RC スラブが負曲げモーメントを受ける場合の耐火性能に関する研究

STUDY ON FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE SLAB UNDER THE NEGATIVE BENDING MOMENT

西村 俊彦*
Toshihiko NISHIMURA

This paper describes experimental and analytical studies on the fire resistance of a reinforced concrete slab under the negative bending moment. As the result of fire resistance tests, it became clear that the reinforced concrete slab under the negative bending moment had the outstanding performance for the fire heating. The bar arrangement of main reinforcement and slab thickness influence the fire resistance greatly. The analysis result was well in agreement with the experimental results. Parameter study was performed and the influence of the bar arrangement and slab thickness on the fire resistance became clear.

Keywords : fire resistance, reinforced concrete slab, negative bending moment,
fire resistance test under load, thermal stress and deformation analysis
耐火性能、RCスラブ、負曲げモーメント、載荷加熱試験、熱弾塑性解析

1. はじめに

筆者らはこれまで鉄筋コンクリート造床スラブ（以下、RCスラブ）の耐火性能に関する研究を進めてきた¹⁾²⁾。文献1では、正曲げモーメント（スラブ下端に引張応力を発生させる曲げモーメント）を受けるRCスラブを対象に、載荷加熱実験と数値解析を行い、耐火性能を明らかにすると共に、火災耐力評価式を提案した。

一方、建物で一般に用いられるRCスラブは端部を梁によって拘束されるため、スラブ中央部には正曲げモーメントが、スラブ端部には負曲げモーメント（スラブ上端に引張応力を発生させる曲げモーメント）が発生し、スラブスパン方向に正曲げ域と負曲げ域が同時に形成される（図1）。そして火災時には、曲げ耐力の低下によって端部と中央部に塑性ヒンジが形成され崩壊に至る。このため、RCスラブの耐火性能を評価するには、正曲げモーメントを受ける中央部と併せて、負曲げモーメントを受ける端部についても火災時耐力を把握する必要がある。

耐火性能検証法（平成12年建設省告示第1433号）³⁾では、負曲げモーメントを受けるRCスラブ端部の火災耐力評価式を提案している。500℃以上の断面を無効帯とみなし、500℃以下の有効断面に対して火災時耐力を計算する略算法であり、安全率を見込む代わりに、簡易に火災時耐力を計算出来るという利点を有している。実務の設計においては有用なツールとなっているが、火災時の性状を適

切に考慮したものとはなっておらず、耐火性能を過小評価する傾向がある。このため、火災継続時間が長い場合や荷重条件が厳しい場合などは配筋の変更が必要になることがあり、火災時の性状を適切に考慮した火災耐力評価法が求められている。耐火性能検証法に代わる火災耐力評価法を得るためには、負曲げモーメントを受けるRCスラブ端部が火災によって破壊に至る挙動を明らかにし、火災時耐力を定量的に把握する必要がある。

負曲げモーメントを受けるRC部材（梁・床）に関する既往の研究として、文献4では小断面のRC梁試験体に圧縮側から加熱を与え、理論解との比較検討を行うことで、火災時の変形挙動と耐力に関する知見が得られている。文献5,6では、材端拘束を受けるRC部材（梁・床）を対象に数値解析による検討が行われている。材端

図1 正曲げ域と負曲げ域

* 竹中工務店技術研究所 主任研究員・工修
(東京理科大学大学院理工学研究科博士課程建築学専攻在籍)

Research and Development Institute, Takenaka Corporation, M. Eng.
(Doctoral Course Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Science and Technology,
Tokyo University of Science)

を拘束されたRC曲げ部材が加熱を受けると、端部の拘束曲げモーメントが中央部の引張側曲げモーメントを打ち消すように作用し、材端部の負曲げ耐力と中央部の正曲げ耐力の和が、外力により生じる作用曲げモーメントの値まで低下したときに、両端及び中央部に塑性ヒンジが形成され破壊に至ることが示されている。これらの文献によって、RCスラブの耐火性能に関する貴重な知見が得られているが、負曲げモーメントを受けるRCスラブが火災加熱によって破壊に至る挙動については不明な点が多く、火災時耐力を定量的に把握するところまでは至っていない。

そこで本研究では、負曲げモーメントを受けるRCスラブの火災時の挙動を明らかにし、火災時耐力を定量的に把握することを目的として、実験と数値解析による検討を行った。2章では、実大サイズの試験体に対する载荷加熱実験を行い、負曲げモーメントを受けるRCスラブの耐火性能を検討した。3章では数値解析を行い、負曲げモーメントを受けるRCスラブの火災時における破壊挙動と火災時耐力を検討した。

