

東京理科大学「火災安全科学研究拠点」 研究成果概要報告書

研究課題		デッキ合成スラブの遮熱性に関する実験的研究	実施年度 2022年度
研究代表者	所属	東京都市大学 建築都市デザイン学部建築学科 准教授 博士（工学）	
	氏名	焦 瑜（ジャオ ユ）	
	問合せ先メールアドレス	jiao@tcu.ac.jp	
共同研究者	氏名・所属・職	石丸 亮・日鉄建材株式会社・建築技術部長 関 勝輝・JFE 建材株式会社・建築技術開発室長 伊藤 善三・明治鋼業株式会社・設計技術部長 佐藤 駿・株式会社アイテック・設計技術室 竹田 達・日鉄建材株式会社・建築技術部	
受入担当責任者	氏名	河野 守	

1. 研究の背景および目的

鋼構造建築物において、軽量かつ施工も効率的なデッキ合成スラブは、近年床及び屋根構造などとして広く用いられている。これまで耐火試験により性能が確認された大臣認定仕様（1時間耐火構造の床、2時間耐火構造の床など）を用いて、主として仕様による法適合によって建築物に適用されてきた（ルートA）。一方、超高層建築物を中心に合理的耐火設計を行うため、建築物の耐火性能を検証法（国土交通法施行令・告示に規定された耐火性能検証法）により確認することで耐火建築物の要件を満たす設計方法も普及している（ルートB、C）。現状では、デッキ合成スラブ床はその構造上および耐火上の特徴を捉えた耐火性能の検討手法が開発の途上であり、耐火性能検証法（案）は存在するものの、その検証精度等にまだ不明確な点を残している。鋼構造建築物の耐火性能をより合理的に実現するために、デッキ合成スラブ床の耐火性能検証法を確立することが喫緊の課題である。

本研究の目的は、デッキ合成スラブの遮熱性能を実大実験および解析により確認し、デッキ合成スラブの耐火性能検証法（案）に提示されている遮熱性保有耐火時間設計式の精度向上を図ることである。

デッキ合成スラブの耐火可能性を調査するために、標準的な耐火試験が一般的に使用され、前述の通り多数の耐火試験が実施されてきた。しかしながら、現在公開された利用可能な温度分布に関する実験データには、床スラブの形状や加熱時間の制限がある。そのため、本研究では ISO 834 標準加熱曲線に曝された異なる形状の 6 つの合成スラブの熱応答に関する実験を行った。さらに、得られた実験結果との整合性を検証した数値解析モデル（有限要素モデル）による熱解析を実施した。

2. 利用施設及び利用日

- ・ 多目的水平載荷加熱試験装置 (2022年12月5日～12月7日)

3. 実験方法・研究成果、および考察 (申請時の計画に対する達成度合いも含む)

※継続課題の場合は、前年度との関係性、進展度合いについても記載すること。

3.1 実験概要

3.1.1 試験体

試験体は、デッキ山高さが 50 mm または 75 mm の 2 種類、デッキ山上コンクリート厚さが 60 mm、80 mm、100 mm の 3 種類を組み合わせた 6 つの異なる断面形状をもつ合成スラブユニットを一体として組み上げた床スラブとして製作した。各合成スラブユニットは、デッキ山高さ、デッキ山上コンクリート厚さを用いて H50-60、H50-80、H50-100、H75-60、H75-80、H75-100 と表現している。合成スラブユニットは、いずれも長さ 1.2 m、幅 1.2 m の平面形状であり、厚さ 1.2 mm の鋼板デッキを用いている。また、コンクリートは $F_c=21$ MPa の普通コンクリートとした (4 週圧縮強度の平均値は 22.4 MPa)。各合成スラブユニットの詳細な寸法を、Figure 1 と Table 1 に示す。

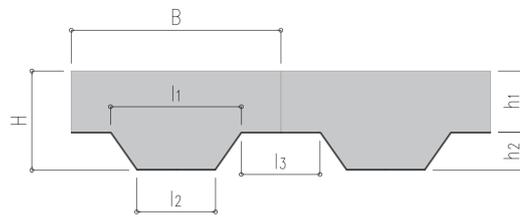


Figure 1 Slab geometry indicators

Table 1 Slabs geometry (unit: mm)

Slab name	B	h_1	l_1	l_2	h_2
H50-60	300	60	170	125	50
H50-80	300	80	170	125	50
H50-100	300	100	170	125	50
H75-60	300	60	175	120	75
H75-80	300	80	175	120	75
H75-100	300	100	175	120	75

