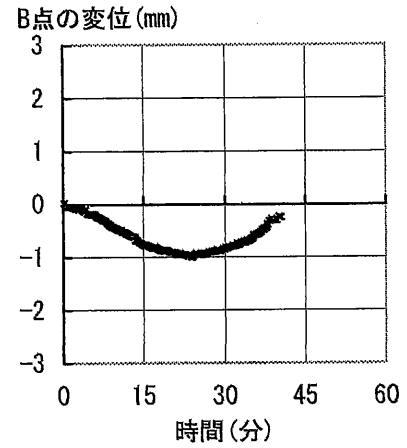
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



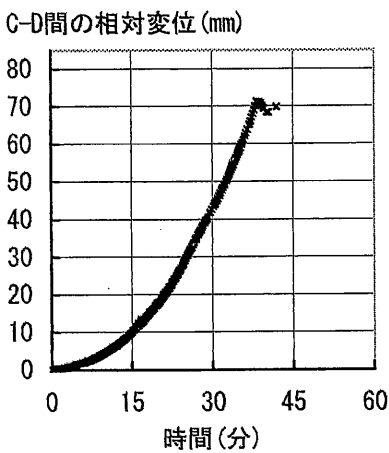
(ニ) 水平アクチュエーター変位



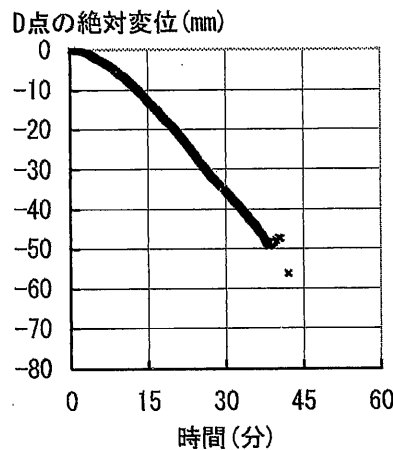
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



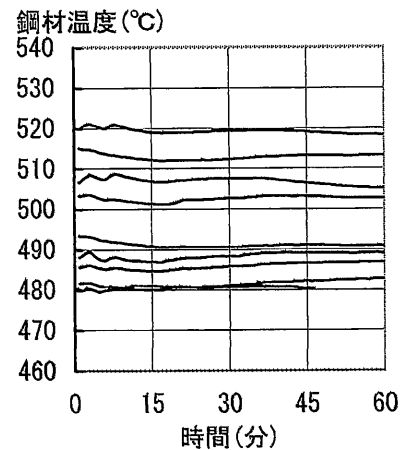
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



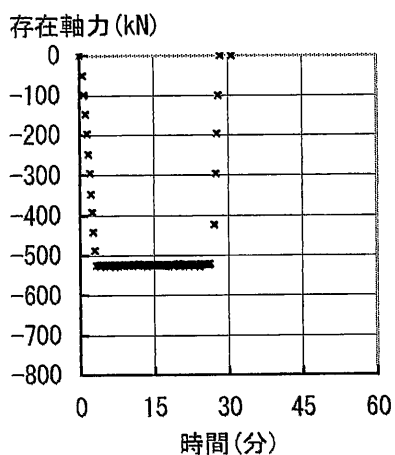
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



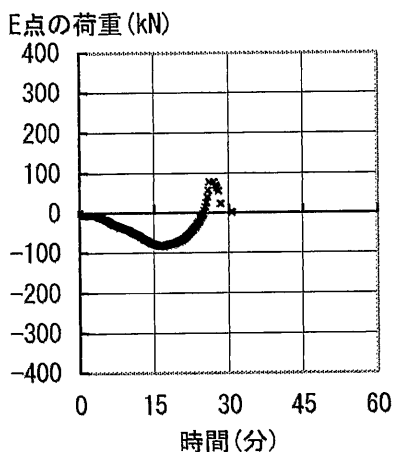
(リ) 鋼材温度

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。

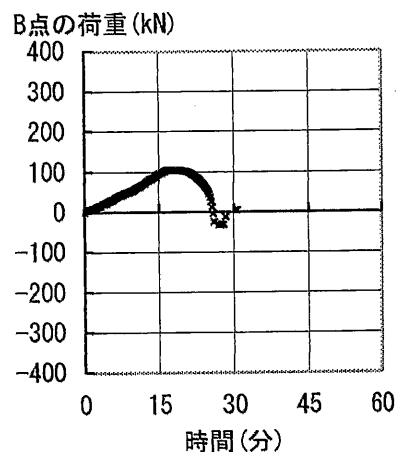
資図 47 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.5, 鋼材温度 500°C



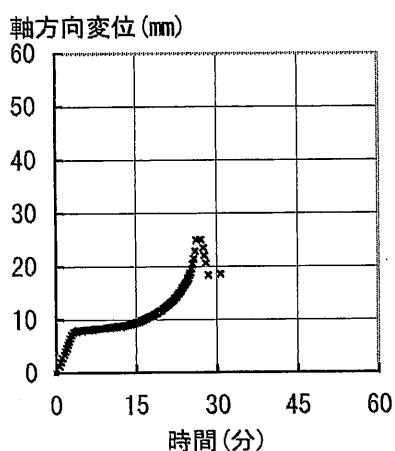
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



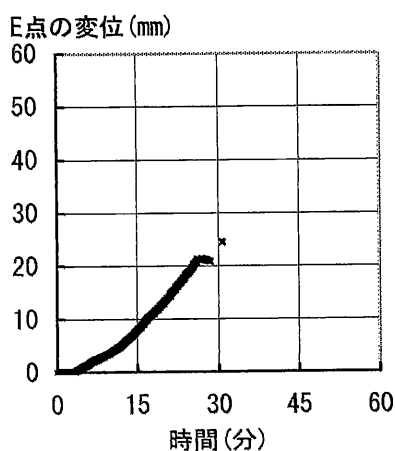
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



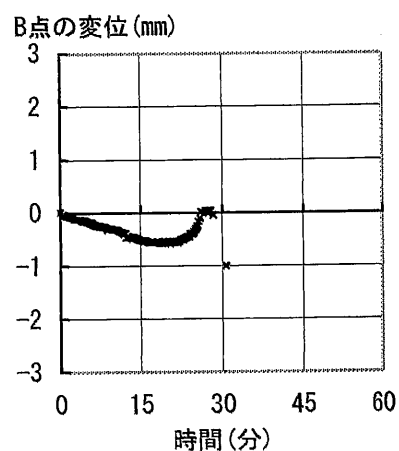
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



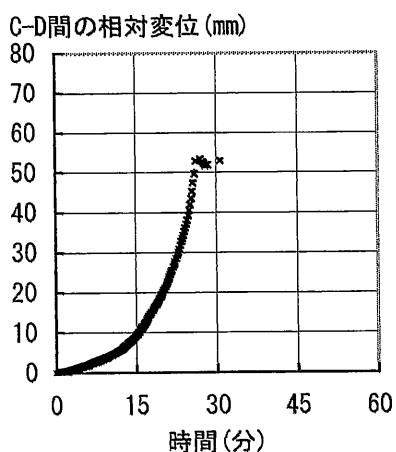
(ニ) 水平アクチュエーター変位



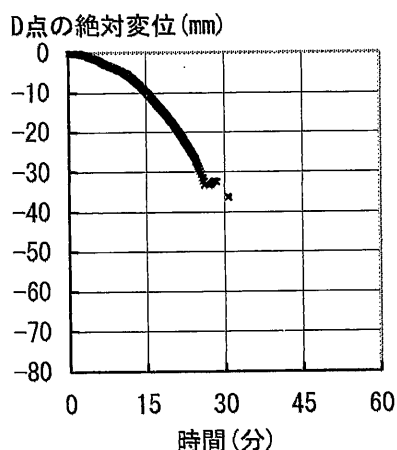
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



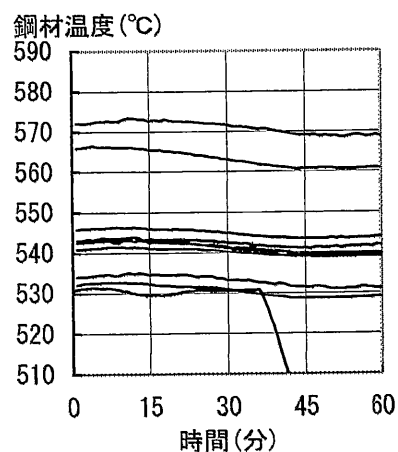
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{cd})



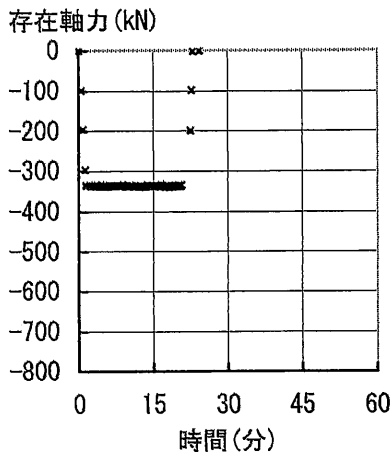
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



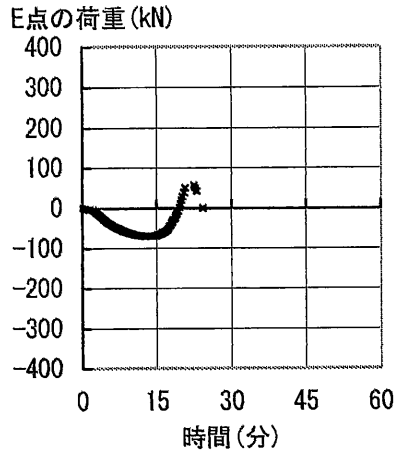
(リ) 鋼材温度

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。

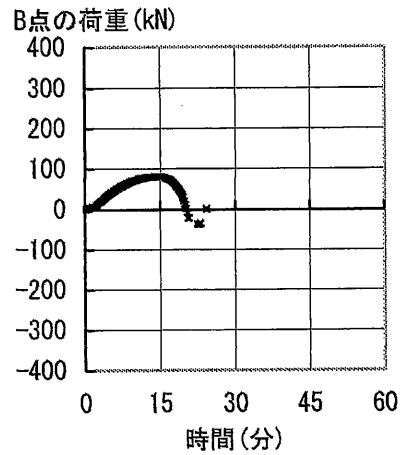
資図 48 箱形断面部材 (裏当て金あり), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.5, 鋼材温度 550°C



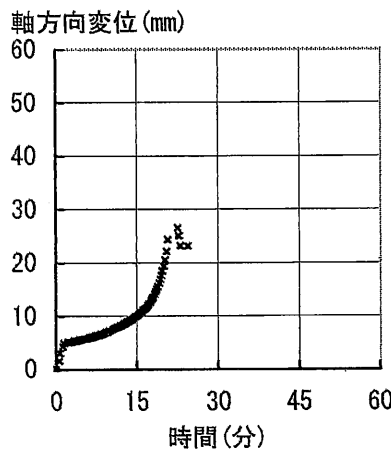
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



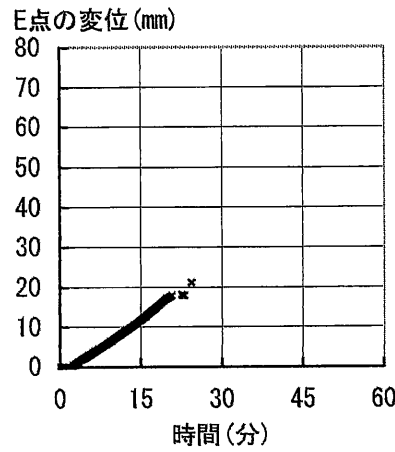
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



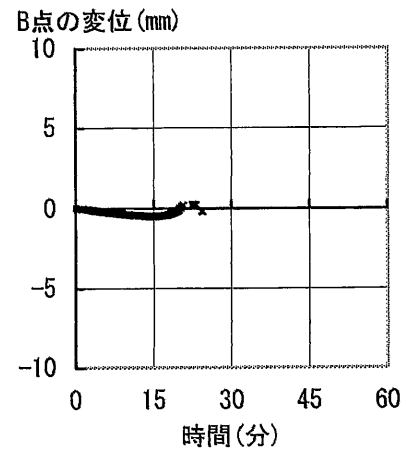
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