2. 負曲げモーメントを受けるRCスラブの载荷加熱実験

2. 1 試験体

負曲げモーメントを受けるRCスラブの耐火性能を検討するため载荷加熱実験を実施した。図2に試験体を示す。支持梁の両側に片持ちスラブを接合した試験体で図1のスラブ端部をモデル化した。図1のモデルは加熱を受けると、両端を拘束されることで拘束曲げモーメントが発生するが、ここではその影響は考慮せず、支持点をピン支持として加熱中は終始試験体に一定の負曲げモーメントが生じるモデルとした。支持梁は幅400mm×せい600mmのRC梁とし、この両側に長さ1400mmの一方向配筋されたRCスラブを接続させた。スラブ幅及び梁長さは共に1000mmとした。なお、支持梁であるRC梁については、加熱による強度と剛性の低下及び熱変形の影響を除くため、加熱表面をセラミックブランケットで耐火被覆した。この実験では、負曲げモーメントを受けるRCスラブの破壊時の挙動と耐力を把握することを目的として、試験体が破壊するまで加熱を続ける計画とした。実験変数は、スラブ厚、配筋、载荷荷重とした。試験体一覧を表1に示す。

表1 試験体一覧

試験体名	スラブ厚 (mm)	被り厚 (mm)	下端主筋	上端主筋	M/Mu
試験体1	150	30	D13@200 (5-D13)	D13@200 (5-D13)	0.45
試験体2	150				
試験体3	200			D13@100 (9-D13)	0.87
試験体4	150				
試験体5	150				

载荷荷重は、図2に示す梁縁位置でスラブに生じる曲げモーメントMと(1)式で計算される常温時の終局曲げ耐力Muの比(以下、荷重比)で設定した。

$$M_u = 0.9a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (1) \text{式}$$

ここに、 M_u : 常温時の終局曲げ耐力(kN・m・10⁻⁶)

a_t : 上端主筋の断面積(mm²)

σ_y : 上端主筋の降伏強度(N/mm²)

d : 上端主筋重心から圧縮側最外縁までの距離(mm)

上端主筋の降伏強度 σ_y は鉄筋の引張試験から得られた0.2%オフセット強度(表5)とした。試験体1と試験体2は、スラブ厚を150mm、上下主筋をD13@200として荷重比を変化させた。荷重比0.45の試験体1に対し実験を行った結果、極めて高い耐火性能を示したことから(詳細は2.4.2に示す)、試験体2は、加熱中に試験体を破壊させるため、荷重比を構造設計上の長期許容曲げモーメント(M/Mu=0.66)を上回る高い値(M/Mu=0.87)に設定した。試験体3は、主筋配筋と荷重比を試験体2と同じとし、スラブ厚を200mmとした。試験体4は、スラブ厚と荷重比を試験体2と同じとし、上端主筋をD13@100とした。試験体5はスラブ厚と主筋配筋を試験体4と同じとし、荷重比を変化させた。

2. 2 使用材料

コンクリートの使用材料を表2に、調合を表3に、材料特性を表4に示す。スラブ鉄筋はいずれもSD295Aとした。スラブ主筋であるD13の引張試験結果を表5に示す。

2. 3 実験方法

竹中工務店技術研究所の载荷加熱用耐火試験炉を用いて耐火実験を実施した。実験方法を図3に示す。耐火試験炉の上部に試験体を

図2 試験体

設置し、両端を支持した状態で試験体の中央部を油圧ジャッキによって上に引き上げることでRCスラブに負曲げモーメントを与えた。載荷荷重は、梁縁位置でスラブに生じる曲げモーメントM(図2)と曲げ耐力Muの比が表1に示す値となるよう設定した。所定の荷重を保持した状態でISO-834に規定された標準加熱温度曲線に従い、試

表2 コンクリートの使用材料

	種類	産地	密度(表乾) g/cm ³
細骨材	陸砂	鹿島	2.56
	砕砂	岩瀬	2.62
粗骨材	碎石	岩瀬	2.65
セメント	普通ポルトランドセメント		
混和剤	AE減水剤 標準形(ボゾリスNo.70)		

表3 コンクリートの割合

目標強度 N/mm ²	水セメント比 %	細骨材率 %	単位量 kg/m ³				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
24	78.0	47.3	172	221	866	996	2.365

表4 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	比重	含水率 (%)
26.37	2.76	2.655×10 ⁴	2.23	5.8

表5 鉄筋の機械的性質

鋼材種	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
SD295A	372	19.2×10 ⁴	536	20.4

図3 実験方法

図4 温度測定位置(試験体の幅方向断面)

