

4章 鋼梁の崩壊温度に関する実験

前章では、火災時における梁内の温度分布が一様であるとして数値解析を行い、精算結果から、提案した梁の崩壊温度評価式の妥当性を検証した。しかし、実際の火災により熱せられる鋼梁の温度分布は一様ではないことが考えられる。火災時における梁内の温度分布が一様ではない理由として、以下の2つが挙げられる。

1. 梁への熱入力方向が下フランジ・ウエブ両面からの3方向であるため、下フランジやウエブの温度が上フランジや床スラブの温度より高い。
2. 温度上昇に伴い梁の変形が増大することで、耐火被覆が鋼梁の変形に追従できず、耐火被覆が剥離し、剥離した部分の温度が急上昇する。

以上のような理由により、火災時の梁内の温度分布は、梁丈方向、梁軸方向で、不均一になると考えられる。

鋼梁内の温度分布が不均一である場合、鋼の線膨張の差により、高温部分では低温部分より大きな線膨張が発生し、荷重による変形以外に温度分布の差による変形が発生する。つまり、荷重による応力以外に、温度差による応力が断面内に発生し、横座屈等の崩壊温度を低下させる要因が発生することも考えられる。しかし、火災時における梁内の温度勾配は、建築物の使用用途による火災性状や、耐火被覆材料により異なる変形追従性に大きく依存する。よって温度勾配の発生する鋼梁の高温時挙動や崩壊温度を数値解析結果だけで、推論することは非常に困難である。よって温度勾配が生じる鋼梁の高温時挙動や崩壊温度を検証する方法として実験による方法が適切である。

本章では、単純支持で、等曲げ荷重を受ける、耐火被覆を施したH形鋼梁、及びその上フランジ上に鉄筋コンクリートスラブを緊結した、梁に対する実大規模の荷重加熱試験の試験結果を詳述する。実験結果より、梁内に温度勾配が生じる場合の鋼梁の高温時挙動や崩壊温度について検証する。

試験体の置かれる加熱炉内は炉蓋で密閉され、梁は一定荷重を受けた状態で加熱される。炉内温度は標準加熱曲線に準じて上昇させる。しかし、本実験では炉内温度上昇の時刻歴には着目しない。加熱開始後の経過時間は実験上の単なる補助変数である。部材の構造的崩壊は、クリープの影響が無視できる状況下では、部材の温度に依存する強度と作用荷重との相対的關係のみに規定されるはずであるから、実験では部材温度そのものが計測されるべき基本変数である。一方、ある部材温度に達するまでの所要時間は加熱源の発熱速度や熱伝達など熱学的条件に支配されるから、本来、部材の高温耐力を支配する直接的要因ではあり得ない。従って、本実験では実験変数として経過時間ではなく部材温度に着目する。

4.1 実験概要

図 4.1.1 に実験装置概要を示す。試験体を単純支持し、荷重梁を用いた 2 点荷重により純曲げ区間を有する正曲げ荷重を与えた。一様曲げ区間は 4500mm である。高温時にせん断区間が一様曲げ区間より先に崩壊しないように試験体のせん断区間のウェブ板を補強した。また荷重梁の横倒れを防止するため荷重梁にリーハイメカを取付けた。加熱方法は標準加熱曲線に準じ、梁中央部のたわみ速度が大きくなった時点が崩壊温度到達時とみなした。

図 4.1.1 下段の図に示すように試験体への熱入力は 3 方向であって、試験体上方からの熱入力はない。炉蓋や断熱材を用いて炉内温度を円滑に上昇させた。試験体は 5 体で、表 4.1.1 にその内訳を示す。S-1、S-2 は純鉄骨梁で断面は H400×200×8×13 (ロール H)、材質は SN400B である。C-1、C-2 は試験体 S-1、S-2 に使用したのと同じ純鉄骨梁に床スラブをスタッドボルト結合した完全合成梁である。SC は同様の純鉄骨梁と床スラブを焼き抜きせん溶接したもので、不完全合成梁である。床スラブの中、デッキプレートは板厚 1.2mm、山高 50mm であり、コンクリートには圧縮強度 $F_c=210\text{kgf/cm}^2$ の普通コンクリートを用い、その厚さはデッキ山上より 80mm である。試験体詳細図を図 4.1.2 から図 4.1.5 に示す。鋼材が露出する全表面には厚さ 20mm のセラミック系耐火被覆材 (セラタイカ 2 号) によって耐火被覆を施した。

床スラブの合成効果が横座屈や高温時曲げ耐力に与える影響は同一荷重荷重である試験体 S-1、C-1、SC を比較することによって検討する。試験体温度はスパン中央及びその左右 1425mm の位置の 3 断面における鉄骨、スタッド、及びコンクリートの温度を測定した。またスパン中央のスラブ中央部 2 箇所において、デッキ、溶接金網、コンクリートの温度を測定した。試験体梁のたわみは図 4.1.1 下段に示す様に荷重梁と試験体に取付けた計測板との相対鉛直変位を支点、荷重点、梁中央で各々 2 点ずつ測定した。各点の変位は 2 変位計の平均とした。梁の面外変位は、梁中央上面に目印を置き、その横移動をトランシットで測定することにより得た。

