合成梁と鉄骨梁の載荷加熱実験

FIRE RESISTANCE TESTS ON COMPOSITE AND STEEL BEAM

西垣太郎 — *1 杉田和直 — *2
森本恭行 — *3

Taro NISHIGAKI — *1 Kazunao SUGITA — *2
Yasuyuki MORIMOTO — *3

キーワード：
合成梁, 鉄骨梁, 梁の伸びだし, 載荷加熱実験

Keywords:
Composite beam, Steel beam, Thermal expansion, Fire resistance test

In this study, the fire resistance tests of the composite and the steel beam under loading were carried out in order to get fire resistive properties of a composite beam and to obtain basic data for the fire resistance design for CFT-Steel construction.

It was observed in the tests that the composite beam under live load and dead load was not collapsed even in high temperature (over 500°C) and thermal expansion of the composite beam has the same tendency as that of the steel beam.

1. はじめに

火災時には、鉄骨梁に耐火被覆を施していても部材温度が上昇し熱膨張する。その熱膨張により柱には部材角が生じ、耐力が劣化した柱のP- δ 効果により、架構が倒壊することが考えられる。このため、鋼-コンクリートの組合せによる合成構造物の耐火設計においては、梁の伸び出しの検討が必要であり、部材の温度上昇により略算では梁が自由膨張すると仮定して評価している。新都市ハウジング協会によるCFT構造技術指針・同解説¹⁾では、建築物の構造体を無被覆CFT柱とした場合、梁の伸び出しの影響を受けると考えられる柱の耐火性能評価を、火災時の梁の伸び出しを自由膨張で評価し、部材角が1/50生じた状態で行うこととしている。なお、部材角が1/50を越える場合には適用範囲外としている。

しかし、鋼構造およびCFT構造で一般的に使用されている合成梁では、コンクリートスラブによる拘束や、火災階上階の健全な柱の剛性など、様々な要因により梁の伸び出し量は抑えられるという考え方がある。また一方、設計思想が性能設計へと移行するにあたり、現法規では平均温度350°C、最高温度450°Cに設定されている許容鋼材温度が、平均温度500°C、最高温度600°Cに設定される可能性も出てきている。このようなことから、火災時の構造安定性評価に大きな影響を与える一要因である合成梁の耐火性状を把握しておく必要がある。

本報告では、火災時における合成梁の熱膨張による伸び出し量等の耐火性状把握を目的として行った合成梁と鉄骨梁の載荷加熱実験について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状寸法は、実施工された合成梁の調査結果と実験施設の形状寸法を考慮し、実在の構造部材の一部を切り出したものとして、全長7700mm、幅3000mm、高さ1015mm（鉄骨850mm+コンクリートスラブ165mm）、支点間距離6800mm、加熱区間6000mmとした。試験体の形状および寸法を図-1に示す。試験体は、コンクリートスラブの拘束効果を見るため合成梁と鉄骨梁の2体とした。

使用した鋼材とコンクリートの材料特性をそれぞれ表-1と表-2に示す。試験体の鉄骨部分には2時間耐火仕様〔耐火（通）G2211 ロックウール 吹き付け厚50mm〕を目標に半湿式で平均厚54.1mmの耐火被覆を施した。実験時の耐火被覆の含水率は8.6%であった。

表-1 鋼材の材料特性

	鋼種	降伏点 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^5$ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
鉄骨ウェブ	SM490A	452	2.17	574	25.8
鉄骨フランジ		384	2.10	523	31.3
スタッド	SWCH16A	345	—	458	39.0
溶接金網		534	2.00	625	8.7

表-2 コンクリートの材料特性

材令(日)	養生方法	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	*アソビ比	含水率 (%)
254	標準	42.4	—	—	—	—
(実験開始日)	現場封蔵	39.5	3.20	2.91	0.22	7.12

*1 ㈱大成建設技術研究所 主席研究員・工博
(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

*2 ㈱大成建設技術研究所 主席研究員・博士(工学)

*3 ㈱大成建設技術研究所 研究員

*1 Chief Research Engineer, Technology Research Institute, Taisei Corporation, Dr. Eng.

*2 Chief Research Engineer, Technology Research Institute, Taisei Corporation, Dr. Eng.

*3 Research Engineer, Technology Research Institute, Taisei Corporation

図-1 試験体形状 (合成梁)

図-2 スラブ内部温度測定位置

2.2 載荷および加熱方法

載荷は、図-1に示すように試験体を単純支持し、加熱区間の4等分点の2点(加熱区間両端から1500mmの位置)を加力点とし、それぞれの加力点に載荷荷重の1/2づつを集中荷重として与えた。載荷荷重は、実構造部材が受けると考えられる長期設計荷重時の応力と試験体の応力を一致させるよう、合成梁0.52MN(応力:48.27N/mm², M/My:0.13)、鉄骨梁0.41MN(応力:48.27N/mm², M/My:0.13)とした。荷重は加熱前に載荷し、加熱開始から実験終了まで一定に保持した。加熱は試験体上部を非加熱側として、JIS A 1304の標準加熱温度曲線に従って行った。試験体と炉との間にできる隙間は、耐火モルタルを用いた炉蓋と、セラミックブランケットで養生した。実験は鋼材の平均温度が500℃あるいは最高温度が600℃に達するか、もしくは荷重を支持できなくなるまで行うこととした。なお、実験は大成建設(株)技術研究所の多目的炉(炉内寸法:6000mm×3000mm×深さ4000mm 燃料:灯油)と20MN載荷装置を用いて行った。