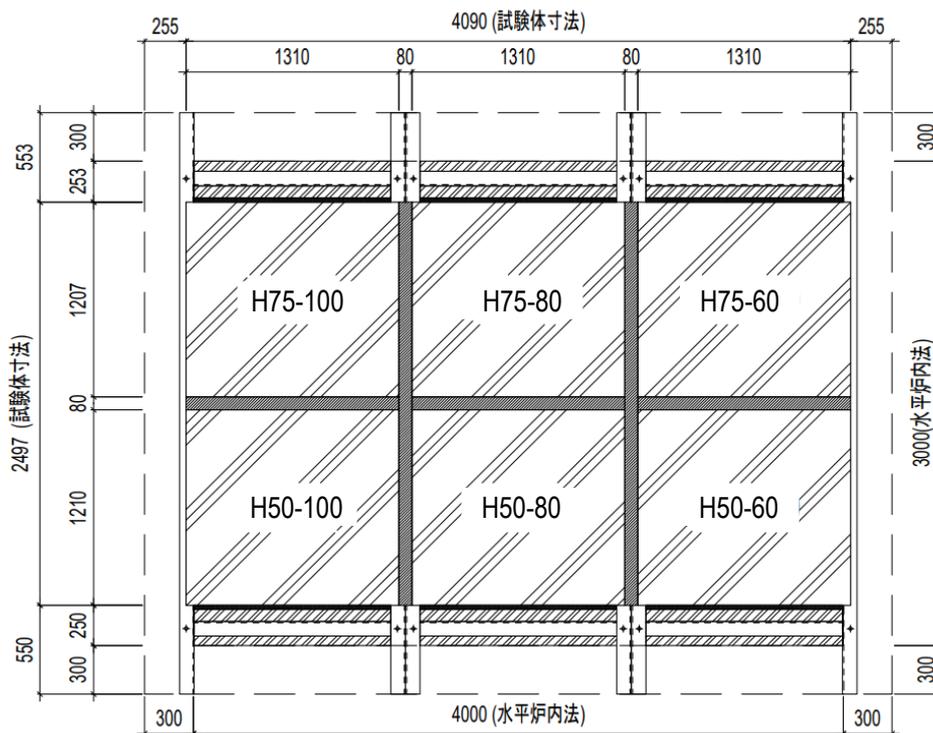


Figure 2 Specimen's assembly

6つの合成スラブユニットは互いに隣接して配置され、繊維強化けい酸カルシウム板およびアルカリアースシリケート (AES) ウールブランケット (以下、AES ブランケット) で熱的に保護された鋼製フレームの上に設置した。また、合成スラブユニット間は AES ブランケットで熱的に絶縁した。試験体全体図を Figure2 に示す。

3.1.2 実験方法

試験条件は非荷重加熱とした。加熱は、ISO 834 標準加熱曲線[1]に従った。加熱時間は、裏面温度が規準 (平均温度上昇 140 K、最高温度上昇 180 K) を超過するまで行った。加熱終了時間は 210 分である。ただし、この時間は合成スラブユニット毎に異なるため、早期に規準を超過した合成スラブユニットについては、裏面温度が高温となり実験・計測装置に損傷を与える可能性があるため、加熱の途中で裏面を AES ブランケットにて保護した。

合成スラブ内部の断面の温度分布を測定するために、合成スラブ内部に計 42 個の熱電対を配置した。各合成スラブユニットには、Figure 3 に示すように、溝部に 4 つ、山部に 3 つ合計 7 つの熱電対を配置した。最下部はデッキプレートとコンクリートの界面のコンクリート側、最上部はコンクリートスラブの上面である。平面的には合成スラブユニットの概ね中央付近で、合成スラブ厚さ方向には鉛直に直線上に熱電対を配置した。

3.1.3 スラブ内温度の分布 (実験)

Figure 5 に実験で計測された合成スラブユニットの温度推移 (一部抜粋) を示す。図中の実線が実験による計測値である。なお、破線は後述の数値解析結果である。

3.2 数値解析

数値解析には汎用有限要素コード Abaqus [2]を用いた。Figure 4 は、デッキ合成スラブの断面に対して解析にて考慮した熱的パラメータを示したものである。解析モデルは 2 次元モデルとし、溝部と左右の半幅の山部で構成されており、左右は断熱境界とした。炉内側の合成スラブの底面では、対流（対流熱伝達率 $h_c=25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ）と放射（放射率 $\varepsilon=0.60$ ）による熱伝達を考慮した。合成スラブの上面では、対流（対流熱伝達率 $h_c=4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ）と放射（放射率 $\varepsilon=0.90$ ）による熱伝達を考慮し、周囲温度は実験時の実験棟温度相当の 10°C とした。なお、デッキプレート内およびコンクリート内は熱伝導を考慮した。