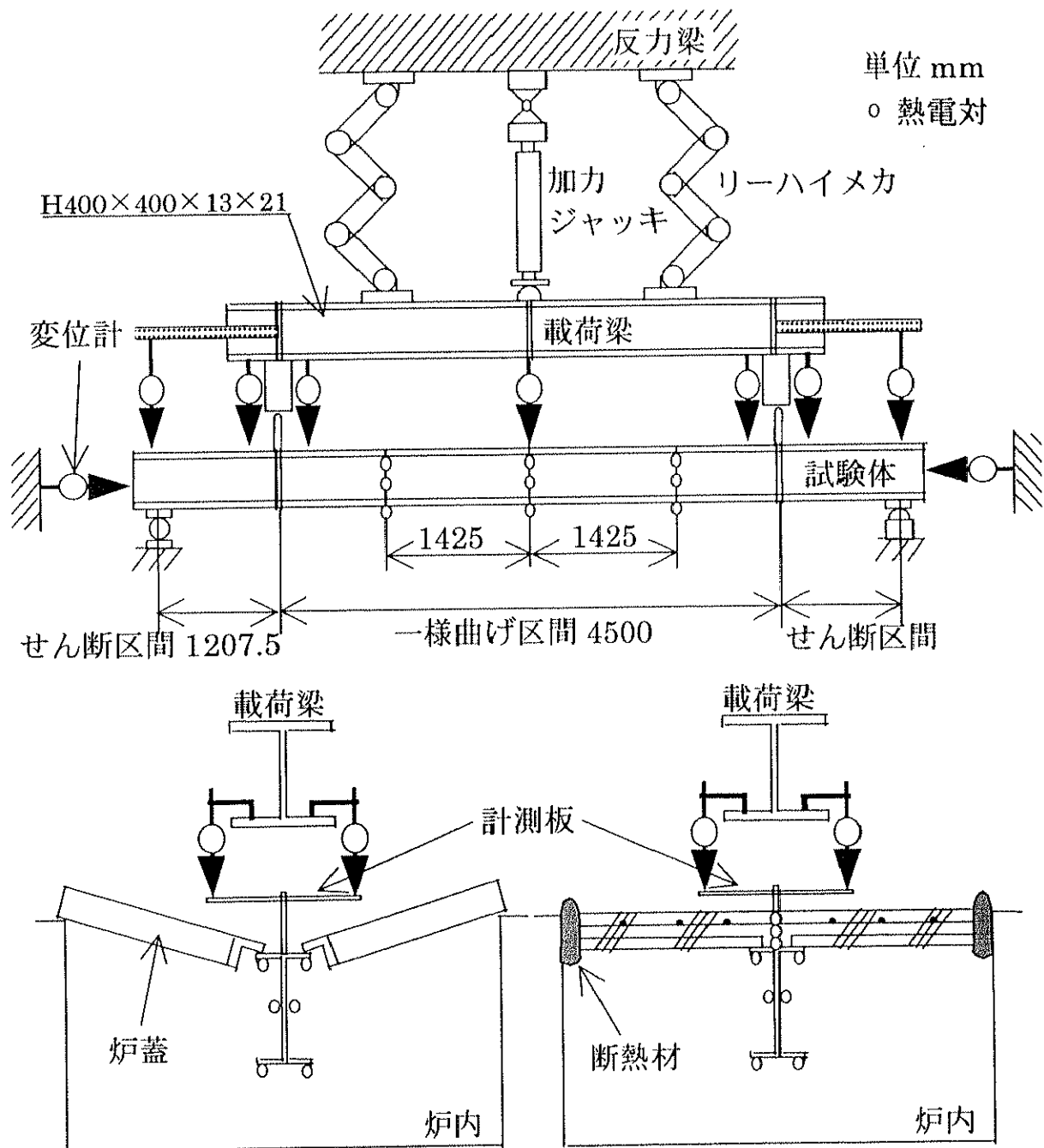


図 4.1.1 実験装置概要

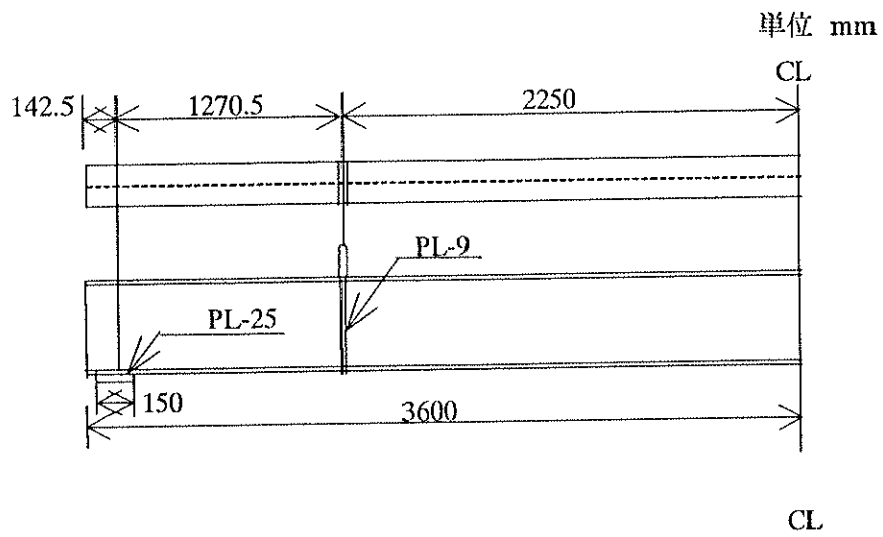


図 4.1.2 試験対 S-1、S-2 詳細

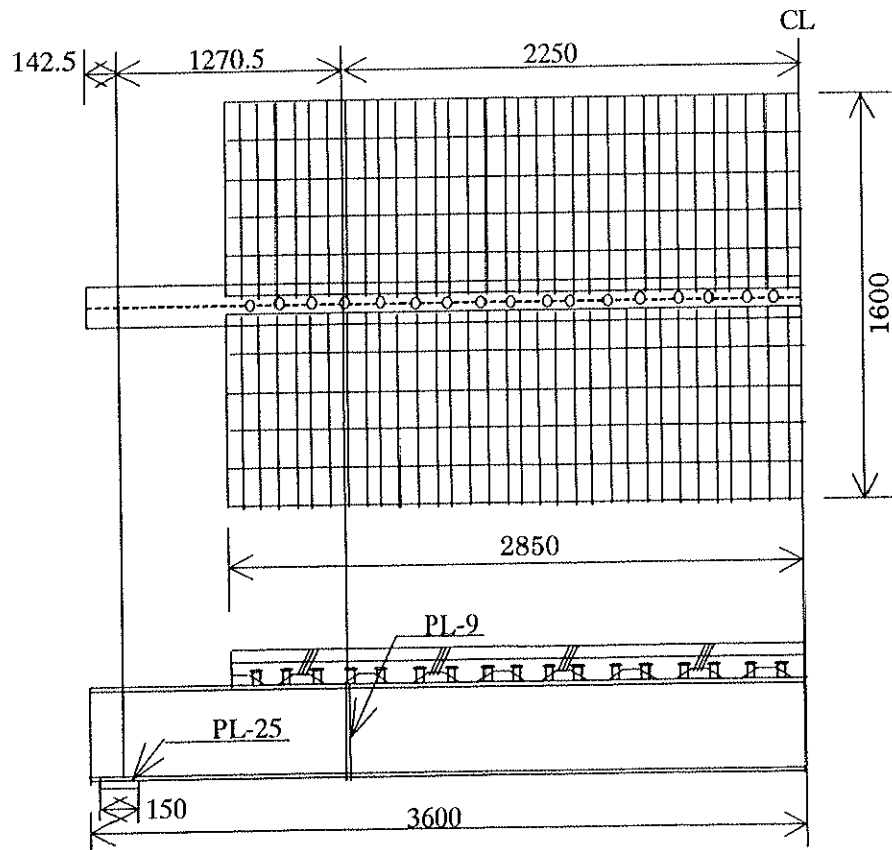


図 4.1.3 試験体 C1、C2、SC 詳細

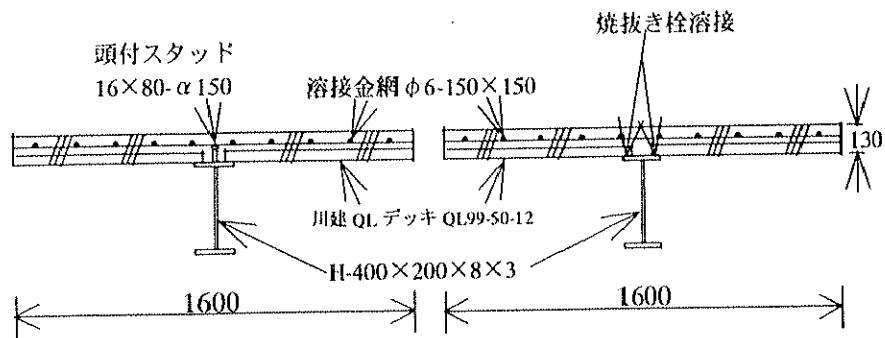


図 4.1.4 試験体 C1, C2 の断面 図 4.1.5 試験体 SC の断面

表 4.1.1 試験体種類と載荷荷重

試験体	スラブ	載荷メント	ジャッキ荷重
S-1	無し	$2/3 \cdot F \cdot sZ$	39.4 ton
S-2	無し	$1/3 \cdot F \cdot sZ$	19.7 ton
C-1	有り スタッドボルト結合	$2/3 \cdot F \cdot sZ$	39.4 ton
C-2	有り スタッドボルト結合	$2/3 \cdot F \cdot cZt$ $\rightarrow 8/15 \cdot F \cdot cZt$	46.0 ton
SC	有り 焼き抜きせん溶接	$2/3 \cdot F \cdot sZ$	39.4 ton
		F:鉄骨の降伏応力度 (実測値)	3.05 ton/cm^2
		sZ:鉄骨のみの断面係数	1170 cm^3
		cZt:完全合成梁の断面係数	2379 cm^3

4.2 実験結果

4.2.1 試験体温度時刻歴

図 4. 2. 1 に全試験体の上フランジ、下フランジ、ウェブ平均鋼材温度の時刻歴を示す。上フランジ温度上昇は下フランジ及びウェブ温度上昇よりも小さい。これは上フランジが炉外部に接するため、全試験体について同様の傾向である。図 4. 2. 2 には床スラブの温度時刻歴が示されている。図中デッキプレート温度が特に高温になるのは、これには耐火被覆が施されていないからである。一方コンクリート内部の温度は炉外表面に近づくにつれ低下する。コンクリート炉外部表面温度は最終的に 100℃前後であった。昇温中コンクリート炉外部の表面全体にひび割れが生じ、そこでコンクリート中の水分が結露した。加熱終了時以降、下フランジ、ウェブ温度は直ちに低下し始めるが、コンクリート炉外部表面温度は依然上昇し続ける。これは試験体の鋼部分と炉内の熱がコンクリートに伝達したためである。100℃付近で鋼材温度とコンクリート温度の勾配に棚が生じるのは、耐火被覆、断熱材及びコンクリート中の水分が蒸発するとき潜熱が奪われるからである。諸部材の温度が急に上昇したり乱れているのは、耐火被覆に亀裂が生じ炎が直接鋼材や熱電対に接した為であると考えられる。

4.2.2 梁中央部曲げ区間変位～部材温度関係

図 4. 2. 3 に S-1, S-2 試験体の梁中央部曲げ区間変位～部材温度関係を示す。図 4. 2. 5 に示されているのはスラブ付試験体 C-1, C-2, SC の梁中央部曲げ区間変位～部材温度関係である。「梁中央部曲げ区間変位」とは純曲げ区間を単純梁とみなしてこれが一様曲げを受けたときの中央部のたわみに相当する変形量である。実験では、梁中央部における載荷梁と試験体間の相対変位（前述に述べた計測によって得る）と載荷中央部の曲げ面内変位（梁理論による弾性計算値）を加えてこれを得る。実験結果によると部材温度は鋼梁断面内で一様ではなく、下フランジから上フランジに向かってより低温になる。そこで部材温度評価として

1. 下フランジとウェブの平均温度
2. 塑性ヒンジ形成部に近く、計測温度分布中の最高値を示す下フランジ温度の 2 種類を取り上げる。

一方、解析的に梁の高温挙動を追跡する手段として、鋼材の線膨張と弾・塑性、及び部材の有限変位をモデル化した 3 次元板要素有限要素解析 (第 2 章) を試み、これと実験結果を比較してみる。解析では実験結果から得られた部材断面中の温度勾配を考慮して上フランジ温度上昇率を下フランジウェブ温度上昇率の 1/2 に下げる。スラブ付き試験体の床スラブ温度は 100℃を上回らないとして解析した。更に、耐火被覆のひび割れによる局所的な加熱を考慮して梁中央部下フランジの温度を急激に上昇させた場合も解析した。解析に際して、鋼及びコンクリートの構成関係は次のように仮定した。