2.3 測定項目

実験では、図-1および図-2に示すように、鋼材温度、スラブ内部温度、試験体の鉛直方向変形、水平方向変形および炉内温度を測定した。試験体温度測定には線径0.65mmのK型熱電対を用い、変形測定には電気式変位計を用いた。

3. 実験結果および考察

合成梁は、240分で鋼材平均温度が500℃に達したため実験を終了した。鉄骨梁は、横座屈防止のスチフナ補強がされておらず、横座屈により耐火炉の内部を損傷する可能性があるため、152分で実験を終了した。合成梁では、実験終了時に梁の局部座屈・横座屈などは生じず、試験後の観察においても耐火被覆の剥離、剥落は認められなかった。実験結果を以下にまとめて示す。

3.1 炉内温度と加熱時間の関係

実験時の炉内温度の一例として、合成梁の載荷加熱実験における炉内温度-時間の関係を図-3に示す。炉内温度は標準加熱温度曲線と

図-3 炉内温度-時間の関係 (合成梁)

よく一致しており、加熱は適切な条件で行われた。なお、図には省略したが、鉄骨梁も同様な加熱が行われた。

3.2 試験体温度と加熱時間の関係

合成梁試験体のコンクリートスラブ内部温度-時間の関係を図-4(a)~(c)に、スラブ内部温度分布-時間の関係を図-5(a)~(c)に示す。スラブ内部温度は、スパン中央位置の鉄骨梁上部(厚さ165mm)、スラブ谷部分(厚さ165mm)、スラブ山部分(厚さ90mm)の3断面を示す。

梁上部が他の断面に比べ緩やかな温度上昇を示している。これは、スラブ谷部分と山部分ではデッキプレートが直接加熱されているのに対して、鉄骨に接合されている梁上部のスラブは直接には加熱されていないため、流入する熱量が少なかったと考えられる。また、スラブ内温度が100℃で停滞する現象が現れており、その停滞時間が加熱面からの距離が大きいくほど長くなっている。これは加熱側のコンクリート中の水分が、温度上昇により膨張・蒸発してコンクリート内にある空隙の圧力が大きくなり、水分や蒸気が圧力が低い加熱裏面側の空隙へと移動したためと考えられる。スラブ裏面温度は、図-5(c)に示すスラブ厚の薄い[スラブ山部分]でもっとも上昇し、加熱時間120分で117.9℃、180分で194.2℃、加熱終了時の240分で290℃であった。

各試験体の加熱区間中央の鋼材温度-時間の関係を図-6および図-7に示す。鋼材の温度がスラブ内部温度と同様に約100℃で停滞しているのが見られるが、これは耐火被覆中の水分が移動・蒸発し、鋼材の熱が奪われているためと考えられる。同じ加熱時間においては、合成梁の方が高い温度を示した。これはコンクリートスラブからの熱損失が大きいため、炉内温度を上昇させるのに必要な火力が大きくなったためと考えられる。加熱終了時の鋼材平均温度は合成梁約550℃、鉄骨梁約260℃であった。

3.3 梁の水平方向変形と加熱時間の関係

各試験体の梁の伸び変形-時間の関係を図-8および図-9に示す。鉄骨梁加熱終了時の加熱時間152分での伸び量を比較すると、合成梁の方が鉄骨梁に比べて大きくなっている。この要因として、合成梁の

図-4 試験体温度-時間の関係 (合成梁 スラブ内部)

図-5 試験体温度-時間の関係 (合成梁 スラブ内部温度分布)

方が鋼材温度が高くなっていることが考えられる。また、両試験体とも加熱が進むにつれて梁上部と梁下部の伸び量の差が大きくなっている。これは梁の上部と下部の温度差が大きくなったことと鋼材の温度上昇による剛性低下により、曲率が増大したためと考えられる。

3.4 スラブの水平方向変形と加熱時間の関係

合成梁におけるコンクリートスラブ各部位の伸び変形-時間の関係を図-10に示す。変形は図-1に示すように、試験体の端部側面 A, B, C の3カ所で測定した。スラブの伸びは、A, C に比べてBが小さい。これは3.2と同様の理由により、鉄骨の上部のスラブは内部温度が上がりにくく、温度上昇による伸びが小さかったためと考えられる。このように伸び量に差が出たため、図-11に示すように鉄骨梁と平行なひび割れがスラブに生じたと考えられる。このひび割れにより、スラブが鋼材の伸びだしを拘束する効果は、小さくなっていると考えられる。