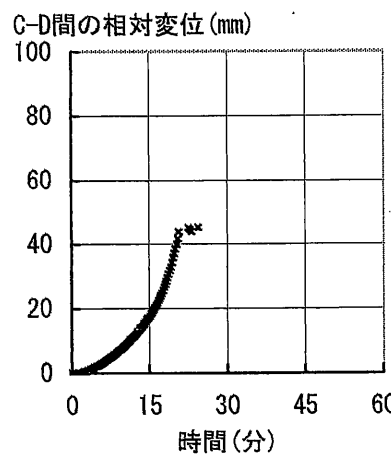
(ニ) 水平アクチュエーター変位



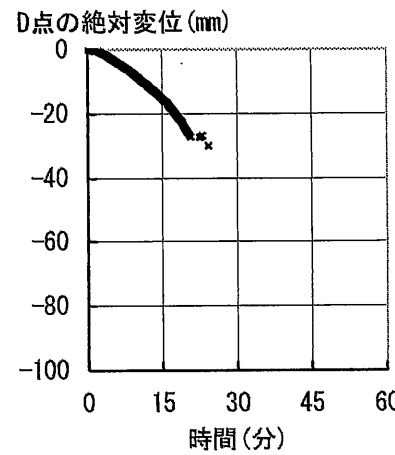
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



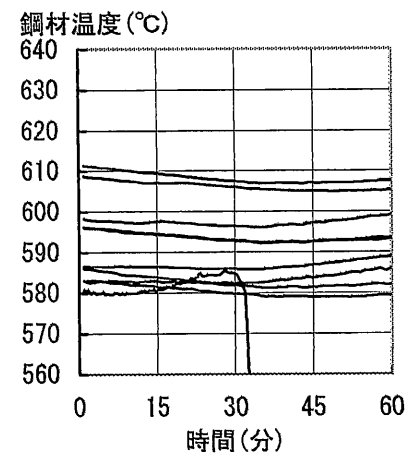
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{op})



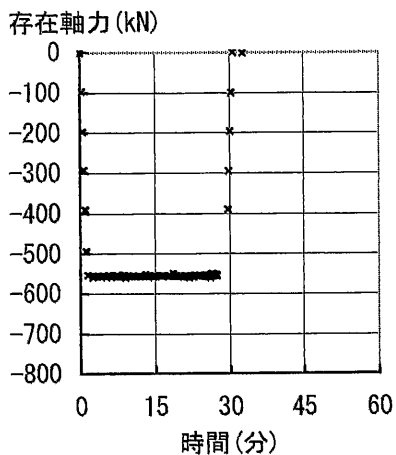
(チ) 変位計2の値 (δ_o)



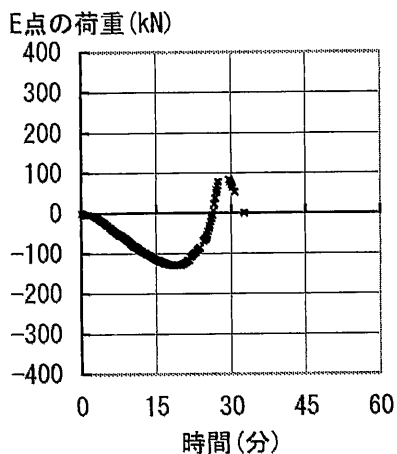
(リ) 鋼材温度

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。

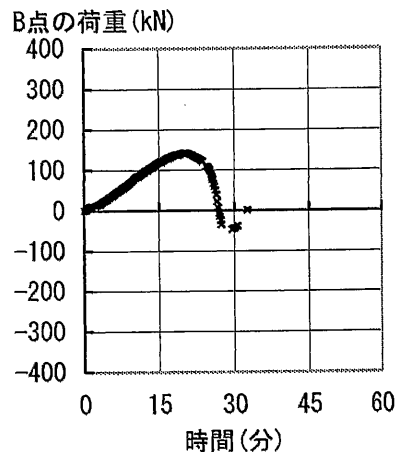
資図 49 箱形断面部材 (裏当て金なし), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.3, 鋼材温度 600°C



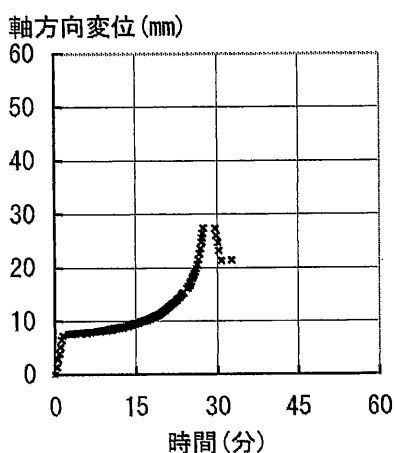
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



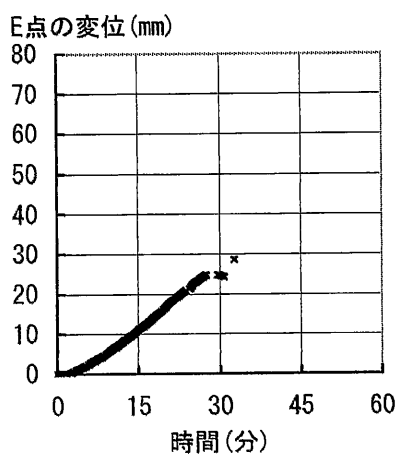
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



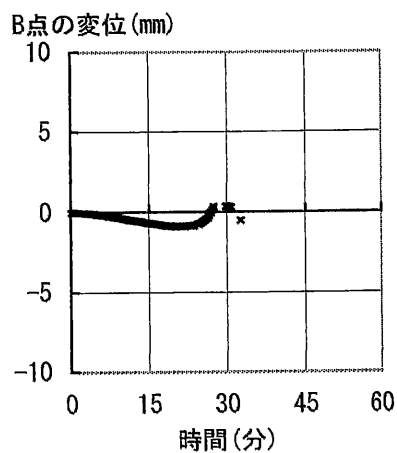
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



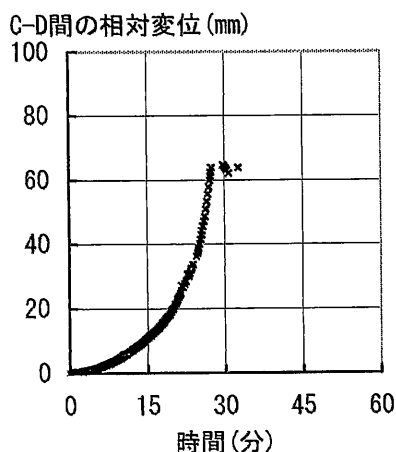
(ニ) 水平アクチュエーター変位



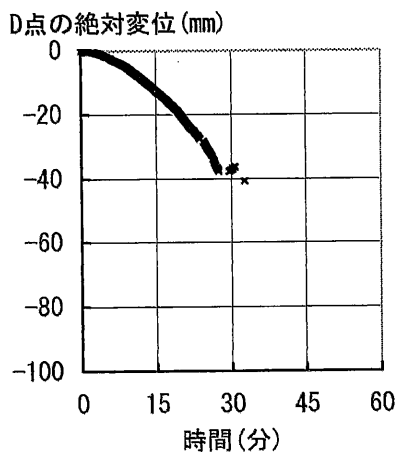
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



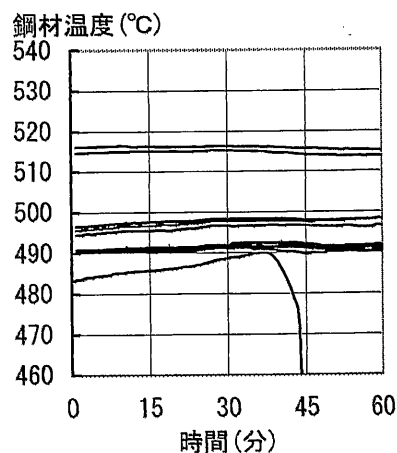
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{cD})



(チ) 変位計2の値 (δ_D)

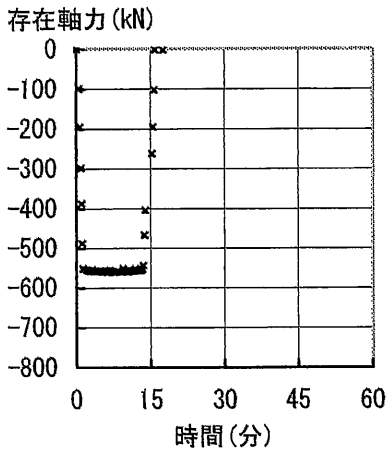


(リ) 鋼材温度

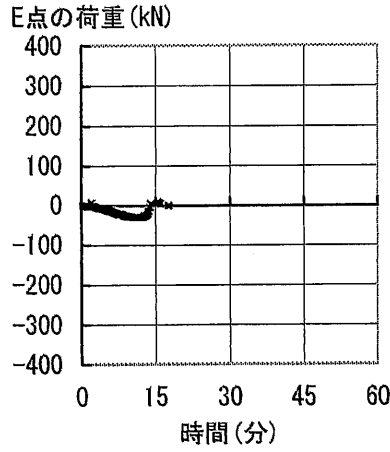
注1) アクチュエーターの荷重は、引張を正とし、圧縮を負として表示している。

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。

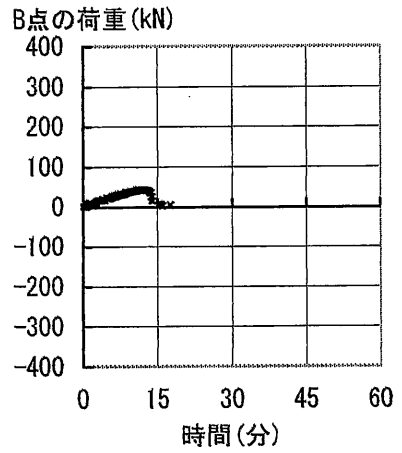
資図 50 箱形断面部材 (裏当て金なし), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.5, 鋼材温度 500°C



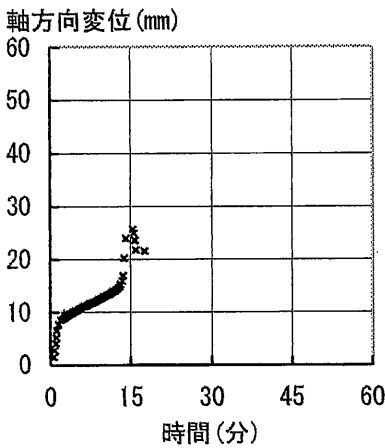
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



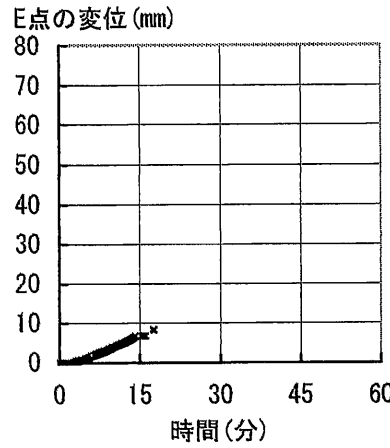
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



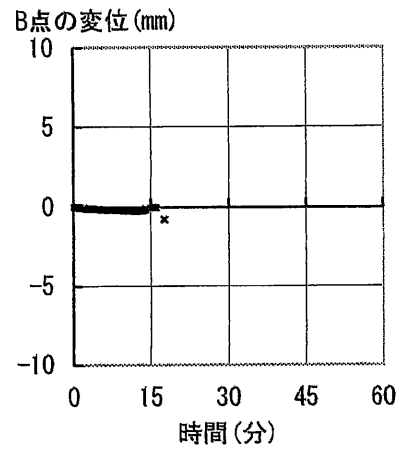
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