1. 鋼の高温時応力～歪関係を素材試験より得たところ、これは修正古村式で良好に模擬されることが判ったので、本有限要素解析では鋼の応力～歪関係として修正古村式を採用する。
2. コンクリートの応力～歪関係は、別途行った常温下のシリンダー圧縮試験を踏まえ、bi-linear 型の応力～歪関係を仮定する。初期ヤング係数は 210tf/cm²、降伏強度は 230kgf/cm² とする。

3. 鋼材及びコンクリートの線膨張係数は $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ と仮定する。

(1) 試験体 S-1、S-2

図 4. 2. 3 に示される試験体 S-1 の梁中央部曲げ区間変位～部材温度関係において、2 本の実験結果はそれぞれ上記の 2 種の部材温度評価に対応するが、両者は相接近し有意な異差は認められない。これはこの梁の下フランジとウェブ全体がほぼ均一に加熱されたことを意味する。300℃付近でこの試験体の変位が一時急増しているのは作用応力が常温時降伏応力の 2/3 程の大きさのとき、300℃付近で鋼材が降伏するからである。本試験体は下フランジ温度が 628℃のとき、梁中央部曲げ区間変位が 91mm に至って崩壊した。加力ジャッキのヘッドの進行速度、即ち梁のたわみ速度、を増しても所定のジャッキ荷重に達することが出来なくなったとき、加力法を荷重制御から変位制御に切り替えた。この時を崩壊温度到達時とする。トランシットによる面外変位計測によると、崩壊時には 34mm ほど梁中央が面外変形しており、横座屈が若干認められた。

有限要素解析によると、本試験体のモデルは温度 Table I の場合 300℃付近で鋼の降伏により曲げ区間変位が増大する。しかしその後の温度上昇による変位の増大は小さく、500℃付近に至って横座屈を呈して崩壊する。実験結果を考慮して上フランジ温度を低くした温度 Table II を採用した解析では温度差による線膨張の差が曲げに影響して、昇温開始と同時に梁中央部曲げ区間変位が増大する。温度勾配を考慮した温度 Table II の解析結果は実験結果と概ね一致する。温度 Table II の解析では圧縮側の上フランジの温度はウェブ、下フランジと比較して低く横座屈しにくいために、温度 Table I の解析結果より崩壊温度が高くなり、実験結果に近い崩壊温度が得られる。

試験体 S-2 の梁中央部曲げ区間変位～部材温度関係(図 4. 2. 3 参照)においても、試験体 S-1 の場合と同様、2 種の部材温度評価に基づく 2 本の実験結果の間に大きな異差はない。

有限要素解析においても、温度勾配を考慮した温度 Table II の解析結果は崩壊前の実験結果と概ね一致している。崩壊後、実験結果と解析結果に差が生じているのは、解析は一定荷重制御下で行っているのに対して、実験では崩壊点到達後の加力制御が変位制御に切り替えられており、作用荷重は崩壊前より小さくなっているからである。試験体 S-2 は崩壊に至るまで横座屈を生じなかった。本試験体 S-2 の崩壊モードは一樣曲げ区間のほぼ中央に発生した塑性ヒンジの回転による機構の形成である。終局時、耐火被覆材が当該部下フランジ位置で剥離し、この鋼材が局所加熱を受け、ここに塑性変形が集中して塑性ヒンジが形成されたのである。

○試験体 S-1、S-2 最終状態

図 4. 2. 4 には試験体 S-1、S-2 の実験終了後の材軸に沿う曲げ面内及び面外の変位分布が示めされている。同図中には鋼材温度計測断面が併記されている。曲げ面内変位図の横軸は試験体ローラー側端部を原点とした試験体長さである。試験体 S-1 は若干横座屈を生じたので試験体を上フランジ上方から見た面外変形図もあわせて示す。図中の曲げ区間変位が実験終了時の梁中央部曲げ面内変位と若干異なるのは、前者は除荷によって弾性変形が回復した後の変位であるからである。

試験体 S-1 の曲げ区間は、図 4. 2. 4 に見るように、崩壊に至るまでほぼ一樣な曲率分布を保って曲げられている。このことは、実験後この試験体に鋼材の局所的な温度上昇に直結するような亀

裂が観測されなかったことから肯ける。一方、試験体 S-2 の曲げ区間は、図 4. 2. 4 に見るように、終局時中央部の曲率が他の部分に比べ特に大きくなっている。このところは、被覆材がこの部分の下フランジ部で剥離していることが実験後の視察から判明し、これに対応して、ちょうど剥離部分の鋼材に貼付されていた熱電対の温度指示値(図 4. 2. 1 参照)が終局時急増したと符合する。両実験結果は、耐火被覆材の亀裂発生個所やその分布が梁の崩壊温度や崩壊モードに影響を及ぼすであろうことを示唆する。実際、試験体 S-1 では曲げ区間がほぼ一様に塑性化したので、横座屈の発生し易い条件が形成された。一方、試験体 S-2 では、一様曲げにも拘わらず、局所に塑性変形が集中したので、横座屈が発生し易いとはいえない条件が形成された。

(2) 試験体 C-1、C-2、SC

図 4. 2. 5 に試験体 C-1、C-2、SC の梁中央部曲げ区間変位～部材温度関係を示す。試験体 S-1、S-2 と同様に、たわみ速度を増しても所定荷重に達することが出来なくなったとき、加力法を荷重制御から変位制御に切り替えた。この時の温度を崩壊温度とする。温度上昇初期において試験体 C-1、C-2、SC の実験結果は上フランジ温度を低くした温度 Table II による FEM 数値解と良く一致する。これは温度差による線膨張の差が曲げに影響して昇温開始と同時に梁中央曲げ区間変位が増大するからである。300℃付近で曲げ区間変位が急増しているのは鋼材が塑性化し始めるからである。その後鋼材の温度上昇に伴い曲げ区間変位は増大し、崩壊に至る。試験体 C-1、C-2 の曲げ区間変位は 300℃を超えると温度 Table II の FEM 数値解析結果と比較して急激に増加している。しかし温度 Table III の梁中央下フランジを局所加熱した解析結果と比較してみると良く一致する。このことから試験体 C-1、C-2 の実験では梁の一部が局所加熱により崩壊しているが、熱電対を取付けていない位置での局所加熱であったと考えられる。そのため計測上低い温度での崩壊となった。試験体 SC も最終的に局所加熱により崩壊しているが、局所加熱を受けた所に熱電対がとりつけてあり適正な温度測定ができ適正な崩壊温度を得た。図 4. 2. 6 に試験体 C-1、C-2、SC の実験終了後の変形図を示す。この曲げ面内変位は床スラブ上面の曲げ面内変位を鋼材温度が常温まで低下した後、水系により計測したものである。曲げ面内変位図の横軸は試験体ローラー側端部を原点とした試験体長さである。試験体 C-1、C-2、SC では塑性ヒンジ形成位置がいずれもピン側に片寄っているが、これは梁の線膨張によって多少荷重のバランスが崩れたためと思われる。試験体 C-1、C-2 共に鋼材温度計測断面から離れたところで耐火被覆にひび割れが生じ、その位置に塑性ヒンジが形成された。そのため試験体 C-1、C-2 については適正な崩壊温度を計測できず、計測上低い温度で崩壊した。試験体 SC は塑性ヒンジ形成部の温度を計測でき適正な崩壊温度を計測できた。