火災初期には、デッキプレートがコンクリートスラブから剥離する[3]。この分離は床スラブ断面の温線分布に直接影響を与えると考えられるが、加熱中に剥離することをモデル化するのは非常に煩雑であるため、本研究の数値解析モデルでは厚さ 1 mm の空洞として加熱初期から加熱終了まで維持されるものとして解析した。デッキプレートとコンクリートスラブは、それぞれ DC2D4 要素（2次元、4節点の四辺形熱伝達要素）を使用してモデル化した。

メッシュサイズについては予備解析を行い、要素のサイズはおよそ $10\times 10\times 10 \text{ mm}$ で安定した解が得られることを確認した。コンクリートの含水率の実測値は約 4%であったので解析にもこの数値を用いた。含水率が 4%のコンクリートの比熱は、Eurocode 4 [4]の 3%と 10%の含水率に対する数値から補間した。コンクリートと鋼の他の熱的特性値（熱伝導率、密度）は、Eurocode 4 の値を用いた。この数値解析モデルでは、簡略化のために鉄筋はモデル化していない。

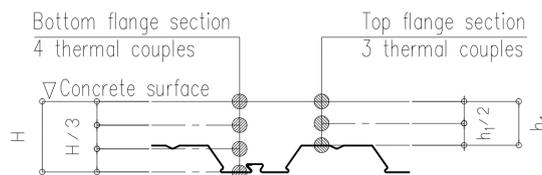


Figure 3 Thermocouples location

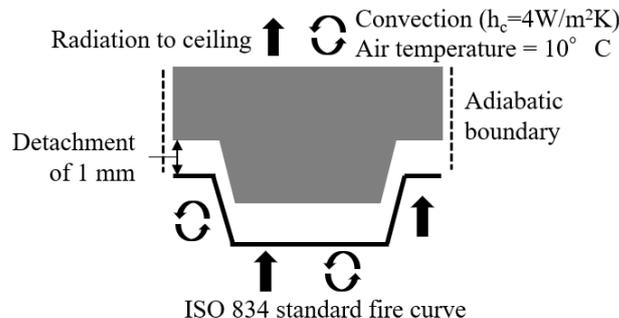
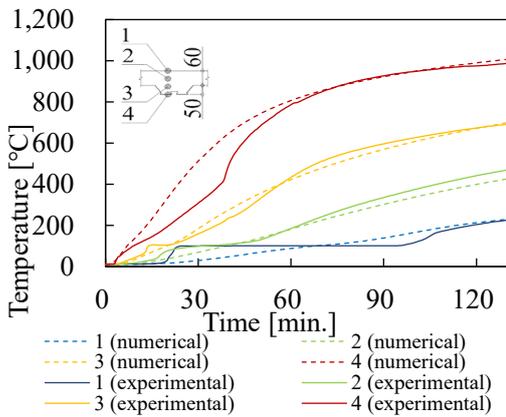
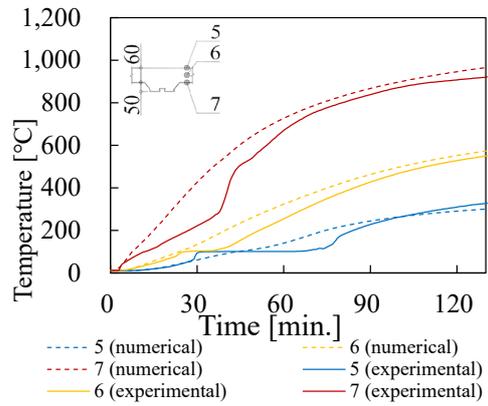


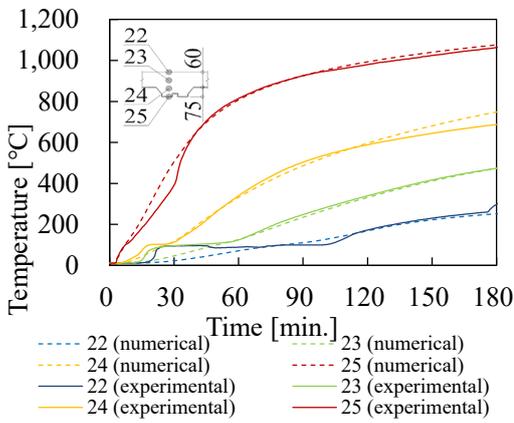
Figure 4 Cross section thermal boundary



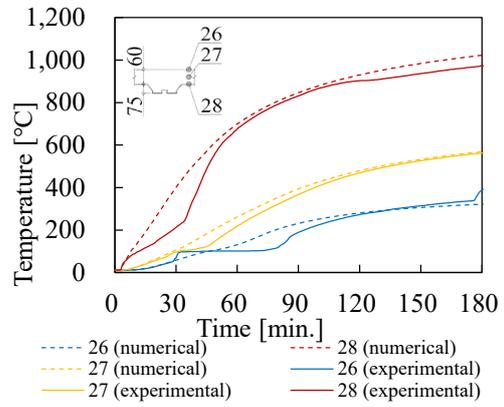
a) H50-60
(Bottom flange section)