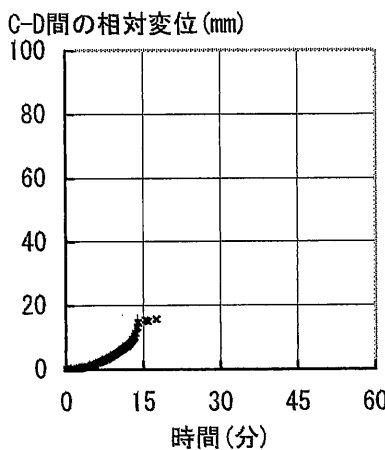
(ニ) 水平アクチュエーター変位



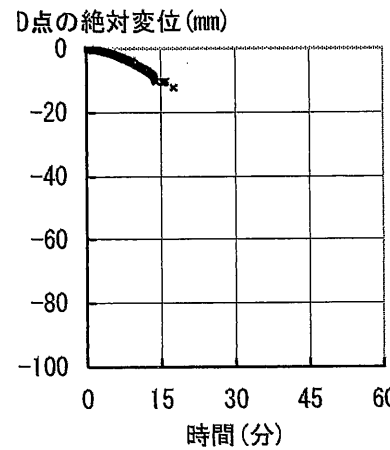
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



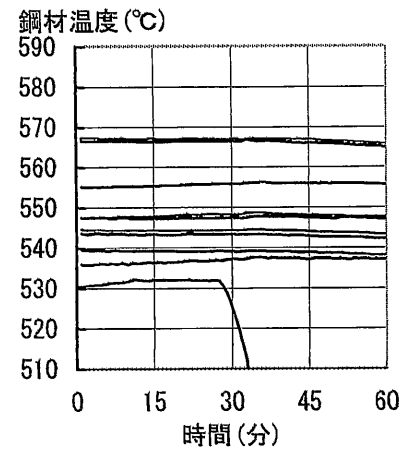
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



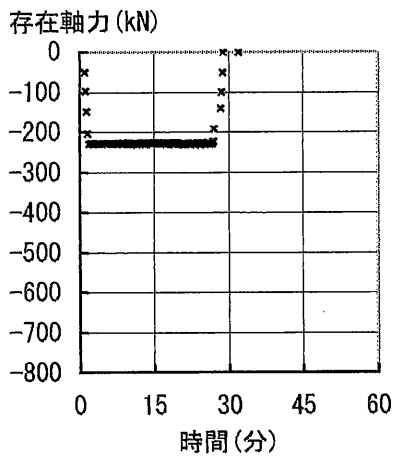
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



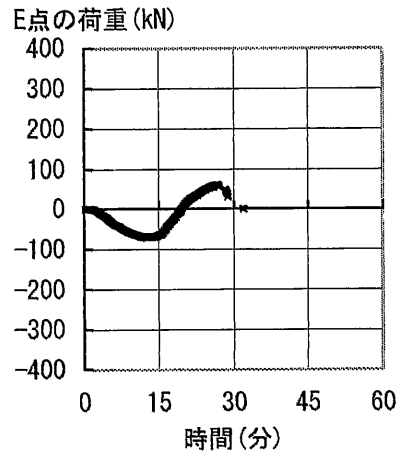
(リ) 鋼材温度

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。

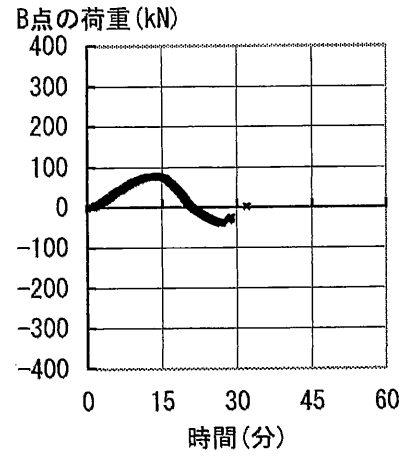
資図 51 箱形断面部材 (裏当て金なし), 幅厚比 $d/t=25$, 軸力比 0.5, 鋼材温度 550°C



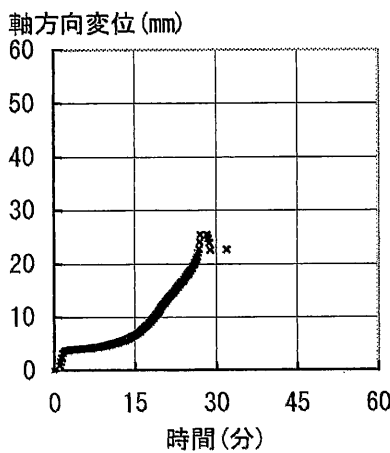
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



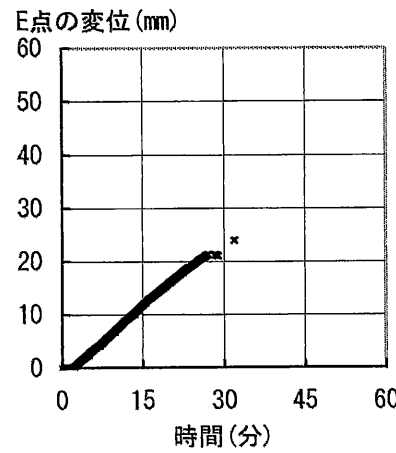
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



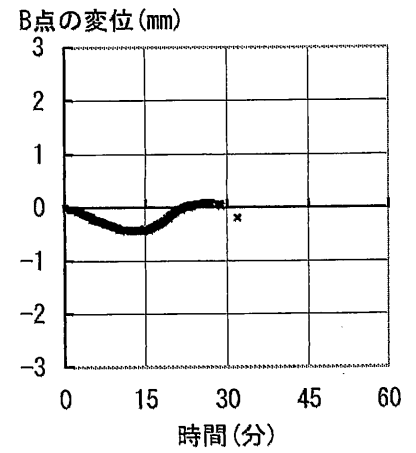
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



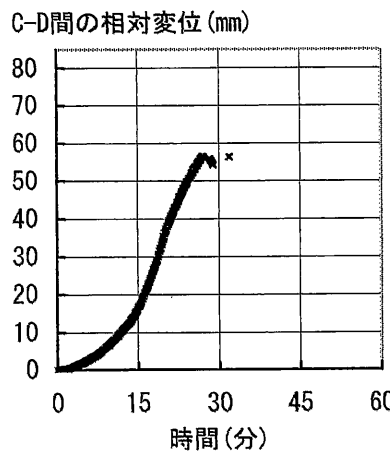
(ニ) 水平アクチュエーター変位



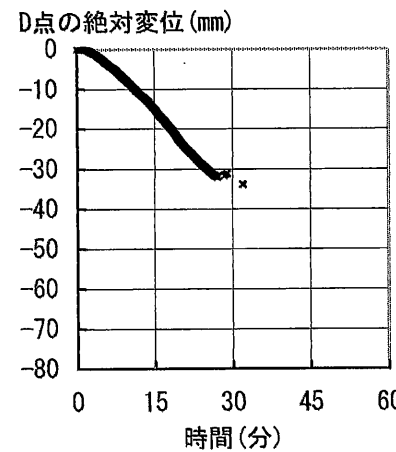
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



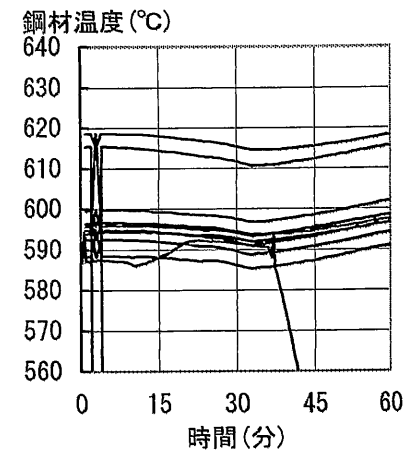
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



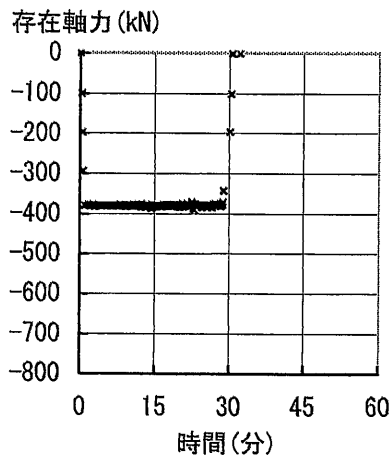
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



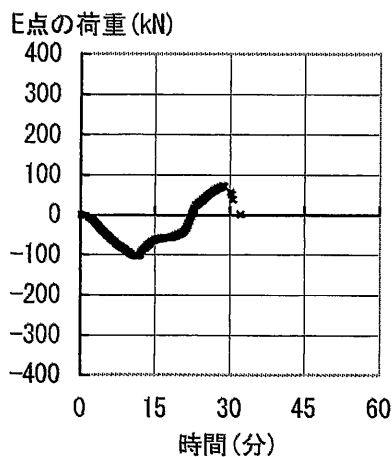
(リ) 鋼材温度

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。

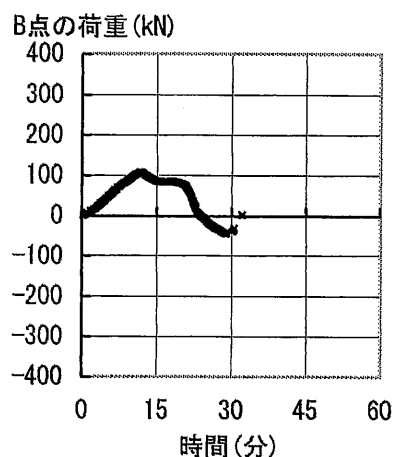
資図 52 箱形断面部材 (裏当て金なし), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.3, 鋼材温度 600°C



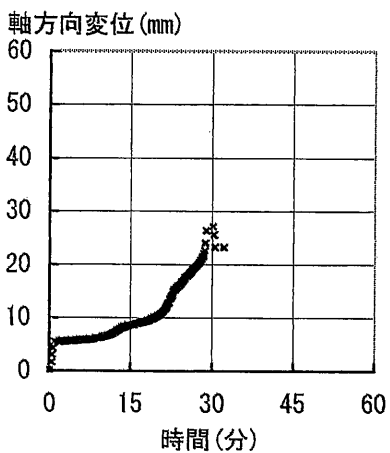
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



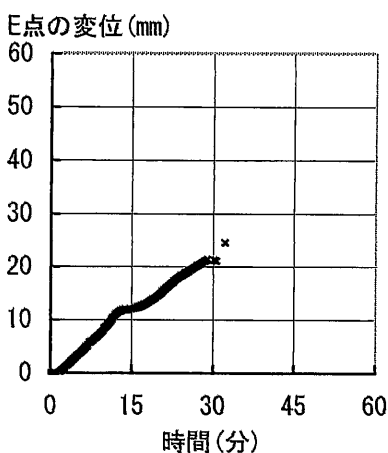
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



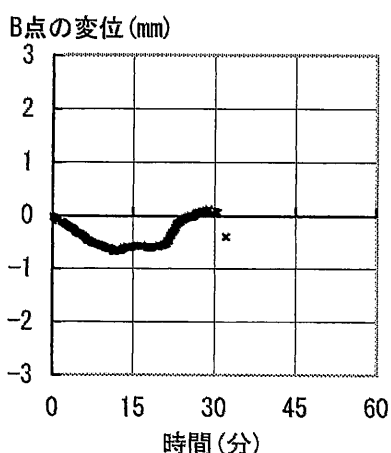
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



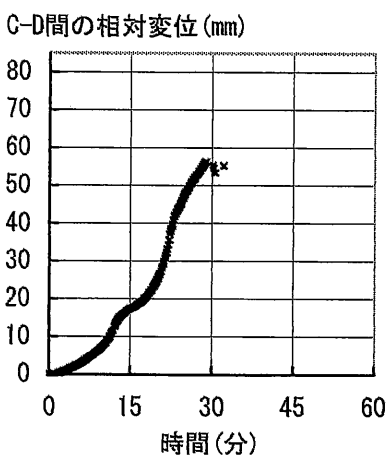
(ニ) 水平アクチュエーター変位



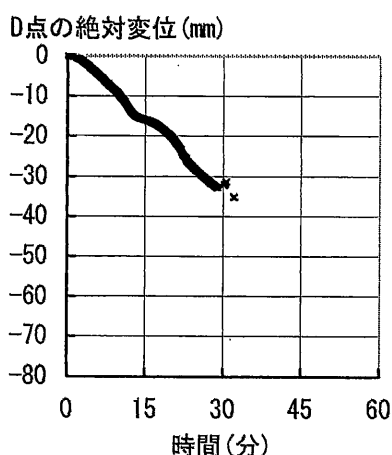
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