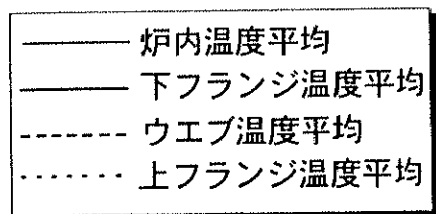
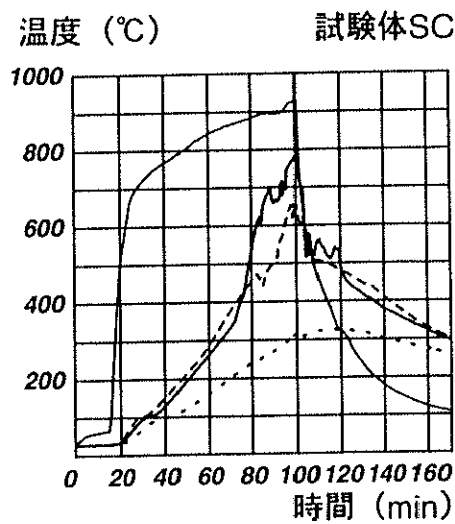
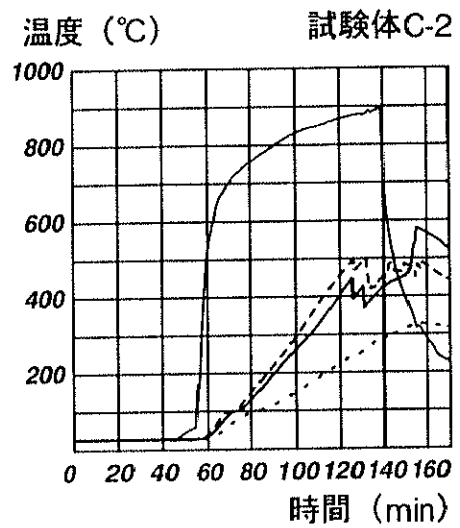
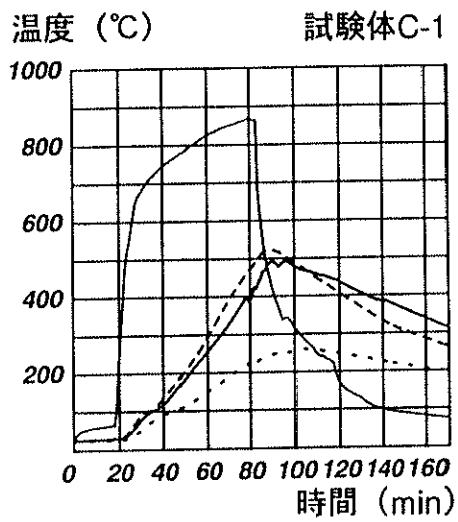
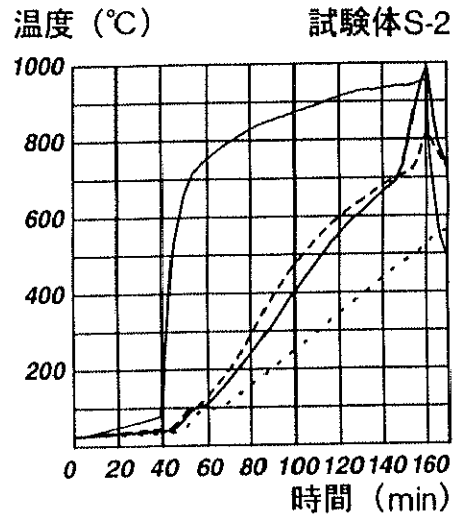
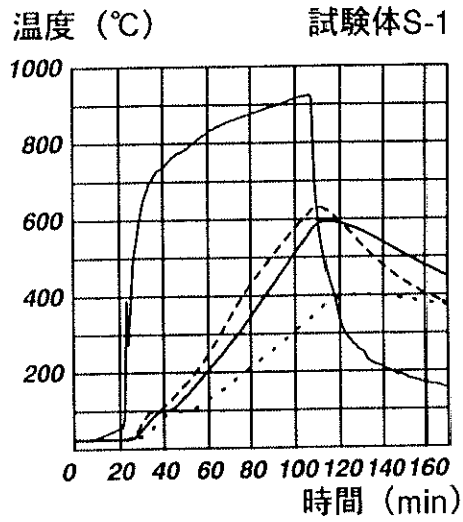


図 4. 2. 1 鋼材温度時刻暦

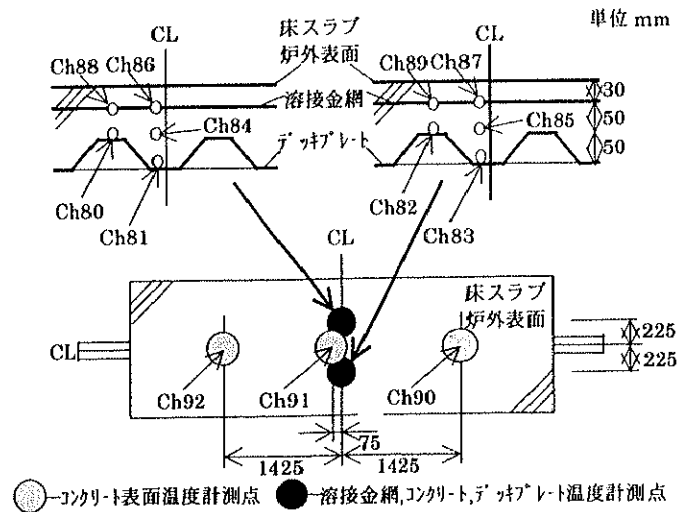
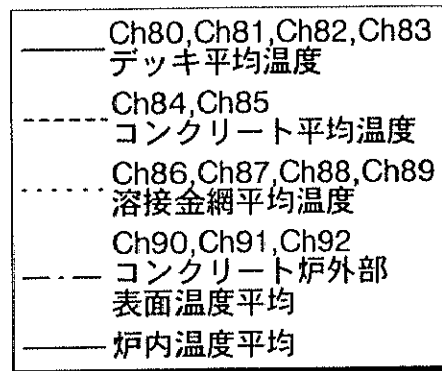
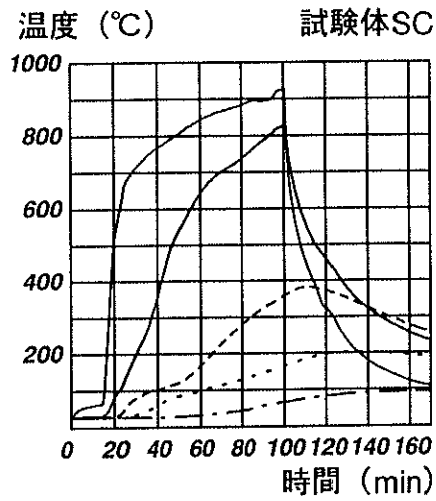
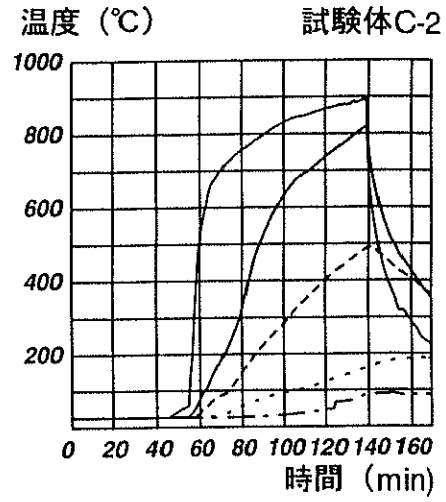
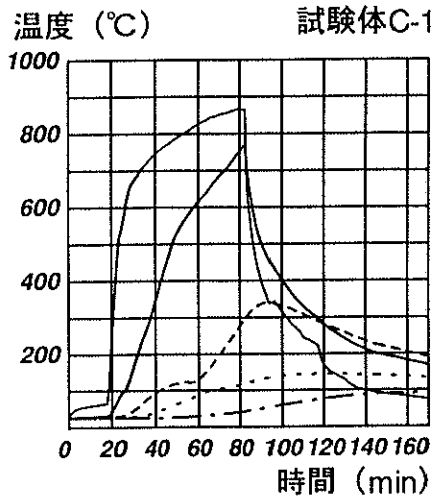