験体が破壊に至るまで加熱を続けた。なお、今回使用した耐火試験炉の能力的な理由から、4時間の加熱を与えても破壊に至らなかった場合は、耐火試験炉の状態に応じて適宜加熱を終了した。試験体1は332分、試験体2は315分、試験体3は270分まで加熱しても試験体が破壊しなかったため、加熱終了後、試験体が破壊するまで荷重を増加させ、破壊時の荷重を測定した。

実験時は、加熱温度、内部コンクリート温度、主筋温度、非加熱側表面温度(以下、裏面温度)、載荷荷重、加力位置と支持点の鉛直変位を測定した。内部コンクリート温度と主筋温度は、図2に示す位置①及び位置②で、裏面温度は位置①でK熱電対を用いて測定した。熱電対の断面内における設置位置を図4に示す。位置①は加熱面から10mm間隔で、位置②は20mm間隔で熱電対を設置した。荷重は油圧ジャッキの下側に取り付けたロードセルを用いて測定した。

2. 4 実験結果

2. 4. 1 温度測定結果

スラブ厚を150mmにした試験体のコンクリート温度測定結果として加熱時間が最も長かった試験体1の測定結果を図5(図2に示す温度測定位置①)と図6(図2に示す温度測定位置②)に、スラブ厚を200mmとした試験体3のコンクリート温度測定結果を図7(温度測定位置①)と図8(温度測定位置②)に示す。また、主筋温度の測定結果を図9(温度測定位置①)と図10(温度測定位置②)に示す。

梁縁位置近傍(温度測定位置②)は加熱中央部(温度測定位置①)に比べ温度が低くなる傾向が見られた。これはスラブが受けた熱の一部が梁に吸収されたためと思われる。スラブ厚150mmの試験体については試験体1の結果のみを示したが、温度測定位置における各試験体のばらつきは少なく、同様の結果となっていた。

次に、裏面温度の初期値からの温度上昇(温度測定値①)を図11

図5 コンクリート温度(試験体1スラブ厚150mm:温度測定位置①)

図6 コンクリート温度(試験体1スラブ厚150mm:温度測定位置②)

図 7 コンクリート温度(試験体 3 スラブ厚 200mm:温度測定位置①)

図 8 コンクリート温度(試験体 3 スラブ厚 200mm 温度測定位置②)

図 9 主筋温度(温度測定位置①)

図 10 主筋温度(温度測定位置②)

に示す。参考として、RCスラブの裏面温度上昇が平成 12 年建設省告示第 1432 号で許容値として用いられている 140K に到達したときの時間を表 6 に示す。スラブ厚を 150mm にした試験体(試験体 1, 2, 4, 5)はいずれも 200 分前後で許容値に到達している。スラブ厚

を 200mm にした試験体 3 は加熱中に許容値には到達しなかったが、加熱終了後も温度が上昇し、361 分で許容値に到達している。

図 11 裏面温度上昇

表 6 裏面温度許容値到達時間

試験体名	スラブ厚	許容値到達時間
試験体 1	150mm	200 分
試験体 2	150mm	212 分
試験体 3	200mm	361 分 ^{※1}
試験体 4	150mm	193 分
試験体 5	150mm	198 分

※1 270 分で加熱終了した後の温度上昇で許容値に到達

2. 4. 2 変形測定結果

両端の支持点に対する試験体中央部の鉛直方向変位(上向きの変位を正とする)を図 12 に、実験結果一覧を表 7 に示す。

図 12 試験体中央部の鉛直変位

本稿では、荷重を保持出来なくなった状態を「破壊」と定義する。前に述べたように、試験体 1～3 は加熱を終了するまで荷重を保持したため、加熱終了後載荷荷重を増加させて試験体を破壊した。図 12 は加熱開始から加熱を終了するまでの変位を示す。加熱後破壊実験の結果は表 7 に示す。また表 7 には各到達時間(加熱終了時、破壊時、試験体中央部の下向き変位最大時及び 0mm 到達時)、試験体中央部の変位(下向き最大値、加熱終了時、破壊時)及び載荷荷重として梁縁位置における曲げモーメントの値を併せて示す。試験体中央部はいずれの試験体も加熱初期に下向きの変形を生じるが、加熱が進むにつれ下向きの変形は緩やかになり途中から上向きの変形に反転している。反転後は比較的緩やかに変形が進展し、試験体 4、試験体 5 については変位が 150mm 前後に達したところで破壊した。破壊による変形の急増は特に見られず、緩やかに荷重が抜けて荷重支持能力を喪失した。試験体 2 は 150mm を越える大変形を生じたが破壊