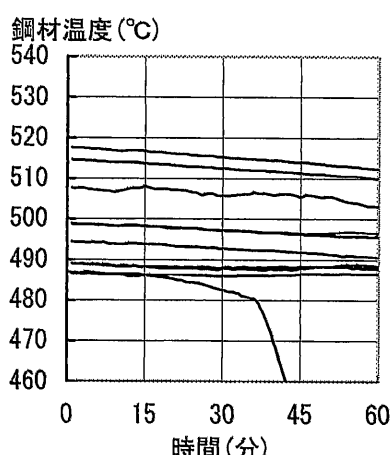
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_0)



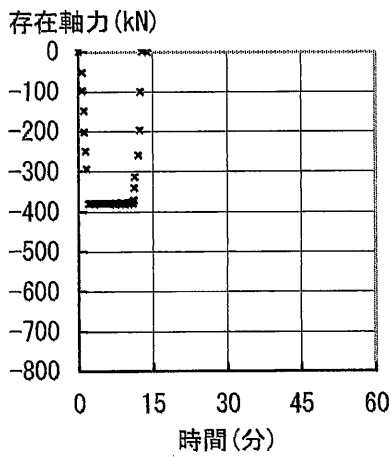
(チ) 変位計2の値 (δ_D)



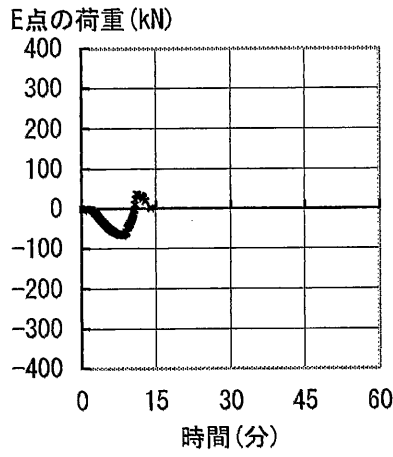
(リ) 鋼材温度

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。

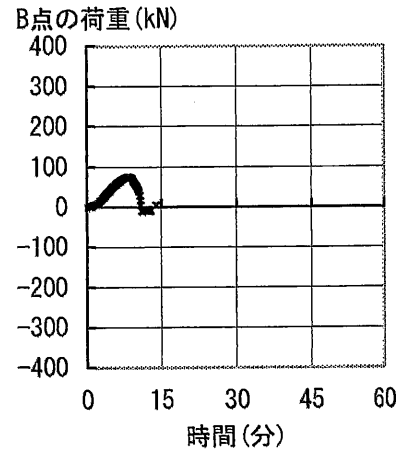
資図 53 箱形断面部材 (裏当て金なし), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.5, 鋼材温度 500°C



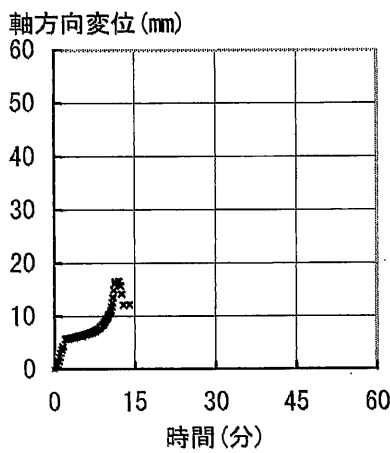
(イ) 水平アクチュエーター荷重 (P)



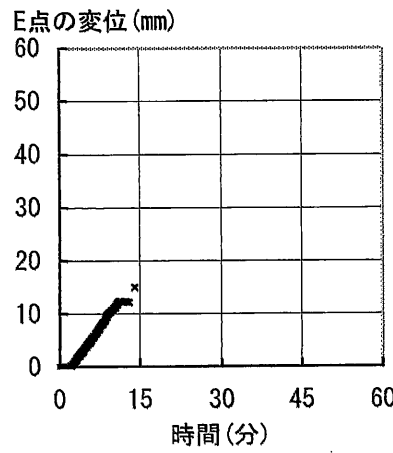
(ロ) 加力側垂直アクチュエーター荷重 (L_1)



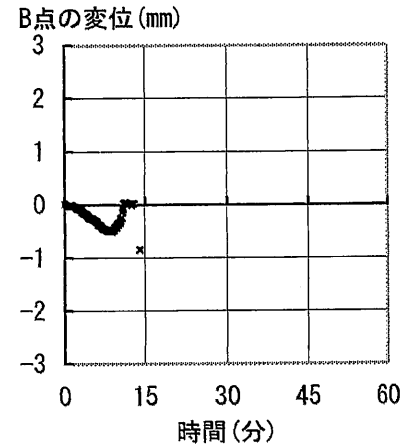
(ハ) ピン支持側垂直アクチュエーター荷重 (L_2)



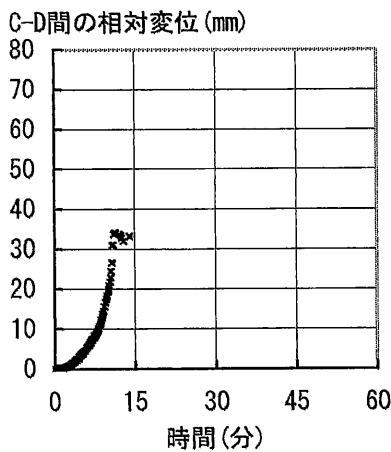
(ニ) 水平アクチュエーター変位



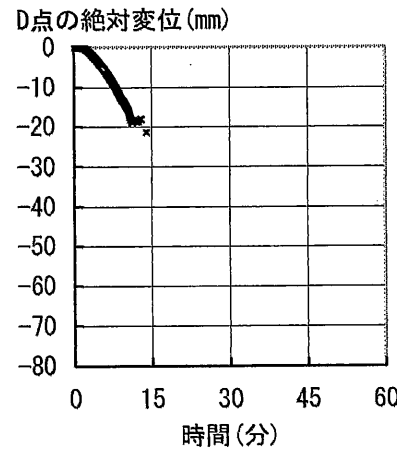
(ホ) 加力側垂直アクチュエーター変位



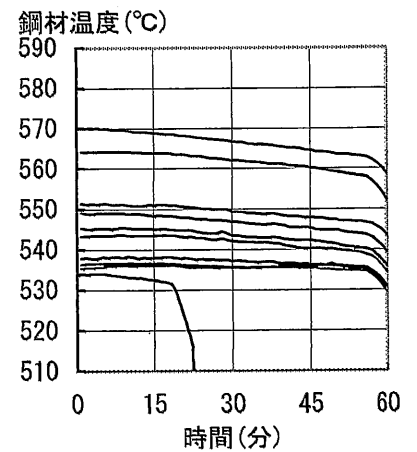
(ヘ) ピン支持側垂直アクチュエーター変位



(ト) 変位計1の値 (δ_{CD})



(フ) 変位計2の値 (δ_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。

資図 54 箱形断面部材 (裏当て金なし), 幅厚比 $d/t=30$, 軸力比 0.5, 鋼材温度 550°C

謝辭

謝辞

本論文は、多くの方々からの厚意あるご指導とご協力を頂いたことによって完成されました。下記の皆様には、慎んで御礼申し上げます。

本論文の審査にあたり、東京大学教授・菅原進一先生には、ご多忙にもかかわらず主査を引き受けてくださり、暖かいご指導とご厚意を賜りました。東京大学教授・桑村仁先生，同助教授・大井謙一先生，同助教授・高田毅士先生，同講師・伊山潤先生には、今後の研究にも大いに参考となる貴重なご意見をいただきました。

本論文の主な内容は、(財)日本建築防災協会内に設置された「建築物の耐火設計法に関する研究委員会」(略称：FIRST 委員会，期間：平成 8 年度～平成 10 年度，委員長：齋藤光 千葉大学名誉教授)の研究成果を取りまとめたものです。FIRST 委員会は建設会社 6 社による共同研究会であり、佐藤工業(株)，戸田建設(株)，西松建設(株)，(株)間組，(株)フジタ，前田建設工業(株)の関係各位により本実験は企画・立案され、千葉大学名誉教授・齋藤光先生，千葉大学教授・上杉英樹先生，(財)ベターリビング・中村賢一部長，(独)建築研究所・山内泰之理事長，(財)日本建築総合試験所・吉田正友部長のご指導の下で実施されました。また、本実験は、当時千葉大学修士 2 年・現日本鋼管(株)・鈴木隆生氏をリーダーとして、1997 年度に在籍した千葉大学・上杉研究室の諸兄と建設会社 6 社の方々により、約半年間に渡り遂行されたものであります。

千葉大学を卒業した後に幸運にも耐火構造の研究を続けることができ、上述した FIRST 委員会に参画できたことは、(株)フジタ・高橋一郎リーダーの導きによるものでした。(株)フジタ・技術研究所に在勤中は、松戸正士先輩をはじめ、(株)フジタの多くの方々に支えられて研究を続けることができました。

恩師である千葉大学名誉教授・齋藤光先生との出会いは、学部 3 年生の頃、就職の相談に伺ったときでした。親身に相談にのっていただいた先生を頼り、耐火構造の齋藤研究室に入ったことが私の研究生生活の始まりでした。以来、今日に至るまで、齋藤先生には、いつもの的確なご指導とご助言をいただきました。

千葉大学教授・上杉英樹先生には、学生時代、(株)フジタ在勤中、また助手として再び千葉大学に戻った今日に至るまで、常に暖かい激励と懇切丁寧なご指導をいただきました。本論文の作成にあたって、一字一句に至るまで丁寧に読み合わせていただきました。

2002年度に在籍した千葉大学・上杉研究室の諸兄には、論文作成にあたり多大なる協力をいただきました。また、終始にぎやかな雰囲気の下、何度も励まされました。

最後に、本実験が滞りなく成功した背景には、齋藤・中川・上杉研究室の諸先輩方による数多くの試行錯誤が集積されていることを追記いたします。

ここに記して、心より御礼申し上げます。

發表論文

I. 本研究に関連する論文

- 1) 平島岳夫, 織茂俊泰, 菊田繁美, 高橋孝二, 堀昭夫, 中込昭, 松戸正士, 鈴木隆生, 吉田正友, 山内泰之, 中村賢一, 上杉英樹, 齋藤光:「高温時における鋼構造部材の耐力変形性能に関する研究」, 構造工学論文集 Vol.46B, pp.735-746, 2000年3月
- 2) 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