図 4. 2. 2 床スラブ温度時刻暦

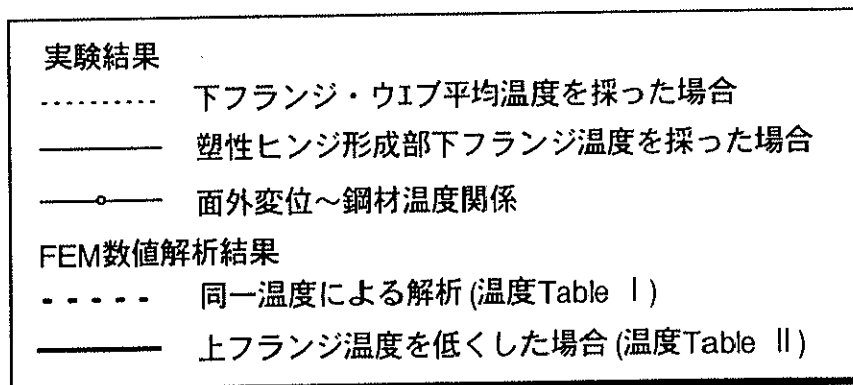
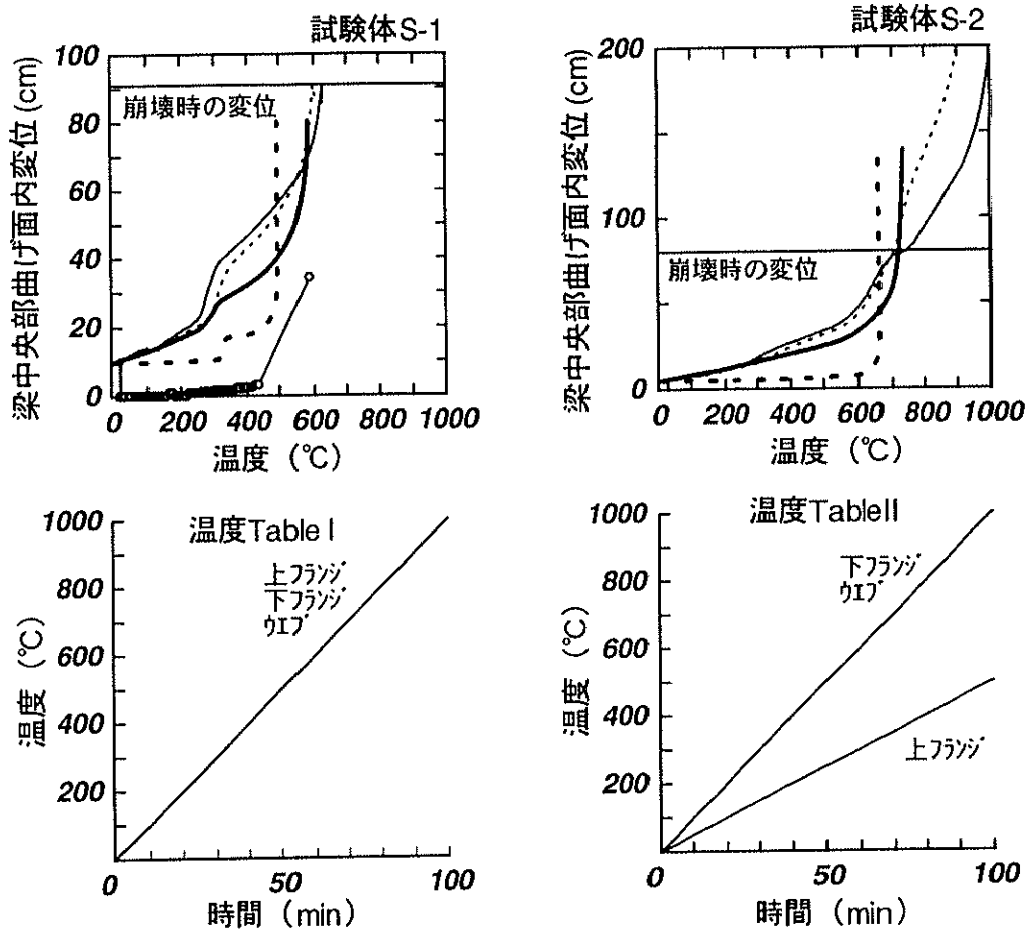


図 4. 2. 3 試験体 S-1、S-2 梁中央部曲げ区間～部材温度関係

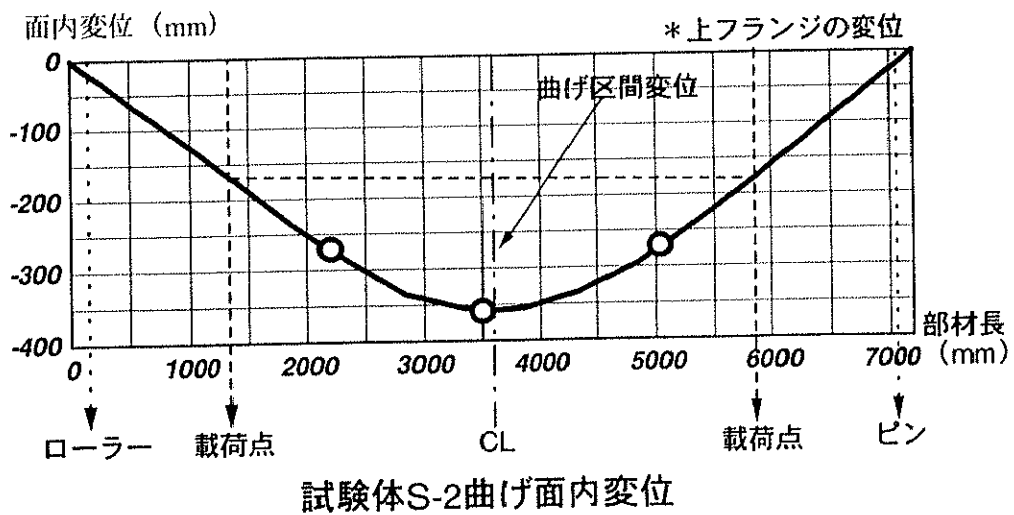
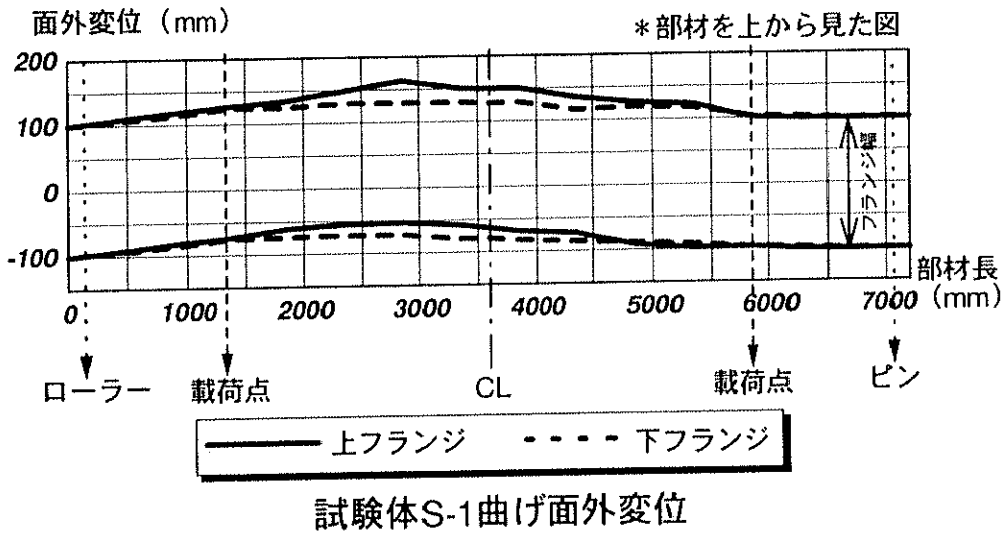
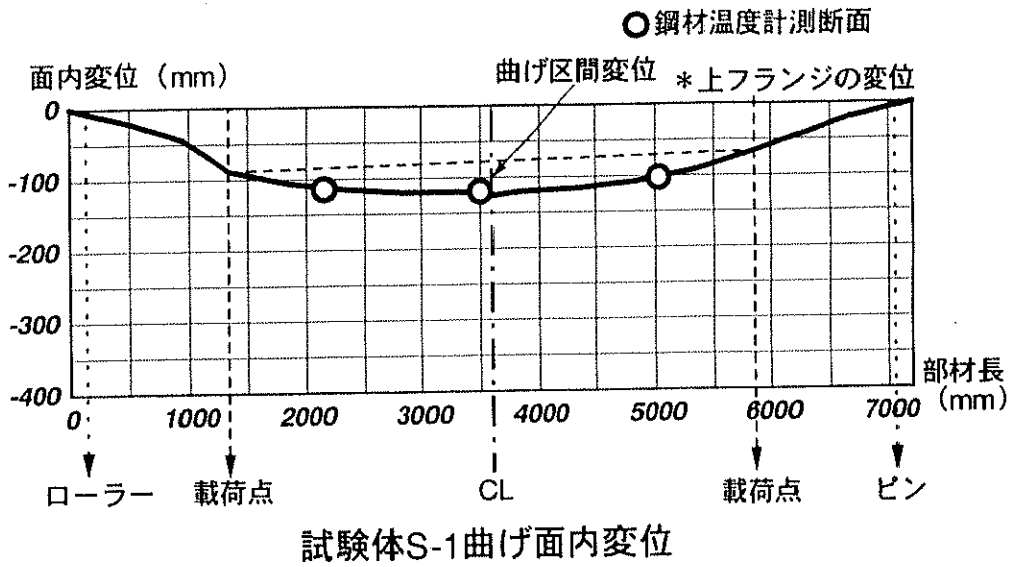