表 7 実験結果の一覧

試験体名	時間(分)				試験体中央部変位(mm)			載荷荷重			
	加熱終了	破壊時間	下向き変位ピーク時	0mm到達時	下向き変位の最大値	加熱終了時	破壊時 ^{※1}	載荷加熱時		加熱後破壊時 ^{※2}	
								(kN・m)	荷重比 M/Mu	(kN・m)	荷重比 M/Mu
試験体1	332	—	184	—	-43.8	-2.9	(134.2)	10.8	0.45	23.9	0.99
試験体2	315	—	74	204	-20.3	157.6	(167.8)	20.9	0.87	22.1	0.92
試験体3	270	—	169	—	-25.7	-18.2	(171.6)	30.2	0.87	46.5	1.32
試験体4	245	245	67	134	-15.9	147.7		37.6	0.87	—	—
試験体5	218	218	26	43	-7.3	160.9		42.8	0.99	—	—

※1 ()は加熱中に破壊せず、加熱後破壊実験を行った試験体の破壊時変位を表す

※2 加熱終了後に荷重を増加させて破壊した時の荷重

には至らなかった。試験体 1 は 332 分、試験体 3 は 270 分まで加熱を続けたが、破壊に至らず変位も 0mm を下回っていた。

いずれの試験体も 3 時間を超える長時間の加熱に対して荷重を保持することができている。特に、試験体 2～5 は構造設計上の最大荷重（荷重比 0.66）を上回る高い荷重に対して荷重支持能力を保持しており、RCスラブは負曲げモーメントに対して極めて高い耐火性能を有していることが明らかになった。

2.4.3 載荷加熱実験に対する考察

試験体中央部の加熱初期における下向きの変形は、断面内における加熱面側と非加熱面側の温度差により生じたものと思われる。加熱が進み、下端主筋の剛性が低下するにつれ下端主筋の熱膨張力は小さくなり、上端主筋に生じる引張力を下回ることによって変形が上向きに転じたものと推察される。

実験パラメーターに設定した荷重比、配筋、スラブ厚の影響について所見を述べる。荷重比の影響を見るためスラブ厚と配筋を同じとし荷重比を変えた試験体 1 と試験体 2 及び試験体 4 と試験体 5 を比較する。変形の進展は荷重比が大きい試験体ほど早い。一方、下向きの最大変形量は、荷重比が大きい試験体ほど小さくなる傾向が見られた。

配筋の影響を見るためスラブ厚、荷重比及び下端主筋配筋を同じとし、上端主筋の配筋を変えた試験体 2 と試験体 4 を比較すると、上端主筋量の多い試験体 4 の方が変形の進展が早い。いずれの試験体も(1)式に従い常温時に上端主筋に生じる引張応力度が等しくなるよう載荷荷重を設定しているため、上端主筋に対する条件は等しい。一方、作用曲げモーメントについては上端主筋量が多い試験体 4 の方が大きくなるため、下側コンクリートの負担圧縮力が大きくなり、コンクリートの劣化が早く生じたものと思われる。

スラブ厚の影響を見るため主筋配筋と荷重比を同じとし、スラブ厚を変えた試験体 2 と試験体 3 を比較すると、スラブ厚が大きい試験体 3 の方が変形の進展が緩やかである。試験体 2 に比べ試験体 3 は作用曲げモーメントが大きいため、下側コンクリートの負担圧縮力が大きくなる。一方、スラブ厚が大きくなることで圧縮力を負担するコンクリートの厚みが増えるため、熱劣化の影響は緩和される。後者の影響が勝るため、変形性能が向上したものと思われる。

2.4.4 加熱後破壊実験に対する考察

加熱後破壊実験を行った試験体 1～3 の結果について所見を述べる。試験体 1 は 332 分の加熱で破壊に至らなかったため、加熱終了後載荷荷重を増加させたところ、載荷荷重が荷重比で 0.99 に達したところで破壊に至った。試験体 2 は 315 分の加熱で変位が 157mm まで達したが破壊しなかったため、加熱を終了し、載荷荷重を増加させた

ところ、変位を約 10mm、載荷荷重を荷重比で 0.87 から 0.92 に僅かに増加させたところでそれ以上荷重が上がりなくなり破壊した。試験体 2 は加熱中に破壊に至らなかったが、加熱終了時にほぼ破壊状態にあったものと推察される。試験体 3 は 270 分で加熱を終了した後、載荷荷重を増加させたところ荷重比で 1.32 に達したところで破壊に至った。スラブ厚 150mm の試験体 1 と試験体 2 は(1)式で求まる常温時の終局曲げ耐力を若干下回る荷重で破壊に至っているが、スラブ厚 200mm の試験体 3 は、破壊時荷重が(1)式で求まる常温時の終局曲げ耐力を大きく上回っている。この理由として、塑性変形後のひずみ硬化による上端主筋の強度上昇が考えられる。また、2.4.5 に後述するヒンジ発生位置が影響した可能性も考えられる。