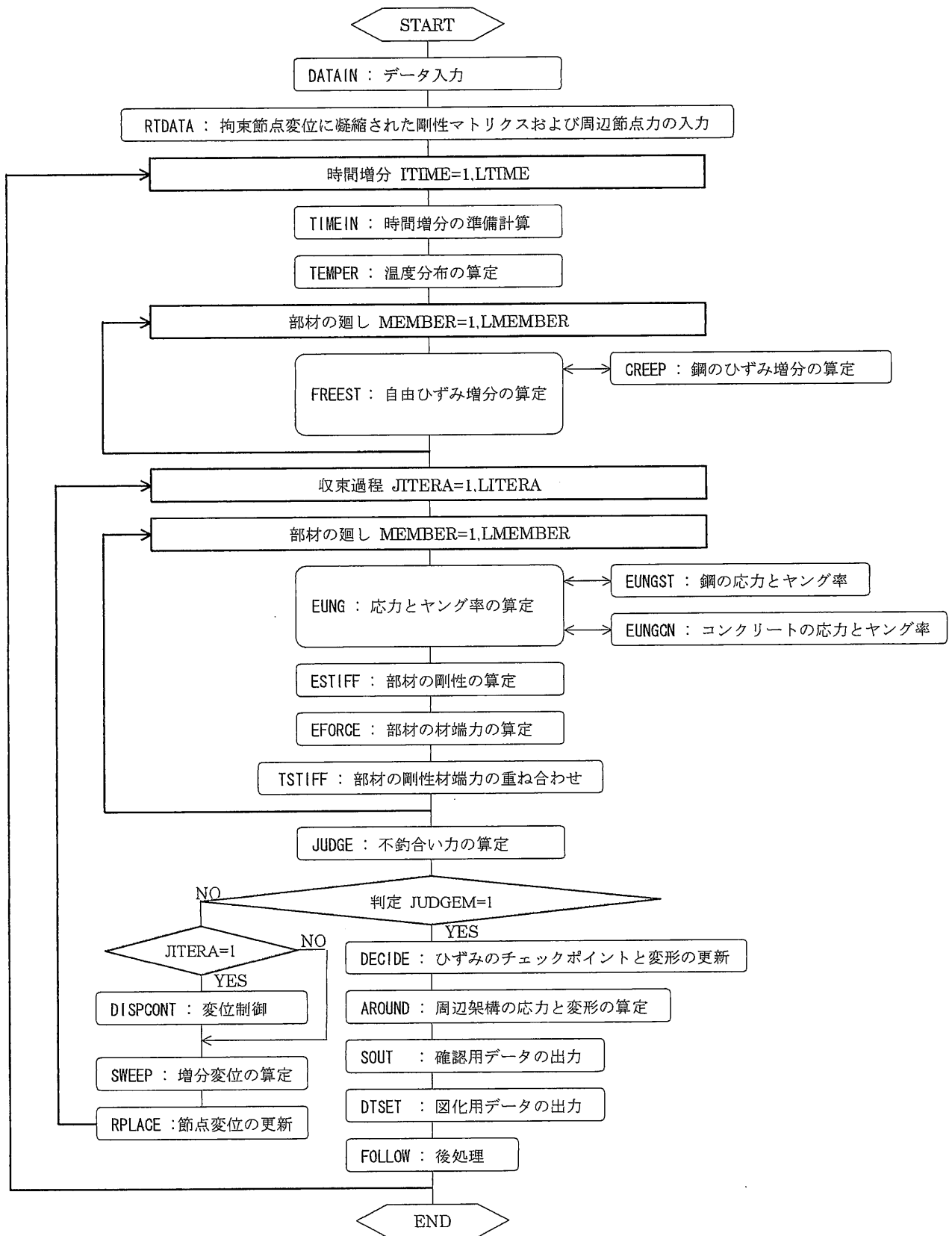
II. その他の論文

- 1) T.HIRASHIMA, Y.WANG, H.UESUGI, T.KITANO, T.AVE : " Large scale fire tests of a 4-story type car park (Part2:Analysis of the thermal stresses and deflections)" , 7th International Symposium on Fire Safety Science, June 2002
- 2) 橋本秀知, 平島岳夫, 上杉英樹 : 「鉄骨ブレース架構の火災時安定性」, 構造工学論文集 Vol.48B, pp.79-86, 2002年3月
- 3) 常世田昌寿, 豊田康二, 織茂俊泰, 菊田繁美, 高橋孝二, 堀昭夫, 松戸正士, 中込昭, 平島岳夫, 上杉英樹 : 「普通コンクリートの過渡ひずみに関する研究」, 構造工学論文集 Vol.48B, pp.149-154, 2002年3月
- 4) 北野貴之, 王雲峰, 平島岳夫, 安部武雄・上杉英樹 : 「3層4段型自走式プレハブ駐車場の実大火災実験 (その2. 1階で実施された車両火災実験に関する架構の熱応力変形解析)」, 構造工学論文集 Vol.48B, pp.87-93, 2002年3月
- 5) Hidetomo HASHIMOTO, Takeo HIRASHIMA and Hideki UESUGI : " The stability of steel braced structure in fire " , Proceedings of the International seminar on steel structures in fire, pp.255-267, November 2001
- 6) 平島岳夫, 織茂俊泰, 菊田繁美, 高橋孝二, 堀昭夫, 中込昭, 松戸正士, 吉田正友, 山内泰之, 中村賢一, 上杉英樹, 齋藤光 : 「高力ボルト摩擦接合継手の高温時におけるせん断耐力に関する実験」, 構造工学論文集 Vol.47B, pp.311-316, 2001年3月
- 7) 上杉英樹, 柯興, 鈴木隆生, 平島岳夫, 齋藤光 : 「高軸力を受ける鉄骨ブレース架構の熱応力解析」, 構造工学論文集 Vol.44B, pp.483-492, 1998年3月
- 8) 上杉英樹, 鈴木隆生, 平島岳夫, 齋藤光 : 「高温時における耐火鋼部材の応力変形性状」, 構造工学論文集 Vol.43B, pp.359-366, 1997年3月
- 9) 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

付録1 熱応力変形解析手法の概要

1. 熱応力変形解析プログラムの流れ図
2. 接線剛性法における収束過程
3. ひずみ
4. 応力度とヤング率
5. 部材の剛性
6. 部材の材端力

1. 熱応力変形解析プログラムの流れ図

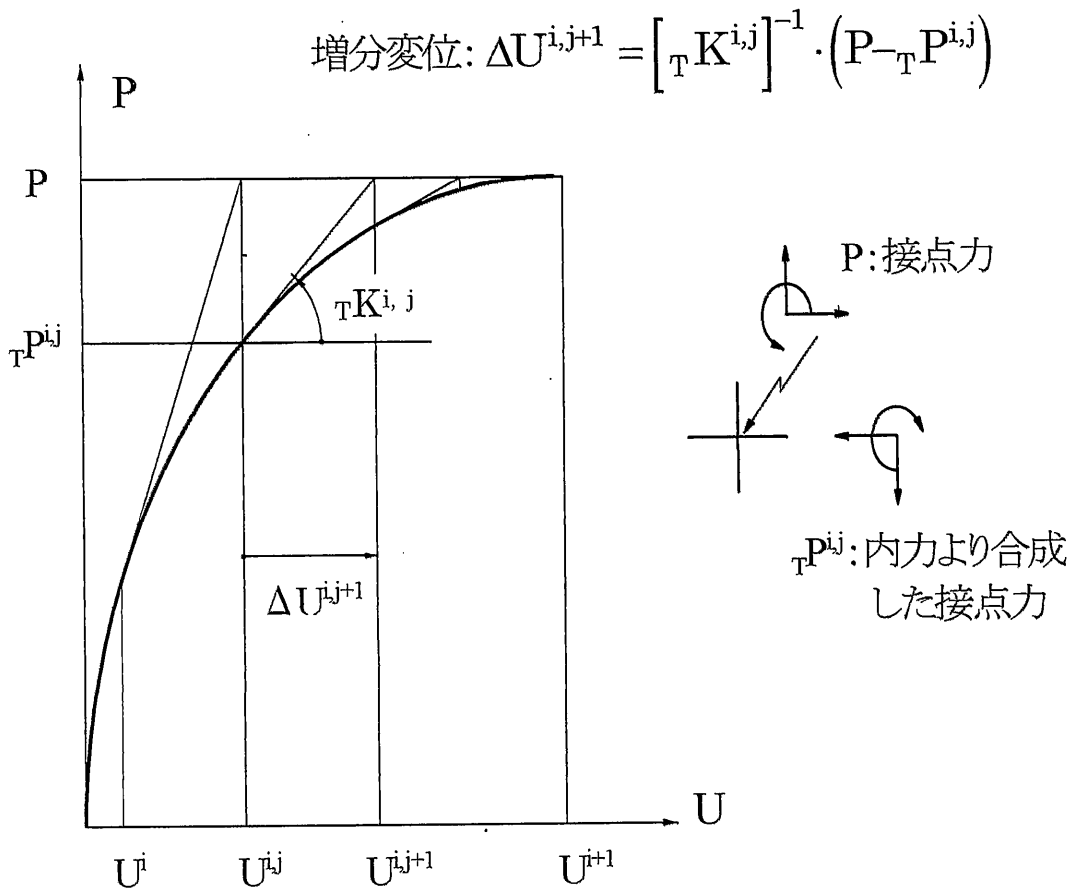


付図 1 熱応力変形解析プログラムの流れ図

2. 接線剛性法における収束過程

付図 2 に示すように接線剛性法に基づく繰り返し計算により、分割された時間内での変位増分を計算する。次に、各収束段階で得られた変位増分からひずみを求め、高温時における応力-ひずみ曲線を用いて応力度とヤング率を算定し、部材の材端力と部材の剛性を求める。各部材の材端力を加算して内力による節点力を求め、内力による節点力と外力の差として不釣合力を求める。この不釣合力が許容誤差以内に収まった時点で収束計算が終了し、その時間段階における変形が確定する。

付図 2 に示す添字において、「i」は時間段階を意味し、「j」は収束段階を意味し、「T」は温度を意味している。



付図 2 接線剛性法における収束過程

3. ひずみ

付図 3 に部材内における節点変位増分を示す。節点変位増分 ΔU より、部材内における切片のひずみ増分 $\Delta \varepsilon$ を次式により求める。ひずみ増分を累積することにより、任意時間における全ひずみが求められる。さらに、全ひずみより熱膨張ひずみとクリープひずみを差し引くことで、応力ひずみが求められる。

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_0 - \Delta \phi \times y$$

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_0 = \frac{\Delta U_R - \Delta U_L}{L_0} \\ \Delta \phi = \frac{\Delta \theta_R - \Delta \theta_L}{L_0} \end{cases}$$