図 4. 2. 4 試験体 S-1、S-2 実験終了後試験体変形図

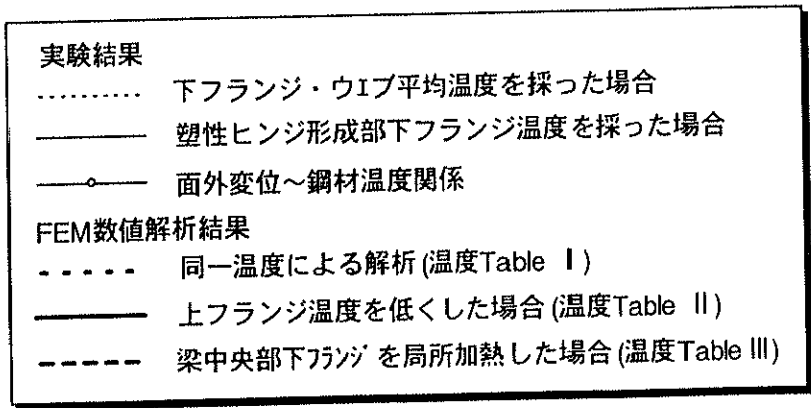
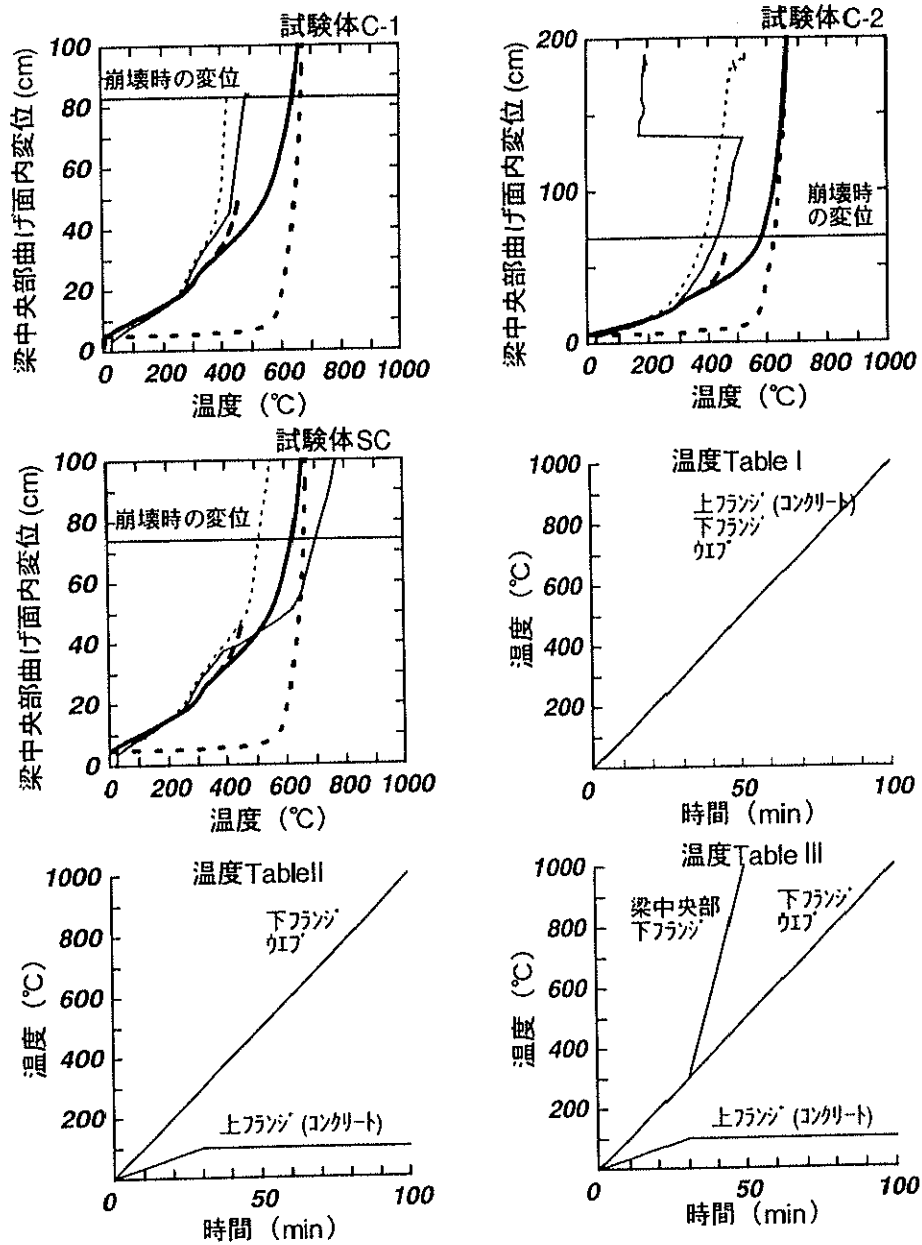


図 4.2.5 試験体 C-1、C-2、SC 梁中央部曲げ区間～部材温度関係

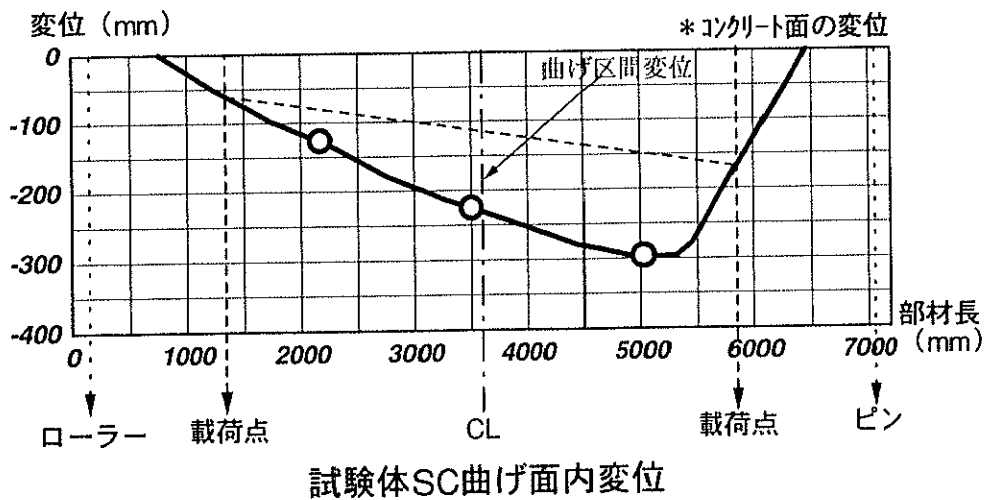
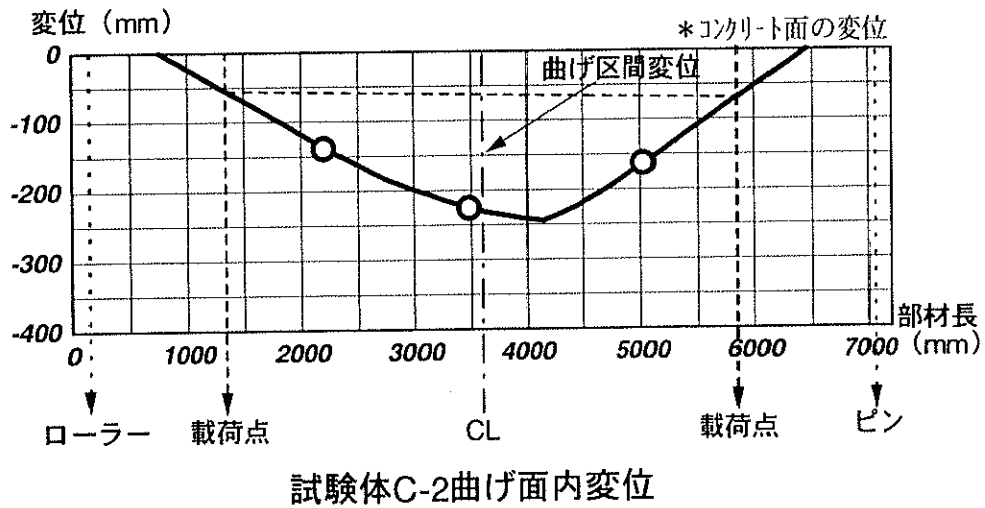
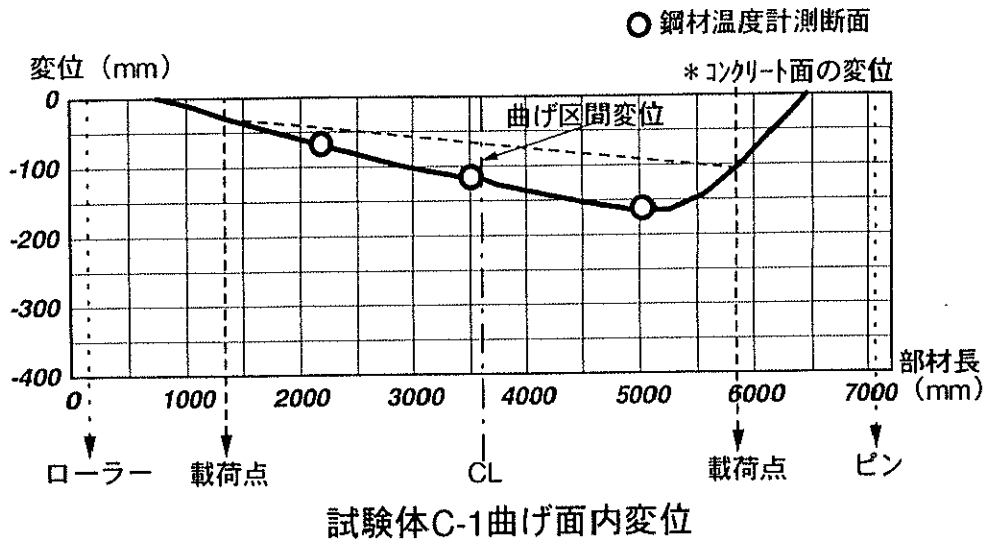