2.4.5 試験体の破壊状況

試験体の破壊状況を写真 1 に示す。ヒンジ位置が材端部（梁縁位置）から少し外れたところに形成されていることがわかる。ヒンジが形成された位置は試験体により異なるが、加熱により大変形に達した試験体 2、試験

写真 1 試験体の破壊状況

体4、試験体5はヒンジ位置がより外側に形成されている。ヒンジ位置が材端部より外側に形成された理由として、図5～8のコンクリート温度が示すように支持梁の影響で加熱部に比べ材端部付近のスラブ温度が若干低くなったことが考えられる。ヒンジ位置がずれたことでせん断スパンが短くなり、破壊位置における荷重比は、表1に示す値よりも小さくなっている可能性がある。実験試験体の耐火性能を評価する際には、この点を考慮する必要があるものと思われる。スラブ上面の一例として試験体2と試験体3の破壊状況を写真2に示す。写真中の試験体番号は、この論文の試験体番号とは一致していない。ひび割れ位置は梁縁位置から若干外側に形成されており、他の試験体でも同様の傾向が見られた。試験体下面については、顕著なひび割れ、圧壊等の破壊現象は特に見られなかった。

写真2 試験体の破壊状況(上面の亀裂状況)

3. 数値解析

3. 1 解析の目的

荷重比、主筋配筋及びスラブ厚は負曲げモーメントを受けるRCスラブの耐火性能に大きく影響することが実験により示された。本節では各因子の影響を定量的に把握し、負曲げモーメントを受けるRCスラブが破壊に至る挙動を詳細に検討するため、数値解析による検討を行った。3.3節で実験との比較検討を行い、解析手法の妥当性を確認した上で、3.4節で解析により得られた内部応力度の推移から破壊に至る挙動について考察した。3.5節では、荷重比、主筋配筋、スラブ厚によるパラメータスタディを行い、これらの因子が火災時の変形挙動と火災時耐力に与える影響について検討した。

3. 2 解析手法及び解析モデル

材料の非線形性を考慮した熱弾塑性解析手法を用いて数値解析を行った。解析手法には文献1で正曲げモーメントを受けるRCスラブの解析に用いた方法を採用した。解析手法の概要は文献7)、8)に示されている。2章に示す載荷加熱実験を図13でモデル化した。中央の支持梁は加熱を受けても強度、剛性とも保持されるものと仮定して梁部分を除き、加力点の両側に長さ1200mmのRC片持ちスラブが接合するモデルとした。RCスラブの材軸方向を16の小部材に要素分割し、さらにその断面を図14に示すメッシュ状のスライス断面でモデル化した。スライス内の温度は微小時間内では均一と仮定した。図14の黒色に塗りつぶした部分は鉄筋を表す。鉄筋はD13と断面積が等価な角形断面(1.27cm²)とし、鉄筋芯が試験体と同じ位置(スラブ端から37mm)となるようにモデル化した。断面内の温度分布には実験結果を用いた。高さ10mm間隔で測定した結果を直線補間して、断面内部の温度分布を設定した。なお、2章で示したように実験試験体は、スラブ端部より僅かに外れたところでヒンジが形成されており、ヒンジ位置のコンクリート内部温度は、図2に示す温度測定位置②よりも温度測定位置①に近いものと思われる。解析を単純化する意味も含めスラブの内部温度分布には測定位置①における

図13 解析モデル

※1 試験体4、5は9-D13 ※2 試験体3は200mm

図14 材軸方向に分割した各要素のスライス断面

図15 解析用コンクリート内部温度モデル(スラブ厚150mm)

図16 解析用コンクリート内部温度モデル(スラブ厚200mm)

温度を採用し、スラブ厚150mmについては図5、スラブ厚200mmについては図7の測定結果を用いた。試験体1(スラブ厚150mm)は332分、試験体3(スラブ厚200mm)は270分で加熱を終了したため、上記加熱時間を超える範囲については、加熱中の測定温度を対数関数で回帰した近似曲線により、コンクリート内部温度を推定した。解析用のコンクリート内部温度モデルを図15(スラブ厚150mm)と図16(スラブ厚200mm)に示す。本解析では、コンクリート要素に過渡ひずみを考慮し、Anderbergらのモデル($k=2.35$)⁹⁾を採用した。主筋の応力-ひずみ関係については、主筋(SD295A)の高温引張試験結果から作成した文献1に示すモデルを採用した。コンクリートと主筋の線膨張係数及びコンクリートの応力-ひずみ関係についてはEurocode4¹⁰⁾に示された関係式を用いた。