3.5 合成梁の鉄骨とスラブの水平方向変形の比較

図-12に鉄骨とスラブの伸び変形-時間の関係を示す。この図は鉄骨とスラブの境界部分で、それぞれの伸び量を比較したものである。スラブと鉄骨が一体となって伸びていれば同じ値を示すはずであるが、加熱が進むにつれて、鉄骨の方が大きく伸びだし、伸び量の差は加熱時間60分で1.5mm、120分で2.6mm、180分で4.0mmと徐々に大きくなっている。よって、加熱が進むにつれ、鉄骨に溶接されたスタッドによる合成効果が低下していると考えられる。

図-6 試験体温度-時間の関係 (合成梁)

図-7 試験体温度-時間の関係 (鉄骨梁)

3.6 鉛直方向変形と加熱時間の関係

各試験体スパン中央の加熱開始時からのたわみ増加量-時間の関係を図-13に、たわみ速度-時間の関係を図-14に示す。合成梁と鉄骨梁がそれぞれほぼ同じ傾向で推移した。

試験体のたわみは、加熱が進むにつれて、熱劣化と熱応力により増大した。加熱開始から終了までのたわみ増加量は、合成梁44mm、鉄骨梁19mmで両試験体とも破壊の判定値 (ISO834: $L^3/400d$ 合成梁113mm, 鉄骨梁136mm, L : スパン, d : 試験体のせい) に至っていない。なお、図中には参考のため旧ISO834の判定値 ($L^3/800d$: 合成梁57mm, 鉄骨梁68mm) も示した。

たわみ速度は、加熱時間50分までは増加し、その後減少して加熱時間80分ではほぼ0mm/minとなった。この時間帯は、耐火被覆により鋼材温度が停滞していたため、温度上昇による剛性低下が小さかった

図-8 梁の伸び変形-時間の関係 (合成梁)

図-9 梁の伸び変形-時間の関係 (鉄骨梁)

図-10 スラブの伸び-時間の関係 (合成梁)

図-11 実験後の試験体ひび割れ図 (合成梁)

図-12 鉄骨とスラブの伸び比較 (合成梁)

図-13 たわみ増加量-時間の関係

と考えられる。その後、鋼材の温度が上昇し部材の剛性低下が進むにつれて、たわみ速度は大きくなった。たわみ速度もたわみ増加量と同様に、破壊の判定値 (ISO834: L²/9000d 合成梁 5mm/min, 鉄骨梁 6mm/min) を越えなかった。

3.7 梁の伸びと鋼材温度の関係

梁の伸び出し量-鋼材温度の関係を図-15に示す。梁の伸び出し量および鋼材温度は平均値で評価し、実験値と温度依存させた線膨張係数²⁾ $((11.0+5.75 \times 10^{-5} T_s) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ (T_s : 鋼材温度) を用いて略算した計算値とを比較した。合成梁と鉄骨梁の伸び出し量は、鋼材温度とはほぼ比例関係を示し、両試験体の実験値 (線膨張係数は約 $9.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) に差は認められなかった。よって、コンクリートスラブによる梁の伸びだしの拘束はなかったと考えられる。各試験体の伸び量は、鋼材温度が低い領域では計算値との差がほとんど見られなかったが、鋼材温度が200℃に達するあたりから実験値の方が小さな値を示した。現法規における許容鋼材平均温度350℃では、合成梁の実験値と計算値との差は5mmとなった。

4. まとめ

実験結果の考察から得られた知見を以下に示す。

- 1) 本実験では、合成梁と鉄骨梁の伸び出し量に差は見られず、コンクリートスラブの拘束力は認められなかった。これは、鉄骨に平行なひび割れがコンクリートスラブに生じたことと、部材の温度上昇によりスタッドによる合成効果が低下したことにより、鋼材の伸びだしに対するスラブの拘束力がなくなったためと考えられる。
- 2) 梁の伸び出しの実験値は、計算値に比べて小さな値を示したこと

図-14 たわみ速度-時間の関係

図-15 梁の伸び-温度の関係

から、略算による梁の伸び出しの評価は、安全側で行われていることが確認された。

3) 単純支持である本実験の合成梁は、鋼材平均温度500℃の高温に達しても、梁の局部座屈・横座屈等が生じず、耐火被覆の剥離、剥落もなかった。また、試験体の変形はISO834の判定値よりかなり小さかった。このことから、鋼材平均温度500℃においても合成梁部材として安定していると考えられる。

以上の実験結果は、CFT構造などの耐火設計を行う際に有用なデータになると考える。ただし、本実験は梁部材を単体として扱った場合であるため、今後は他の部材との関連性を考慮した実験が必要である。

参考文献

- 1) (社) 新都市ハウジング協会編集: CFT構造技術指針・同解説, (社) 新都市ハウジング協会, 1997
- 2) (財) 国土開発技術センター編集: 建築物の総合防火設計法 第4巻耐火設計法, p118, (財) 日本建築センター, 1989

[1998年6月26日原稿受理 1998年11月4日採用決定]