図 4. 2. 6 C-1、C-2、SC 実験終了後試験体変形図

4.3 実験による崩壊温度と基本崩壊温度の比較

4.3.1 単純支持梁の基本崩壊温度

鋼の強度は部材温度上昇と共に低下するから、梁は一定梁上荷重を受けていたとしても、ある部材温度に到ると荷重を支持することができなくなり崩壊してしまう。この部材温度を梁の崩壊温度という。本実験では加力制御を荷重から変位へ移行せしめた時点の部材温度が試験体梁の崩壊温度である。これについては前節までに述べた。一方、解析的に部材の崩壊温度を求める場合、単純塑性理論から推定される崩壊温度を特に、基本崩壊温度という。本実験に用いた梁の基本崩壊温度は、一様曲げ区間における梁の高温全塑性モーメント M_p が該当部分の作用曲げモーメント M にまで低下した時点の部材温度である。従って崩壊時

$$M = M_p \quad (4.3.1)$$

が成立する。両辺を常温時の該当梁の全塑性モーメント \bar{M}_p で除して無次元表示に直すと次式を得る。

$$\frac{M}{\bar{M}_p} = \frac{M_p}{\bar{M}_p} = \frac{\sigma_y}{\bar{\sigma}_y} = \kappa(T) \quad (4.3.2)$$

ここに

- M_p 梁内の温度分布が一様である場合の、
高温時 $T^\circ\text{C}$ における梁の全塑性モーメント
- \bar{M}_p 常温時における梁の全塑性モーメント
- σ_y 高温時 $T^\circ\text{C}$ における鋼材の歪1.0%耐力
- $\bar{\sigma}_y$ 常温時における鋼材の歪1.0%耐力

$\kappa(T)$ は3章で述べた鋼材の昇温に伴う強度低下率であり、高温素材引張り試験より得る歪1%時の応力に基づいて定められる。図4.3.1中の丸印は、本実験の梁に用いた鋼材 SN400B の強度低下率である。図中に併記した曲線(折線)は3章に示したのと同じ強度低下率予測曲線である。

図4.3.1より、本実験で用いた鋼材は予測線とほぼ同じ強度低下特性を持つことが判る。強度低下率 $\kappa(T)$ の(XXX)式より、本実験各試験体の基本崩壊温度は式(4.3.2)の $\kappa(T)$ 曲線上、縦座標が M/\bar{M}_p のときの横座標値 T で与えられる。従って強度低下曲線 $\kappa \sim T$ は、本実験梁試験体の基本崩壊曲線の役をも兼ねる。

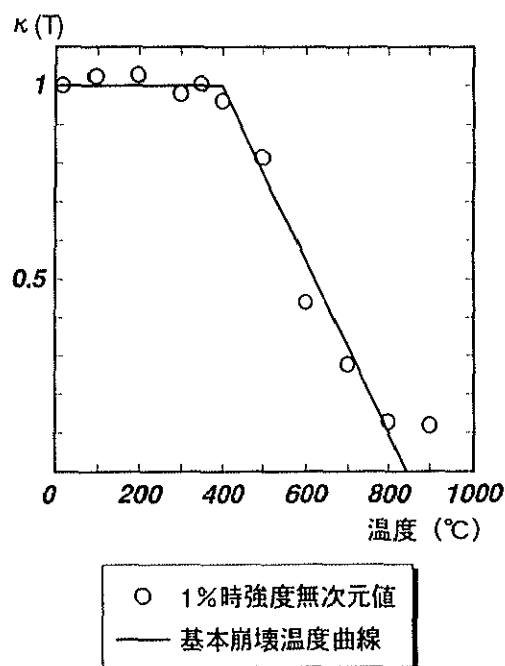


図 4.3.1 鋼材の歪 1%強度の温度依存性と基本崩壊温度

次に、実験で得られた梁の崩壊温度と基本崩壊温度曲線を比較検討する。前述の様に、梁の崩壊温度とは加力制御切り替え時の部材温度である。ただし、部材温度は一樣曲げ区間内で必ずしも一樣ではないので、塑性ヒンジ形成部付近の下フランジの温度を崩壊温度の代表値とする。また式(4.3.1)に基づいて載荷モーメントを無次元化する際の常温時全塑性モーメント \bar{M}_p として以下の3種類を用いる。

(1) 中立軸がウェブ中央と仮定した場合

梁断面に温度勾配がなく、梁が一樣に加熱された場合塑性中立軸はウェブ中央に存在する。中立軸がウェブ中心の時の応力状態を図 4.3.2 に示し、その時の常温時全塑性モーメント \bar{M}_p を式(4.3.3)に示す。

$$\bar{M}_p = \bar{\sigma}_y A_f (d_s - t_f) + \bar{\sigma}_y A_w \frac{d_s - 2t_f}{4} \tag{4.3.3}$$

$\bar{\sigma}_y$: 常温時における鋼材の降伏応力

A_w : ウェブ 断面積

A_f : フランジ 断面積

d_s : 梁せい

t_f : フランジ 厚

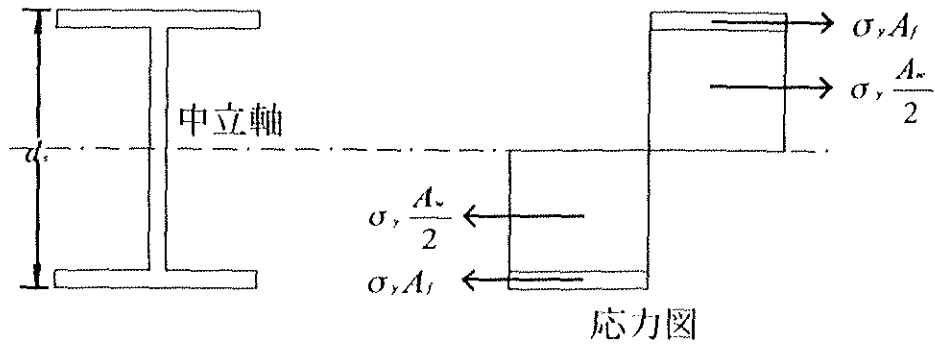


図 4.3.2 中立軸がウェブ中央としたときの全塑性状態

(2) 中立軸が上フランジとウェブの境界と仮定した場合

実験で上フランジの温度が下フランジ、ウェブの温度と比較して低いことから、上フランジの強度が相対的に強くなることを考慮する。中立軸が上フランジとウェブの境界と仮定した時の応力状態を図 4.3.3 に示し、その時の常温時全塑性モーメント \bar{M}_p' を式(4.3.4)に示す。

$$\bar{M}_p' = \bar{\sigma}_y A_f (d_s - t_f) + \bar{\sigma}_y A_w \frac{d_s - t_f}{2} \quad (4.3.4)$$

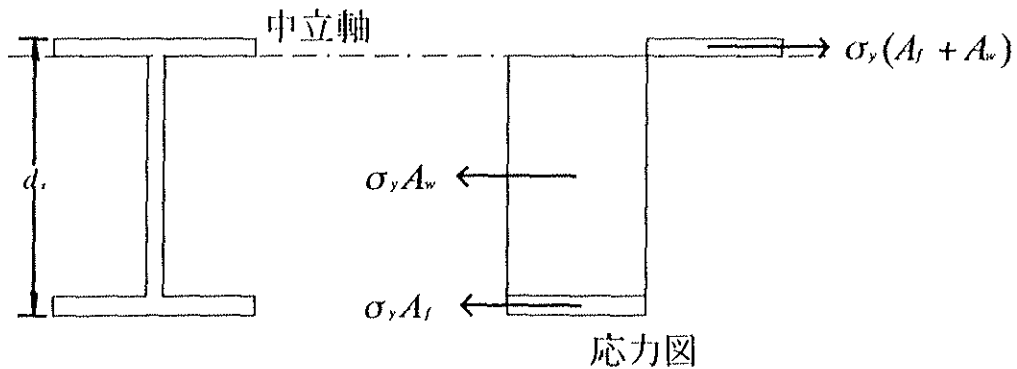


図 4.3.3 中立軸が上フランジとウェブの境界と仮定したときの全塑性状態

(3) 中立軸が上フランジと床スラブの間と仮定した場合

これはスラブ付き鉄骨梁に対応するもので、圧縮応力は全てコンクリートが負担するものと仮定している。中立軸が上フランジと床スラブの間と仮定した応力状態を図 4.4.4 に示し、その時の常温時全塑性モーメント \bar{M}_p'' を式(4.3.5)に示す。

$$\bar{M}_p'' = \bar{\sigma}_y A_f (d_s + 2d_s + d_c) + \bar{\sigma}_y A_w \left(\frac{d_s}{2} + d_s + \frac{d_c}{2} \right) \quad (4.3.5)$$