3. 3 解析結果

試験体1～5に対する解析結果と実験結果の比較を図17～図21に示す。図中の▲印は解析の破壊時を示す。解析値は実験値と全体的な挙動に関して概ね一致している。加熱の途中から解析は実験に比べ変形が早く進展する傾向が見られた。また、解析は実験に比べ早

期に破壊に至っており耐火性能を低めに評価する傾向が見られた。
この理由として実験試験体は、ヒンジ位置が梁縁位置から少し外れたところに形成されたことで、せん断スパンが若干短くなっていた

図 17 解析結果と実験結果の比較(試験体 1)

図 18 解析結果と実験結果の比較(試験体 2)

図 19 解析結果と実験結果の比較(試験体 3)

図 20 解析結果と実験結果の比較(試験体 4)

図 21 解析結果と実験結果の比較(試験体 5)

ことが可能性として考えられる。

3. 4 破壊挙動の考察

解析で得られた内部応力度分布の推移から負曲げモーメントを受ける RC スラブが加熱によって破壊に至る挙動について検討する。ここでは、荷重比を同じとし主筋配筋とスラブ厚を変化させた試験体 2、試験体 3、試験体 4 の結果から考察を行う。各試験体の内部応力度分布の推移を図 22～24 に示す。下側コンクリートの圧縮応力度の推移に着目し、コンクリートの圧縮応力度を拡大表示する。主筋の応力度は図中に数値で示す。また、応力中心間距離 j の値を図中に示す。いずれの試験体も下面からの加熱によりコンクリート強度が低下することで、圧縮側コンクリートの応力度分布は、逆くの字形の山型分布を形成する。加熱の経過に伴い山形分布は徐々に上側に移動する。これに伴い応力中心間距離が短くなり、上端主筋とコンクリートに生じる応力度が徐々に大きくなる。そして、上端主筋に生じる引張応力度が強度に達したところで破壊に至っている。破壊時の主筋応力度は常温の降伏強度である 372N/mm^2 を上回っているがこれは、塑性変形後のひずみ硬化によるものである。今回の解析で採用した主筋の応力-ひずみ関係¹⁾では、高温引張試験に基づき塑性変形後のひずみ硬化を考慮したモデルとしている。

上端主筋の配筋を変えた試験体 2 と試験体 4 を比較すると、試験体 4 は試験体 2 に比べコンクリートに生じる圧縮応力度が大きいため、山型分布が上側へ移動することによる上端主筋の引張応力度の上昇が早まり、試験体 2 に比べ 90 分程早く強度に達して破壊している。引張鉄筋比が釣合い鉄筋比以下の場合、常温の設計では(1)式等に従い主筋に生じる引張応力度の大きさを構造性能を評価することが一般的であるが、火災時はコンクリートに生じる圧縮応力度の大きさが耐火性能に大きく影響するため、火災時の設計では、主筋に生じる引張応力度だけでなく、コンクリートに生じる圧縮応力度の大きさも適切に考慮する必要があるといえる。

スラブ厚を変えた試験体 2 と試験体 3 を比較すると、コンクリートに生じる圧縮応力度の最大値はほぼ同じである。また、圧縮応力度の山形分布が上側に移動する速度についても大きな違いは見られない。しかし、スラブ厚が大きくなることで、山形分布が上側に移動することによる主筋の引張応力度の上昇が緩やかになっていることがわかる。応力中心間距離に着目すると、試験体 2 は常温時から 32mm 短くなったところで破壊しているのに対し、試験体 3 は 58mm 短くなったところで破壊している。スラブ厚が大きくなるとそれに比例して山形分布が破壊位置に移動するまでの距離も長くなるが、山形分布が上側に移動する速度はあまり変わらないため、破壊までに要する加熱時間は長くなる。このため、主筋配筋と荷重比が同じ場合は、スラブ厚が大きくなるほど耐火時間は長くなる。なお、スラブ厚が 200mm までの範囲においてはこの傾向が実験でも確認されているが、スラブ厚がさらに大きくなるとコンクリートの圧壊等で破壊が早期に生じる可能性もあり、この傾向が必ずしも得られるとは言い切れない。この点については実験等による検証が必要であり、今後の課題としたい。

次に上端主筋に着目すると、いずれの試験体も破壊時に高い強度を保持しており、加熱による強度低下を生じていない。図 9 に示すように上端主筋の温度上昇は緩やかであり、上端主筋の強度低下が負曲げ耐力に与える影響は極めて小さいことを確認した。

図 22 応力度分布の経時変化(試験体 2)

図 23 応力度分布の経時変化(試験体 3)

図 24 応力度分布の経時変化(試験体 4)