記号の意味を以下に示す。

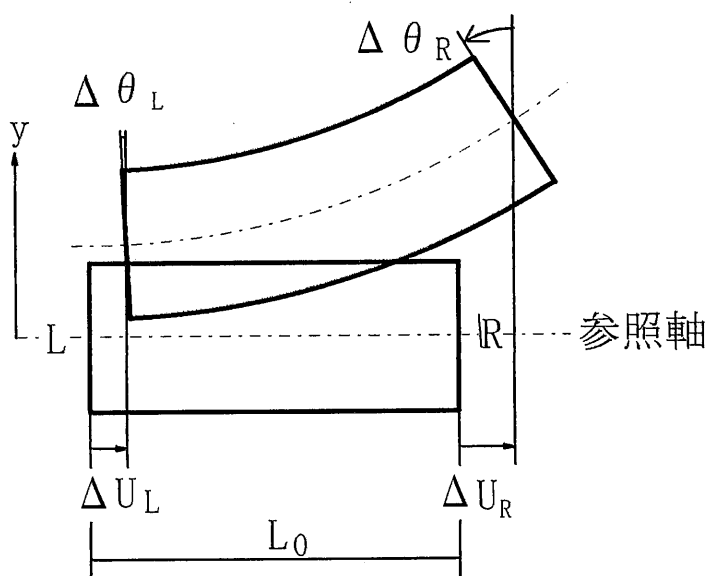
$\Delta \varepsilon_0$: 参照軸上におけるひずみ増分

$\Delta \phi$: 曲率の増分

y : 参照軸からの距離

L_0 : 部材の長さ

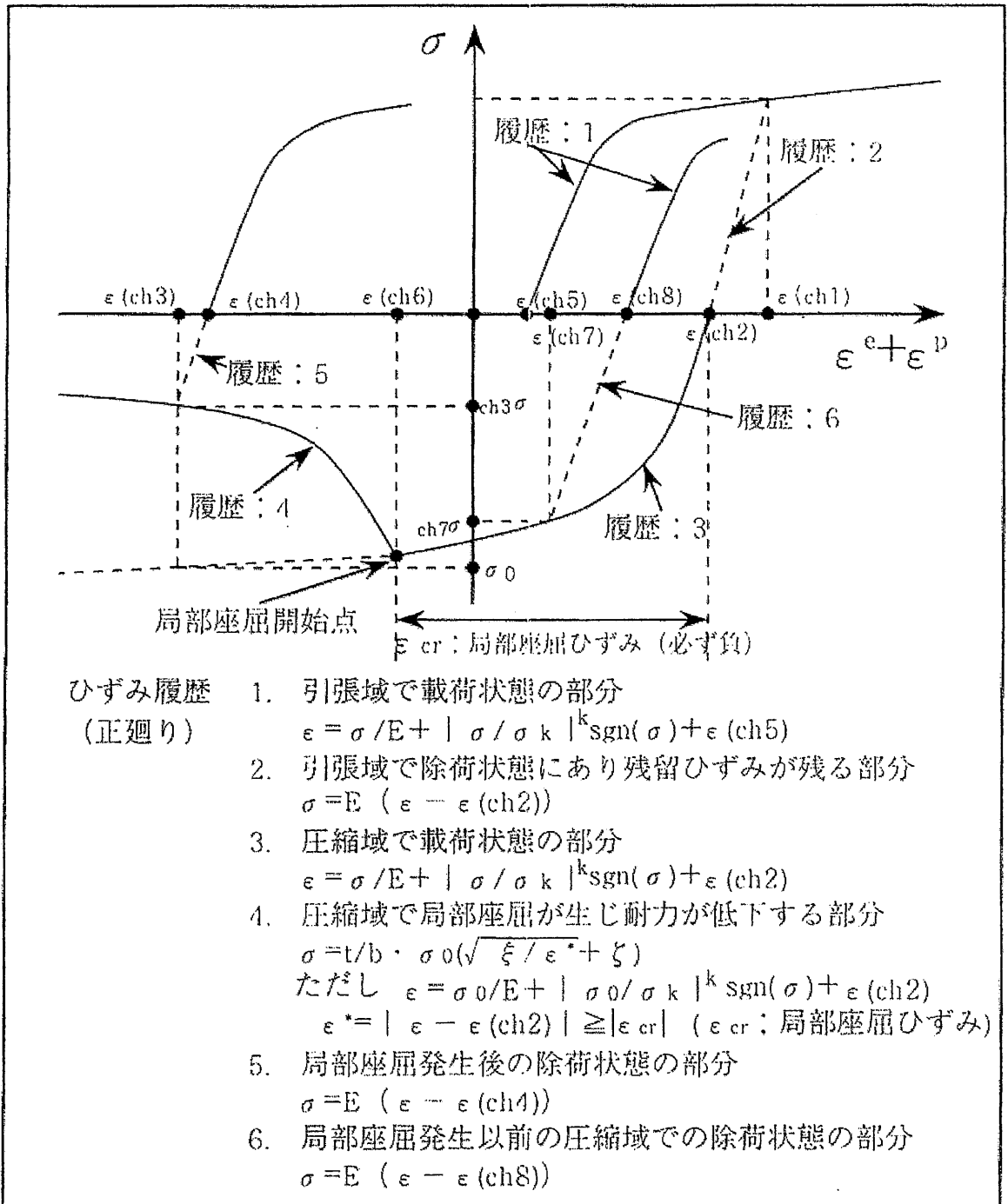
添字 R,L : R は右節点を意味し、L は左節点を意味する



付図 3 部材内における節点変位増分

4. 応力度とヤング率

先に求めた応力ひずみを用いて、付図4に示す応力・ひずみ履歴より、応力度とヤング率を算定する。



付図4 応力・ひずみ履歴 (正廻り)

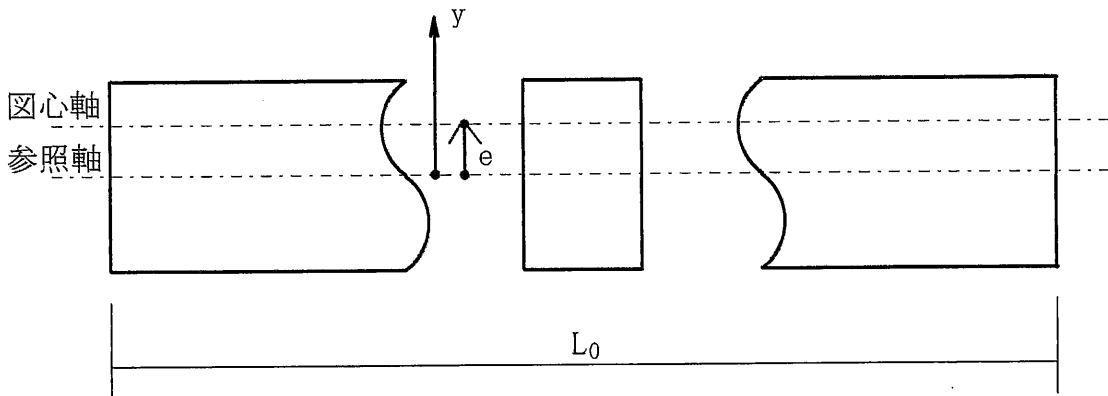
5. 部材の剛性

先に求めた各切片のヤング率を用いて、部材の剛性を算定する。以下に部材剛性マトリクスを示す。

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} \frac{\overline{AE}}{L} & 0 & 0 & -\frac{\overline{AE}}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12\overline{EI}}{L^3} & \frac{6\overline{EI}}{L^2} & 0 & -\frac{12\overline{EI}}{L^3} & \frac{6\overline{EI}}{L^2} \\ 0 & \frac{6\overline{EI}}{L^2} & \frac{4\overline{EI}}{L} & 0 & -\frac{6\overline{EI}}{L^2} & \frac{2\overline{EI}}{L} \\ -\frac{\overline{AE}}{L} & 0 & 0 & \frac{\overline{AE}}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12\overline{EI}}{L^3} & -\frac{6\overline{EI}}{L^2} & 0 & \frac{12\overline{EI}}{L^3} & -\frac{6\overline{EI}}{L^2} \\ 0 & \frac{6\overline{EI}}{L^2} & \frac{2\overline{EI}}{L} & 0 & -\frac{6\overline{EI}}{L^2} & \frac{4\overline{EI}}{L} \end{bmatrix} \quad : \text{図心軸に関する剛性}$$

$$e = \frac{\int E \cdot y \cdot dA}{\int E \cdot dA}, \quad e_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} e_{11} & 0 \\ 0 & e_{11} \end{bmatrix}$$

$$K = e^T \cdot \bar{K} \cdot e \quad : \text{参照軸に関する剛性}$$



付図 5 部材の剛性

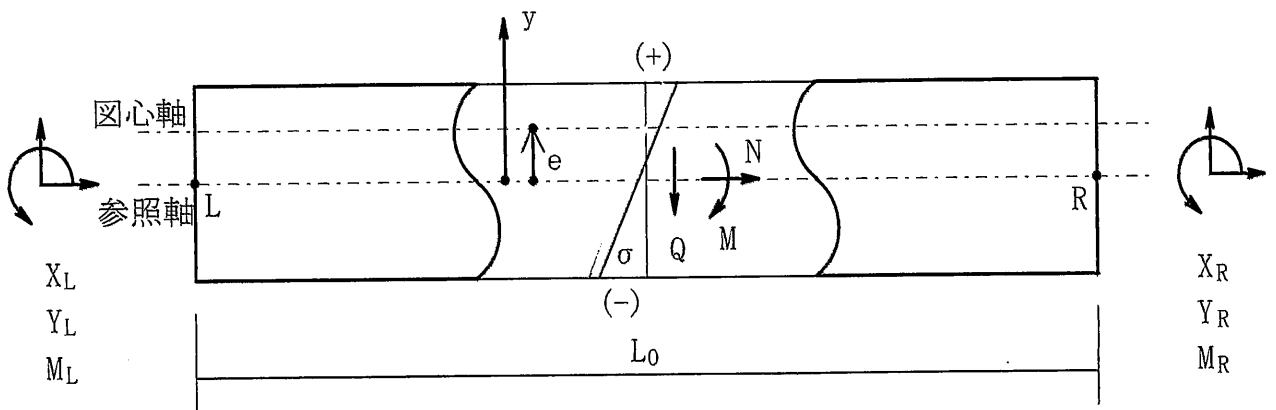
6. 部材の材端力

付図 6 に示すように、部材中央断面の応力分布を断面内で積分することにより、部材の材端力を算定する。ただし、せん断力については、収束段階のせん断剛性($K_{2,j}$)よりせん断力増分を求め、せん断力増分を前時間段階のせん断力に加えて算定する。

$$\begin{cases} N = \int \sigma \cdot dA \\ M = \int \sigma \cdot y \cdot dA \\ Q = Q_i + \Delta Q \end{cases}$$

$$\Delta Q = \sum_{j=1}^6 K_{2,j} \cdot \Delta U_j$$

$$\begin{Bmatrix} X_L \\ Y_L \\ M_L \\ X_R \\ Y_R \\ M_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -N \\ +Q \\ +M + Q \cdot L/2 \\ +N \\ -Q \\ -M + Q \cdot L/2 \end{Bmatrix}$$



付図 6 部材の材端力

付録2 論文内容の要旨

題目：火災加熱を受ける鋼構造部材の変形性状に関する実験的研究

著者：平島岳夫

1. 研究の背景

2. 研究の目的

3. 研究の成果

3.1 溶接構造用圧延鋼材の高温引張試験

3.2 高温時におけるH形断面・箱形断面部材の短柱圧縮実験

3.3 高温時におけるH形断面部材の純曲げ実験

3.4 高温時におけるH形断面・箱形断面部材の曲げ圧縮実験

4. 耐火設計への適用

5. 結論

論文内容の要旨

火災加熱を受ける鋼構造部材の変形性状に関する実験的研究

平島 岳夫

1. 研究の背景

建物に耐火性を持たせる基本方策は、防火区画により火を封じ込めて、火災の延焼拡大を防止することである。防火区画により火災の延焼拡大を防止できれば、避難と消防活動が安全に行われ、人命と財産が守られる。耐火設計の出発点は、防火区画による火災の延焼拡大防止にあると考える。本研究は、防火区画内に火災が封じ込まれることを前提とする区画火災を対象とした、区画部材を支える構造部材の耐火性に関する研究である。

一般的に採用されている耐火設計方法においては、標準耐火試験により得られた構造部材の耐火時間が建築法規で定められた要求耐火時間を上回ることを確認することにより、建物の耐火性を確保している。一方で、実際の建物条件に応じた火災挙動を予測して構造部材の耐火性を確認する、数値解析に基づく耐火設計方法が 1989 年に提案されている。数値解析に基づく耐火設計方法の手順は、まず安全係数を設定し、数値解析により火災性状・部材温度・力学性状の予測を行い、最後に、耐火性能評価基準に基づいて耐火性を決定する方法である。本研究は、数値解析に基づく耐火設計方法に適用することを前提とした、力学性状予測と耐火性能評価基準に関する実験的研究である。

鋼構造部材の耐火性を確保するために、一般には、鋼構造部材に耐火被覆を施して、鋼材温度を抑制する方法が採用されている。従来の標準耐火試験においては、耐火被覆が施された鋼構造部材の鋼材温度が平均 350°C 以下かつ最高 450°C 以下に収まるか否かによって、鋼構造部材の耐火時間を決定していた。一方、数値解析に基づく耐火設計方法は、1990 年頃より活用され始めた。その多くは、鋼材温度 600°C において長期許容応力度以上の降伏強度を保証する、耐火鋼に適用したものであった。このような状況下において、鋼構造部材が負担している設計荷重が小さければ、一般鋼においても鋼材温度 600°C 位までの耐火設計が可能ではないかという思いが本研究の発端であった。1992 年には、高層鉄骨架構 48 棟における熱応力変形解析の結果に基づいて、耐震設計された鋼構造骨組は 600°C 位までの耐火性を有する可能性が示された。しかし、同じ報

告において、火災加熱を受ける鋼柱の柱頭と柱脚および鋼梁の端部と中央部に大きな曲率が生じて局部座屈が発生することが指摘され、高温時における鋼柱と鋼梁の荷重支持能力を実験で確認する必要があるとの課題が挙げられた。

本研究における実験は、この課題に基づいて計画され、1997年に実施された。鋼材温度 $400^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ における一般鋼の実験資料を蓄積したものである。

2. 研究の目的

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、極めて大きな熱変形が生じる。火災加熱を受ける鋼構造骨組の一般的な挙動を図 1 に示す。外柱を含む区画に火災が生じると、加熱梁が伸びだすことにより、外柱は外側へと押し出される。これより、曲げ変形の集中する外柱の柱頭・柱脚には、局部座屈が生じる可能性がある。加熱梁が外側へと伸びだすことができない場合は、梁自身がたわみ込みんで、梁の両端部と中央部に曲げ変形が集中して局部座屈が生じる可能性がある。高層鉄骨架構 48 棟における 600°C までの熱応力変形解析を行