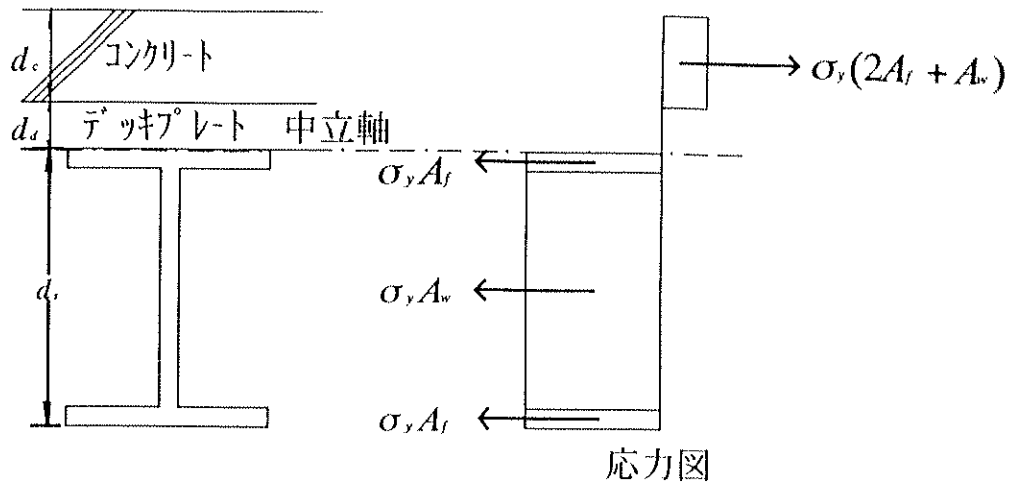


図 4. 3. 4 中立軸が上フランジと床スラブの間と仮定したときの全塑性状態

4.3.2 基本崩壊温度と実験結果の比較

次に図 4. 3. 5 に基本崩壊温度曲線と実験で得られた崩壊温度を示す。図 4. 3. 5 中の実線は式 (4. 3. 2) で与えられる基本崩壊温度曲線である。プロット点は実験結果である。その中白抜きプロット点の座標は、上記(1)項の \bar{M}_p で無次元化した $(T_b, M/\bar{M}_p)$ である。 T_b は崩壊温度である。純鉄骨梁試験体 S-1、S-2 に対しては更に点 $(T_b, M/\bar{M}_p)$ をも塗りつぶした点でプロットした。同様にスラブ付き梁試験体 C-1、C-2、SC に対しては点 $(T_b, M/\bar{M}_p)$ を併記した。実験より得た崩壊温度と基本崩壊温度曲線を比較することによって、実験結果を評価することが出来る。載荷モーメントを \bar{M}_p で無次元化した試験体 S-1、S-2、SC では基本崩壊温度曲線を上回る。しかし載荷モーメントを試験体 S-1、S-2 については \bar{M}_p' で無次元化すると基本崩壊温度とほぼ一致する。また試験体 SC についても同様に載荷モーメントを \bar{M}_p' で無次元化すると基本崩壊温度とほぼ一致する。つまり部材断面中に温度勾配がある鉄骨梁は中立軸をウェブと上フランジの境界とした常温時全塑性モーメントで無次元化し、スラブ付鉄骨梁は中立軸を上フランジとスラブの間とした常温時全塑性モーメントで無次元化すると、基本崩壊温度曲線とよく一致する。

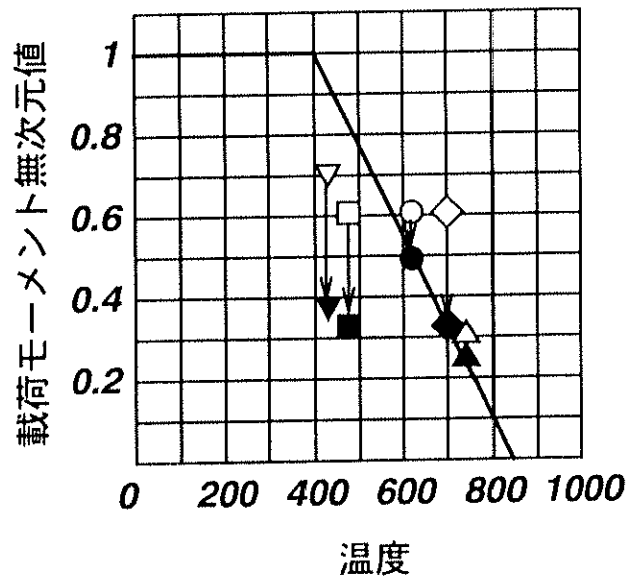
梁は火災時 3 面加熱であるために、梁断面の上方（圧縮縁）の方が下方より温度は低く、従って降伏強度はより大きい。そうすると、終局時、梁断面内の曲げの中立面は図心より上方に移動しており、この中立面位置に対応する断面の塑性断面係数は中立面が図心に位置する場合よりも大きくなっている。これは梁の断面性能の向上である。図 4. 3. 5 より、梁を上記のような断面性能の向上した梁と見なせば、その崩壊温度は単純塑性理論によって予測可能である。実験結果はこれを物語っている。

一方、試験体 C-1、C-2 両試験体の崩壊温度は、断面性能の向上を無視しても、尚、基本崩壊温度を大きく下回る。両試験体の崩壊温度（実験値）は、塑性ヒンジ非形成部に貼付される熱電対の示すいわば公称部材温度であり、データとしてはこれを採らざるを得ない。塑性ヒンジ形成部では、曲率増加のため被覆材に亀裂が生じ、特に引張縁下フランジの温度は上記公称値を遙かに

上回ると予想される。

実験整理の別法として、部材温度が断面内で一様でないことの効果を、本論のように断面性能の向上と捉える代わりに、平均部材温度の低減と捉える方法もあり得る。この場合、平均に際して各データに付ける重みは力学に矛盾しない値とすべきである。それよりも、本論のように中立軸の移動が断面性能の向上に直結すると捉える方が力学的により単純明快である。

上記のように、火災時における梁は3面加熱を受けるに止まり、その結果、梁断面の上方、つまり圧縮縁フランジの温度はウェブ及び下フランジのそれより低く、降伏強度はより大きくなっていく。実際純鉄骨梁試験体 S-1、S-2 の試験終了後の様子を観察すると、圧縮側上フランジはほぼ弾性に止まっているようである。長い梁の横座屈とは圧縮縁の横倒れに他ならないことから、これは梁の横座屈に対して有利な効果をもたらす。スラブ付き梁に対しては尚更このことがあてはまる。試験体 S-1、S-2、SC の高温曲げ強度は、図 4.3.5 に示したように、梁断面の全塑性強度にまで各々達している。これは、全塑性強度に至る前の横座屈による未成熟崩壊がなかつたことの強い主張でもある。試験体 S-1 には横座屈変形が認められたが、実験結果は、これが耐力低下をもたらすほど支配的ではなかつたことを示している。



○S-1、△S-2、□C-1、▽C-2、◇SCは
常温時全塑性モーメント \bar{M}_p で無次元化

純鉄骨梁●S-1、▲S-2は \bar{M}_p 'で無次元化
合成梁■C-1、▼C-2、◆SCは \bar{M}_p "で無次元化

図 4.3.5 梁の崩壊温度

4.4 本章まとめ

鋼梁の曲げ荷重加熱実験により鉄骨梁の耐火性能に関して以下に示す結論を得た。

実大規模の鋼梁を3面加熱すると、梁の断面方向に温度勾配が生じた。この温度勾配を考慮した3次元弾塑性有限要素解析により、高温時における梁の挙動や終局温度を的確に追跡できた。よって2章で開発した数値解析モデルの妥当性を検証できた。

次に、純鉄骨梁、合成梁何れに対しても基本崩壊温度によって崩壊温度を評価することが可能である。その際、純鉄骨梁の場合断面内の温度勾配を考慮して、荷重モーメントを塑性中立軸が上フランジとウェブ境界に存在すると仮定した常温時全塑性モーメントで無次元化すると基本崩壊温度に良く一致する。合成梁の場合は、荷重モーメントを塑性中立軸が上フランジとスラブの間に存在すると仮定した常温時全塑性モーメントで荷重モーメントを無次元化すると同様に基本崩壊温度に良く一致する。完全合成梁試験体 C-1、C-2 の崩壊温度は基本崩壊温度より低い。これは熱電対が取り付けられていない部材部分で耐火被覆材が剥離し、そこが局部加熱を受けて塑性変形がそこに集中して崩壊したため、適正な崩壊温度を計測できなかったからである。

純鉄骨梁では相対的に上フランジの温度が下フランジ、ウェブに比べて低いので、これが横座屈を拘束する効果をもたらす。またスラブ付鉄骨梁の場合は、断面性能が向上することに加えて、スラブの横座屈に対する拘束効果が大きく、純鉄骨梁と比較して崩壊温度は上昇する。

一様曲げを受ける鋼梁は温度が最も高い所で塑性ヒンジを形成して崩壊する為、塑性ヒンジ形成部の曲率増大に伴い耐火被覆に亀裂が生じると、梁は局所加熱を受け、梁全体の温度が上昇する前に未成熟な崩壊を呈する恐れがある。