3. 5 パラメータスタディ

荷重比、主筋配筋、スラブ厚が火災時の変形挙動及び火災時耐力に与える影響を定量的に把握するため、パラメータスタディを行った。解析ケースを表 8 に示す。

表 8 解析パラメーター

シリーズ	No.	スラブ厚 (mm)	上端筋	下端筋	荷重比 M/Mu	備考
1	1-1	150	D13@200	D13@200	0.45	試験体1
	1-2				0.68	
	1-3				0.87	試験体2
2	2-1	150	D13@100	D13@200	0.45	
	2-2				0.68	
	2-3				0.87	試験体4
3	3-1	200	D13@200	D13@200	0.45	
	3-2				0.68	
	3-3				0.87	試験体3
4	4-1	150	D13@200	—	0.45	
	4-2				0.68	
	4-3				0.87	

スラブ厚 150mm、上下端主筋 D13@200 のシリーズ 1 を標準とし、これと異なるパラメーターをハッチで表示する。シリーズ 2 は上端主筋を D13@100、シリーズ 3 はスラブ厚を 200mm にしている。なお、試験体 1 は No. 1-1 に、試験体 2 は No. 1-3 に、試験体 3 は No. 3-3 に、

試験体 4 は No. 2-3 に相当する。シリーズ 4 は圧縮側主筋の影響を検討するため下端側主筋を省略している。解析結果を図 25～28 に示す。

図 25 解析結果(パラメータスタディ シリーズ 1)

図 26 解析結果(パラメータスタディ シリーズ 2)

図 27 解析結果(パラメータスタディ シリーズ 3)

図 28 解析結果(パラメータスタディ シリーズ 4)

表 9 荷重比と耐火時間の関係

荷重比 M/Mu	耐火時間(分)			
	シリーズ1	シリーズ2	シリーズ3※1	シリーズ4
0.45	459	366	—	426
0.68	330	240	—	303
0.87	264	171	579	231

※1 M/Mu=0.45及び0.68は600分の加熱で破壊せず

図 29 荷重比と耐火時間の関係(1)

図 30 荷重比と耐火時間の関係(2)

解析では最大 600 分まで加熱を与えた。シリーズ 3 で荷重比を 0.45 及び 0.68 としたモデルについては、600 分の加熱で破壊に至らなかったため、600 分までの結果を示す。加熱により試験体が破壊した時

間(耐火時間)と荷重比(M/Mu)の関係を表 9 及び図 29、図 30 に示す。図 29 はシリーズ 1、2、3 の比較を、図 30 はシリーズ 1 とシリーズ 4 の比較を示す。荷重比が大きくなると耐火時間は短くなる関係にあり、若干下側に凸となる曲線を描いている。参考までに両者の関係を 2 次の多項式で回帰した結果を図中に示す。近似式は以下の式で表される。

$$M/M_u = A + B \times t + C \times t^2 \quad (2) \text{式}$$

ここに、M/Mu : 荷重比

M : 作用曲げモーメント

Mu : (1)式で求まる常温時の終局曲げ耐力

t : 耐火時間(分)

A, B, C : 係数(表 10 に示す)

表 10 回帰式の係数

	シリーズ 1	シリーズ 2	シリーズ 4
係数 A	2.120	1.536	1.756
係数 B	-6.217×10^{-3}	-4.710×10^{-3}	-4.745×10^{-3}
係数 C	5.620×10^{-6}	4.760×10^{-6}	3.943×10^{-6}

この近似式でシリーズ 1, 2, 4 の火災時耐力(破壊時の作用曲げモーメント)を概ね予測することが可能である。実験との比較で述べたように、解析は実験に比べ耐火性能を低めに評価する傾向があり、(2)式で求まる耐力は、実際よりも低めの値を取るものと思われる。

シリーズ 1, 2, 3 を比較した結果(図 29)を見ると、上端主筋を D13@100 としたシリーズ 2 は、D13@200 としたシリーズ 1 に比べ同じ荷重比に対して 90 分程度耐火時間が短くなっている。一方、スラブ厚を 200mm にしたシリーズ 3 は、破壊に至ったのが荷重比を 0.87 とした 1 ケースのみであるが、この 1 ケースについて比較すると、スラブ厚が 150mm のシリーズ 1 に比べ耐火時間が 315 分長くなっている。下端主筋(圧縮側主筋)を有するシリーズ 1 は、下端主筋を省略したシリーズ 4 に比べ、同じ荷重比に対して耐火時間が 30 分程長くなっている(図 30)。この理由として、下端主筋を有するシリーズ 1 は下端主筋が圧縮力の一部を負担することで、下端主筋の無いシリーズ 4 に比べ応力中心間距離が長くなったためと考えられる。しかし、加熱による強度低下で破壊時における下端主筋の圧縮応力度は常温強度の 2 割程度しかなく(図 22)、耐力への寄与率はあまり大きくはない。下端主筋は負曲げモーメントを受ける RC スラブの耐火性能に少なからず影響し、耐火時間を長くする効果があることを確認した。