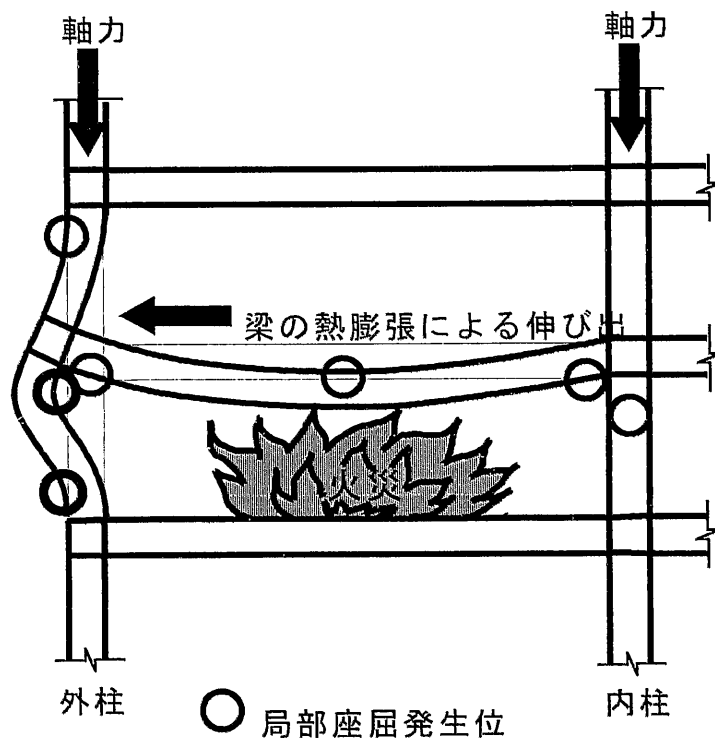


図 1 火災加熱を受ける鋼構造骨組の挙動

なった報告によると、外柱柱頭における水平変形量は、15棟の例において階高の1/50位にまで達しており、半数以上の例において階高の1/120を大きく上回っていた。また同じ報告において、梁中央部におけるたわみ量は、5棟の例において梁スパンの1/30位にまで達しており、ほとんどの例において梁スパンの1/300を大きく上回っていた。このように火災加熱を受ける鋼構造骨組には、地震時をはるかに上回る変形が生じる。よって、鋼構造部材に発生する局部座屈を避けがたい。これより鋼構造の耐火設計においては、板要素の幅厚比を制限して局部座屈を防止する設計とは異なり、局部座屈後における鋼構造部材の変形性状を考慮した設計を行なうこととなる。

本研究の目的は、従来不足していた一般鋼部材の変形性状を600℃までの部材実験により蓄積し、局部座屈後における鋼構造部材の残存耐力と荷重支持能力を明らかにすることである。この目的を達成するために、以下に示す4種類の実験を行なった。

①溶接構造用圧延鋼材 (SM490A) の高温引張試験

火災加熱を受ける鋼構造部材の変形性状を把握する上で、鋼材の高温時引張特性は最も基本的な資料である。高温部材実験に用いた溶接構造用圧延鋼材について、常温～800℃までの高温引張試験を行なった。

②高温時におけるH形断面・箱形断面部材の短柱圧縮実験

常温・400℃・500℃・600℃と鋼材温度を一定に保った状態において、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た短柱圧縮実験を行った。短柱圧縮実験の目的は、鋼構造部材の局部座屈後における残存圧縮耐力を定量的に把握し、局部座屈を考慮した圧縮域における応力・ひずみ曲線を得ることである。

③高温時におけるH形断面部材の純曲げ実験

常温・400℃・500℃・600℃と鋼材温度を一定に保った状態において、幅厚比 $b/t=7.5$ と幅厚比 $b/t=10$ のH形断面部材を用いた純曲げ実験を行った。図1に示す鋼構造骨組の火災時挙動において、加熱梁が外側へと伸びだすことができない場合は、梁自身が大きくたわみ込む。このとき、梁の両端部と中央部に曲げ変形が集中するので、局部座屈が生じる可能性がある。よって、火災加熱を受ける鋼梁の曲げ耐力を決める際には、局部座屈を考慮する必要がある。純曲げ実験の目的は、鋼構造部材の局部座屈に伴う曲げ耐力の低下を定量的に把握することである。

④高温時におけるH形断面・箱形断面部材の曲げ圧縮実験

常温・400℃・500℃・550℃・600℃と鋼材温度を一定に保った状態において、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た曲げ圧縮実験を行った。図1に示したように、外柱を含む区画に火災が生じると、加熱梁が伸びだすことにより、外柱は外側へと押し出される。このとき、曲げ変形の集中する外柱の柱頭・柱脚には、局部座屈が生じる可能性がある。このような状況下においては、局部座屈の発生により、外柱の軸方向耐力が急激に低下し、外柱が存在軸力を支えられなくなることが最も懸念される。曲げ圧縮実験の目的は、鋼構造部材の局部座屈後における曲げ圧縮変形性状を明らかにするとともに、加熱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である。

3. 研究の成果

3.1 溶接構造用圧延鋼材の高温引張試験

溶接構造用圧延鋼材(SM490A)について5種類、裏当て金について1種類における高温引張試験結果より、高温時の応力・ひずみ曲線をはじめ、弾性係数・0.2%オフセット強度・引張強度・伸びなどの高温時引張特性に関する資料が蓄積された。

3.2 高温時におけるH形断面・箱形断面部材の短柱圧縮実験

一般鋼を用いたH形断面・箱形断面部材の短柱圧縮実験により、局部座屈後の残存圧縮耐力を得た。圧縮ひずみ15%位における残存圧縮耐力は、H形断面部材と箱形断面部材ともに、500℃においては基準強度の0.4倍程度であり、600℃においては基準強度の0.2倍程度であった。

箱形断面・円形断面部材（閉鎖断面部材）については、鈴木らの研究によって、局部座屈を考慮した圧縮域における応力・ひずみ曲線式が提案されていた。本研究では、鈴木らの提案式における考え方を踏襲して、H形断面部材の局部座屈後における応力・ひずみ曲線式を実験的に導いた。下式に示すH形断面部材の局部座屈後における応力・ひずみ曲線式において、1.2と1.0の定数が本実験により導かれた値である。

$$\sigma(\varepsilon_0) = \frac{\sigma_0(\varepsilon_0)}{b/t} \left(\sqrt{\frac{1.2}{\varepsilon_0}} + 1.0 \right)$$

短柱圧縮実験の結果を用いることにより、数値解析に基づく耐火設計の力学性状予測において、一般鋼における局部座屈後の耐力低下を考慮することが可能となった。

3.3 高温時におけるH形断面部材の純曲げ実験

火災加熱を受ける鋼梁には大きなたわみが生じるが、鋼梁が支える区画部材に隙間が生じて火災が延焼拡大することは許されないので、鋼梁のたわみ量を制限する必要がある。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が、我が国においては規定がない。よって、本研究においては、ヨーロッパ鋼構造協会の耐火設計において推奨されている梁のたわみ許容値を目安とした。純曲げ実験では、梁のたわみ許容値を超える変形をH形断面部材に与えて、大変形時における一般鋼の曲げ耐力を得た。その結果、幅厚比 $b/t=10$ 以下のH形断面部材においては、梁のたわみ許容値に相当する大変形が生じてても、局部座屈に伴う曲げ耐力の低下が見られなかった。これより、数値解析に基づく耐火設計の力学性状予測において、鋼梁に生じるたわみが梁のたわみ許容値を超えないことを確認すれば、局部座屈の影響を考慮しなくてもよいことが示された。また、塑性ヒンジ部分における曲げ耐力が曲率の増大にかかわらず全塑性モーメントを維持すると仮定した、塑性設計を適用できることが示された。

3.4 高温時におけるH形断面・箱形断面部材の曲げ圧縮実験

火災加熱を受ける鋼構造骨組において、外柱は加熱梁の伸びだしを受ける。しかし、部材単体を対象とした柱の標準耐火試験は中心圧縮载荷であり、加熱梁の伸びだしは考慮されない。耐火鋼については加熱梁の伸びだしを考慮した柱の荷重支持能力に関する実験的研究が報告されているが、一般鋼については皆無である。曲げ圧縮実験では、加熱梁の伸びだしを受ける一般鋼柱における荷重支持能力を確認した。

ヨーロッパ鋼構造協会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。純曲げ実験の項で述べたが、構造部材における変形量の許容値は、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°C 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°C 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°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°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°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。

4. 耐火設計への適用

本論では、研究の成果を数値解析に基づく耐火設計に適用した一例を示した。設計例には、既往の研究において数値解析が行なわれた高層鉄骨架構 48 棟の中で、外柱における軸力比が最も大きく、また 600°C までの熱応力変形解析において鋼梁のたわみが最も大きかった例を用いた。

冒頭に述べたが、耐火設計の出発点は、防火区画による火災の延焼拡大防止にある。構造部材には区画部材に隙間を生じさせない構造安定性が求められるので、構造部材に生じる変形を制限する必要がある。本研究では、ヨーロッパ鋼構造協会の耐火設計で推奨されている変形量の許容値を採用した。鋼柱と鋼梁に生じる変形は、鋼構造骨組の熱応力変形解析によって求められる。鋼柱または鋼梁に生じる変形が許容値に達する時の鋼材温度が、構造部材の耐火性を

確保するために必要となる鋼材温度の許容値となる。本設計例では、局部座屈を考慮しない熱応力変形解析においては、鋼材温度 590℃で梁のたわみが許容値に達した。局部座屈を考慮した熱応力変形解析においては、鋼材温度 575℃で外柱側梁端部に局部座屈が発生して、鋼材温度 580℃で収束不可能となった。鋼構造骨組の熱応力変形解析によって求められた鋼材温度の許容値は 575℃であった。

純曲げ実験の結果より、H形断面部材で幅厚比 $b/t=10$ 以下の鋼梁については、鋼材温度 600℃まで鋼梁に生じるたわみが許容値を超えないことを確認すれば、局部座屈の影響を考慮しなくてもよいことが示された。よって、梁については、鋼構造骨組の熱応力変形解析によって求められる鋼材温度の許容値が採用される。短柱圧縮実験の結果より、H形断面部材および箱形断面部材を用いた鋼柱の荷重支持能力が確認された。この結果を本設計例に適用すると、H形断面部材を用いた軸力比 0.32 の外柱における鋼材温度の許容値は 550℃であり、箱形断面部材を用いた軸力比 0.47 の内柱における鋼材温度の許容値は 500℃である。本実験結果を適用して求められた鋼材温度の許容値は 500℃となった。

本設計例における鋼構造骨組では、従来の数値解析のみで求められた鋼材温度の許容値は 575℃であり、本実験結果を適用して求められた鋼材温度の許容値は 500℃であり、鋼材温度 500℃までの耐火性を有することが決定された。

5. 結論

本研究では、従来不足していた一般鋼部材の変形性状を 600℃までの部材実験により蓄積し、鋼構造部材の局部座屈後における残存耐力と荷重支持能力を明らかにした。本研究の成果を活用することにより、数値解析と実験の両面から、鋼構造骨組の耐火性を検討できるようになった。

付録3 SYNOPSIS

**TITLE: Experimental Study on Load Bearing and Deformation Capacity
of Steel Structural Members exposed to Fire**

AUTHOR: Takeo HIRASHIMA

1. INTRODUCTION

2. PURPOSE OF THIS EXPERIMENTAL STUDY

3. RESULTS

3.1 Tensile tests of rolled steels for welding structure at elevated temperature

3.2 Stub column tests of steel structural members with H-shaped and square tubular sections at elevated temperature

3.3 Bending tests of steel structural members with H-shaped sections at elevated temperature

3.4 Beam column tests of steel structural members with H-shaped and square tubular sections at elevated temperature

4. APPLICATION TO FIRE ENGINEERING DESIGN

5. CONCLUSION

**TITLE: Experimental Study on Load Bearing and Deformation Capacity
of Steel Structural Members exposed to Fire**

AUTHOR: Takeo HIRASHIMA

SYNOPSIS

1. INTRODUCTION

The basic principle in fire engineering design of a building is to enclose any fire that occurs by dividing the interior of the building into compartments. If dividing elements are able to prevent the spread of fire, building occupants will escape safely, fire fighters will remain safe, and much property will be protected from fire. The subject of this study is the stability of structural members that support dividing elements exposed to fire contained in a compartment.