4. まとめ

負曲げモーメントを受ける RC スラブの耐火性能を実験と解析により検討した結果、以下の結論が得られた。

- ① 実験の結果、RC スラブは負曲げモーメントに対して高い耐火性能を有していることが明らかになった。構造設計上の最大荷重を上回る高い荷重を受けた状態でも長時間にわたり荷重を保持することが可能である。
- ② 主筋配筋とスラブ厚は負曲げモーメントを受ける RC スラブの耐火性能に大きく影響することを確認した。
- ③ 数値解析を行った結果、解析値は実験値と良好な対応を示した。

解析により負曲げモーメントを受けるRCスラブの耐火性能を評価できることを確認した。

- ④ 解析により得られた応力度分布の推移から負曲げモーメントを受けるRCスラブが火災加熱で破壊に至る挙動を明らかにした。
- ⑤ 荷重比（常温時の終局曲げ耐力に対する作用曲げモーメントの比）とスラブ厚が同じ場合、上端主筋量が多くなる程、耐火時間が短くなることを確認した。
- ⑥ スラブ厚が 200mm 以下の範囲では、荷重比と主筋配筋が同じ場合、スラブ厚が大きくなる程、耐火時間が長くなることを確認した。
- ⑦ 上端主筋の温度上昇は緩やかであり、上端主筋（引張側主筋）の強度低下が負曲げモーメントを受けるRCスラブの火災時耐力に及ぼす影響は小さいことを確認した。
- ⑧ 解析によるパラメータスタディを行い、主筋配筋とスラブ厚が耐火性能に与える影響を確認するとともに、荷重比と耐火時間の関係を明らかにした。
- ⑨ 下端主筋は耐火性能に影響し、耐火時間を長くする効果があることを確認した。

本論文で報告した検討は、両端を拘束されることで発生する拘束曲げモーメントの影響を考慮していない。現在、両端拘束モデルに対する実験及び解析による研究を行っているところであり、その結果については報を改めて報告する予定である。

冒頭で述べたように、本研究は実務設計で利用可能な火災耐力評価法の提案を目標としている。本論文では、数値解析によって負曲げモーメントを受けるRCスラブの火災時耐力を評価出来ることを示した。しかし、数値解析による評価は煩雑であり、実務の設計で逐一行うことは難しい。現在、本論で得られた知見を基に、実務設計で汎用的に利用出来る火災耐力評価法の研究を行っているところであり、その結果についても報を改めて報告する予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、東京理科大学 COE 火災科学コースにおいて、若松孝旺教授、上杉英樹教授、鈴木弘之教授、衣笠秀行教授、古平章夫氏、池田憲一氏から貴重なアドバイスを戴きました。ここに記して謝辞を表します。

参考文献

- 1) 西村俊彦, 上原茂男:RCスラブが正曲げモーメントを受ける場合の耐火性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第73巻 第626号, pp.677-684, 2008.4
- 2) 西村俊彦, 上原茂男:RCスラブの耐火性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.77-78, 2007.8
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課ほか:2001年版耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説, 井上書院, 2001.3
- 4) 原田有:建築耐火構法, 工業調査会, 1973
- 5) 斎藤光:材端拘束鉄筋コンクリート部材の火災時の性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.761-762, 1968.10
- 6) Hikaru Saito:Behavior of End Restrained Concrete Member in Fire, B.R.I Reserch Paper, No.32, 1968
- 7) H.Saito, H.Uesugi, M.Yamaguchi, A.Kodaira :Thermal Stress and Deformation of Steel Structures of High Rise Buildings in Fire”, FIRE SAFETY SCIENCE Proceedings of The Second International Symposium, pp.719-728, 1988
- 8) H.Ohashi and A.Kodaira:Calculation of Load and Deformation Behavior of Structure Elements Taking into Account 3-Dimensional Heat Flow, FIRE SAFETY SCIENCE Proceedings of The Fifth International Symposium, pp.1021-1032, 1997
- 9) Anderberg, Y. and Thelandersson, S.:Stress and Deformation Characteristics of Concrete at high Temperatures, 2. Experimental Investigation and Material Behavior Model, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology , Bulletin No.54, Lund, Sweden, 1976
- 10) EUROCODE4, Design of Composite Steel and Concrete Structure, Draft for Part1.2:Structural Fire Design, CEN/TC250/SC4 N56 prENV 1994-1-2

(2008年9月9日原稿受理, 2009年1月29日採用決定)