In conventional fire engineering design of buildings, building elements are selected by comparison between the required fire endurance time and the time to failure as determined by standard fire-resistance tests. Meanwhile, fire engineering design based on numerical analysis of actual fire behavior of building structures was proposed in Japan as early as 1989. In fire engineering design based on numerical analysis, building elements are selected by numerical analysis of room temperature, fire duration time, temperatures of building elements, and thermal deformation of structural members. The subject of this study is the thermal deformation of structural members and its application to fire engineering design based on numerical analysis.

In order to impart fire resistance to steel structural members, we generally lower the temperature of steel structural members by means of fire protection. The fire resistance of steel structural members is usually determined on the basis of standard fire-resistance tests, and under Japanese criteria, the allowable temperatures for steel structural members are limited below av. 350°C and max. 450°C. Meanwhile, since 1990 fire engineering design based on numerical analysis has been used to obtain the fire resistance of steel structural members. Many buildings have been designed on the basis of numerical analysis, using fire resistant steel which ensures a yield strength at 600°C that is higher than allowable stress for long-time loading.

Under the above background, we believe that the fire resistance of conventional steel members near 600°C can be determined by fire engineering design based on

numerical analysis, if the building is designed against seismic load. Uesugi's et al report on numerical study of fire resistance of steel structures of 48 high-rise buildings exposed to compartment fire in 1992 indicates that steel structures which are designed against seismic load exhibit fire resistance up to nearly 600°C. However, this report also indicates that large curvatures are produced at the tops of outer columns and at both ends and in the middle of beams when temperature approaches 600°C, and this phenomenon induces local buckling at these points. Therefore, Uesugi et al suggest that load bearing and deformation capacities of columns and beams should be verified by experiments at elevated temperatures. Experiments in the present study are designed on the basis of this suggestion. Experiments are conducted in order to accumulate and clarify fundamental data on the load bearing and deformation capacities of conventional steel members from room temperature to 600°C that were compiled in 1997.

2. PURPOSE OF THIS EXPERIMENTAL STUDY

When a fire occurs in a building of steel structure, large deformations are produced at the ends of steel structural members, in response to thermal elongation of steel members exposed to fire, and, as shown in figure 1, these members are severely restrained by adjacent structural members.

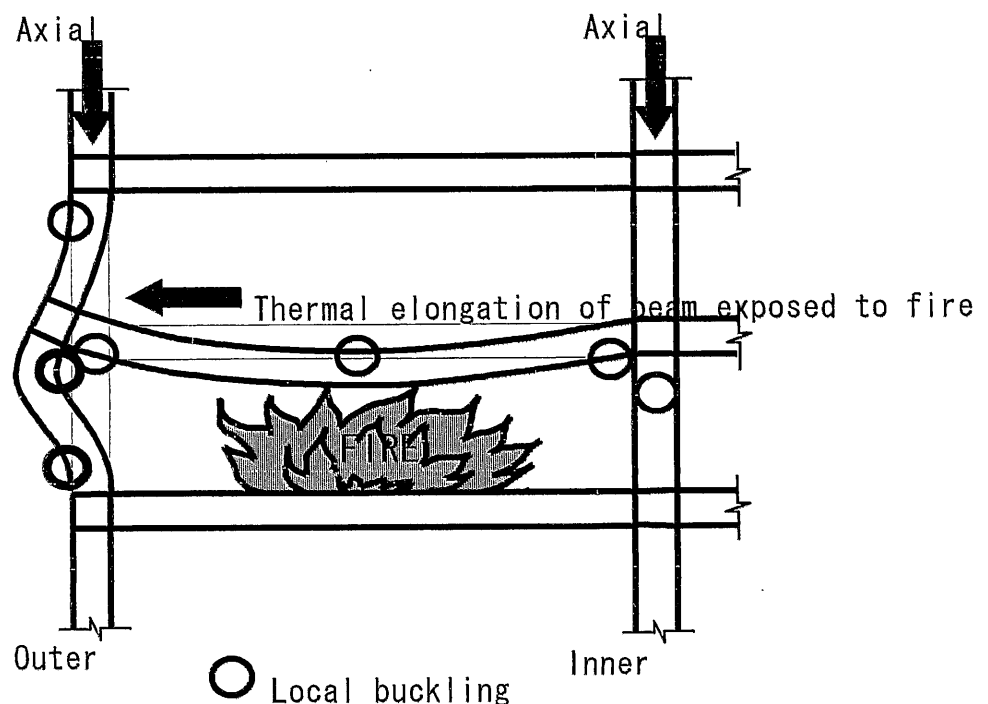


Fig. 1 Thermal elongation and bending deformation of steel structure exposed to fire.

In the case of a fire occurring in a compartment including outer columns, the outer columns suffer large deformations and local buckling at their tops and bottoms, due to thermal elongation of beams exposed to fire. In the case of a fire occurring in a compartment including beams restrained by adjacent structural members, the beams exposed to fire suffer large deformations and local buckling at both ends and in the middle. Therefore, fire engineering design for steel structures must be carried out in consideration of load bearing and deformation capacity of steel structural members after local buckling.

In this study, load bearing and deformation capacity of steel structural members after local buckling are clarified from 4 kinds of experiments performed on conventional steel members at elevated temperature.

- 1) Tensile tests of rolled steels for welding structure at elevated temperature
- 2) Stub column tests of steel structural members with H-shaped and square tubular sections at elevated temperature
- 3) Bending tests of steel structural members with H-shaped sections at elevated temperature
- 4) Beam column tests of steel structural members with H-shaped and square tubular sections at elevated temperature

3. RESULTS

3.1 Tensile tests of rolled steels for welding structure at elevated temperature

The mechanical properties of rolled steels for welding structure (SM490A); specifically, stress-strain curve, Young's modulus, yield point, and tensile strength, were determined under constant temperatures ranging from room temperature to 800°C.

3.2 Stub column tests of steel structural members with H-shaped and square tubular sections at elevated temperature

The residual compressive strengths of H-shaped steel members with width-thickness ratios $b/t=7.5$, $b/t=10$ and square tubular steel members with width-thickness ratios $d/t=25$, $d/t=30$ after local buckling were determined under constant temperatures ranging from room temperature to 600°C.

For both H-shaped steel members and square tubular steel members, residual compressive strength at 15% strain at 500°C is about 0.4 times reference strength, and that at 600°C is about 0.2 times reference strength.

Suzuki proposes a formulation for stress-strain curves for square and circular tubular steel members in consideration of local buckling. In this study, we propose a formulation for stress-strain curves for H shaped steel members in consideration of local buckling, on the basis of Suzuki's formulation:

$$\sigma(\varepsilon_0) = \frac{\sigma_0(\varepsilon_0)}{b/t} \left(\sqrt{\frac{1.2}{\varepsilon_0}} + 1.0 \right)$$

ε_0 : compressive strain

$\sigma(\varepsilon_0)$: compressive stress after local buckling

$\sigma_0(\varepsilon_0)$: tensile stress corresponding to compressive strain ε

In fire engineering design, the decrease in strength of steel structural members after local buckling can be considered by way of numerical analysis.

3.3 Bending tests of steel structural members with H-shaped sections at elevated temperature

The bending strength of H-shaped steel members with width-thickness ratios $b/t=7.5$, $b/t=10$ after local buckling were determined under constant temperatures ranging from room temperature to 600°C. Large deformations are produced at both ends and in the middle of a beam exposed to fire. However, large deformations of beams should be restricted in order to arrest growth of clearances in dividing elements exposed to fire, thereby preventing the spread of fire. The deformation criterion of beams exposed to fire should be determined, so that the efficiency of dividing elements in preventing the spread of fire can be maintained. However the deformation criterion of structural members exposed to fire is not specified in Japan. Therefore, this study uses the deformation criteria recommended by European Convention for Constructional Steelwork (ECCS).

In bending tests, even when H-shaped conventional steel members with width-thickness ratios less than $b/t=10$ are given deformations exceeding the deformation criterion of a beam in ECCS recommendation, residual bending strength at elevated temperature does not decrease. These results indicate that the effect of local

buckling in H-shaped steel beams with width-thickness ratios less than $b/t=10$ does not have to be taken into consideration, if numerical analysis of thermal stress deformation confirms that deformation of a steel beam exposed to fire is less than the deformation criterion of a beam in ECCS recommendation. Moreover, the results indicate that plastic design is applicable, in which maintenance of full plastic moment in plastic hinge portions under large deformations is assumed.

3.4 Beam column tests of steel structural members with H-shaped and square tubular sections at elevated temperature

When a fire occurs in a building of steel structure, large deformations are produced at the tops and bottoms of outer columns in response to thermal elongation of beams exposed to fire. However, the standard fire-resistance test for a column is a pure compression test, and does not take into consideration thermal elongation of beams exposed to fire. Under ECCS recommendations, horizontal deformation criterion for the top of a column is $1/30$ column height. In beam column tests, steel structural members are given constant axial load and horizontal deformation exceeding $1/30$ column height. Additionally, load bearing capacities of steel columns after local buckling caused by thermal elongation of beams exposed to fire are determined for constant temperatures ranging from room temperature to 600°C . If we define steel structural members that have load bearing and deformation capacities as those members that maintain constant axial load while receiving horizontal deformation exceeding $1/30$ column height, the following results are obtained regarding the relation between allowable steel temperature and constant axial load ratio, which is constant axial load divided by reference axial strength.

[H-shaped steel members with width-thickness ratios less than $b/t=10$]

When constant axial load ratio is less than 0.3, allowable steel temperature is 600°C .

When constant axial load ratio is 0.3 to 0.4, allowable steel temperature is 550°C .

When constant axial load ratio is 0.4 to 0.5, allowable steel temperature is 500°C .

[Square tube steel members with width-thickness ratios less than $d/t=30$]

When constant axial load ratio is less than 0.3, allowable steel temperature is 600°C .

When constant axial load ratio is 0.3 to 0.5, allowable steel temperature is 500°C .

These results provide the criterion for conventional steel columns in fire

engineering design based on numerical analysis. Steel columns maintain fire resistance if we restrict steel temperature to that corresponding to constant axial load ratio, and numerical analysis of thermal stress deformation confirms that deformation of steel column due to thermal elongation of beams exposed to fire is less than 1/30 column height.

Using the stress-strain curves obtained from stub column tests, computational analysis is carried out for beam column tests. The calculated values in the case where local buckling is considered approximately agree with the experimental values rather than the calculated values obtained in the case where local buckling is not considered.

4. APPLICATION TO FIRE ENGINEERING DESIGN

This paper presents an example in which experimental results are applied to fire engineering design based on numerical analysis. Among the 48 high-rise buildings of steel structure cited in the 1992 report, we select the building whose columns received the most severe axial load.

In this study, we determine the fire resistance of structural members to support dividing elements in order to prevent the spread of fire according to the deformation criteria recommended by ECCS. Deformation of steel structural members is calculated on the basis of numerical analysis of thermal stress deformation. The fire resistance of a structural member is determined as the steel temperature at which deformation of steel structural members reaches the deformation criteria. In this example, numerical analysis of thermal stress deformation yields the following results. Local buckling at the top of outer column occurs at 575°C, and calculation is not converged at 580°C under numerical analysis based on stress-strain curves in consideration of local buckling. Beam deformation reaches the deformation criteria at 590°C under numerical analysis based on stress-strain curves in which local buckling is not considered. Numerical analysis indicates that the allowable steel temperature is 575°C.

Results of beam tests indicate that considering the effect of local buckling in H-shaped steel beams with width-thickness ratios less than $b/t=10$ may not be necessary, if deformation of steel beam exposed to fire is less than the deformation criterion recommended by ECCS. Results of beam column tests indicate the relation between allowable steel temperature and constant axial load ratio. According to this

relation, allowable steel temperature of an outer column is 550°C, because constant axial load ratio of an outer column of H-shaped section is 0.32. Further, allowable steel temperature of an inner column is 500°C, because constant axial load ratio of an inner column of square tubular section is 0.47. The experimental results indicate that the allowable steel temperature is 500°C.

In the case of this example, the allowable temperature of structural members is determined to be 500°C, from both numerical analysis and experimental results.

5. CONCLUSION

In this study, residual strength and load bearing capacity of steel structural members after local buckling were determined by experiments conducted on conventional steel members at constant temperatures ranging from room temperature to 600°C. With the results of this study, we can determine the fire resistance of conventional steel members near to 600°C by not only numerical analysis but also experimental results.