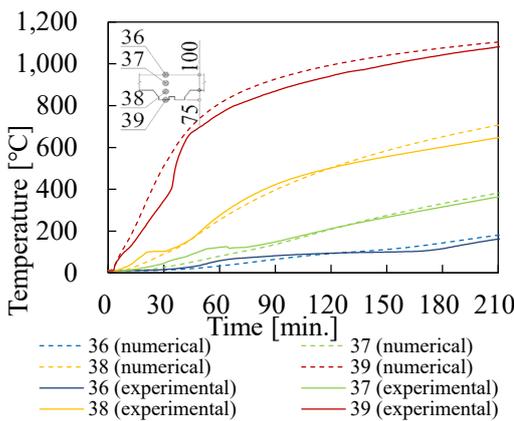
b) H50-60
(Top flange section)



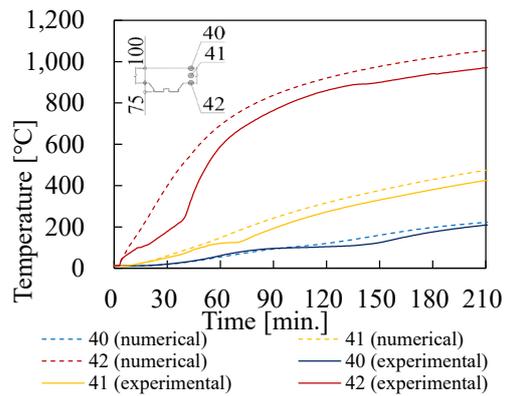
c) H75-60
(Bottom flange section)



d) H75-60
(Top flange section)



e) H75-100
(Bottom flange section)



f) H75-100
(Top flange section)

Figure 5 Experimental and numerical data

Figure 5 に数値解析結果の合成スラブ内温度の推移を示す。図中の破線が本節で説明した数値解析モデルによる解析結果である。なお、実線は実験で計測された温度である。

3.3 実験結果と解析結果についての考察

合成スラブ内温度推移の実験計測結果と数値解析結果を比較した Figure 5 において、いずれの合成スラブユニットについても、両方の温度が比較的良好に対応することがわかる。一方で、数値解析結果は加熱初期段階で実験の温度結果を過小評価している。これは、コンクリートスラブ内での水蒸気化や水の移動の影響がある可能性がある[5]。また、コンクリートスラブの上面に水の凝縮が現れた (Figure 6) こともこれらの不一致に寄与していると考えられる。特に、熱電対周辺の床スラブ上面に凝縮した熱水が温度計測値に影響を与えた可能性は大いにある。Figure 6 は、H50-60 の上面に熱水が存在することを示し、この写真は加熱の開始から 20 分後に撮影され、実験データと数値データが分離し始める時期と対応する。しかし、温度が上昇するにつれて、解析のデータは実験データに近づいている。

デッキプレートとコンクリートの剥離の影響を検討するために、加熱開始から終了まで剥離が起こらないものとしたモデルによる解析結果を Figure 7 示す。剥離を考慮した解析である Figure 5a および b と比較すると、デッキプレートとコンクリートスラブの剥離を無視するとコンクリートスラブの温度予測が著しく高くなることが観察される。デッキ合成スラブの裏面温度の推定には、デッキプレートとコンクリートの剥離を考慮した数値解析モデルを用いることが必須といえる。

3.4 まとめ

本研究では、ISO 834 標準加熱されたデッキ合成スラブの遮熱性能について実験的および数値的に調査した。主な結論は以下の通り。

- 本研究で提示した有限要素数値モデルにより解析した合成スラブ内温度分布の推移は、形状の異なるデッキ合成スラブの加熱実験結果と概ね良好な精度で対応することを示した。本研究で提示した数値解析モデルは、今後の合成スラブの耐火性能に関する研究に活用できる。
- デッキプレートとコンクリートスラブの剥離の重要性が、本研究で明確に示された。この要因を考慮することで、コンクリート温度の予測精度が大幅に向上する。

以上のように、本研究ではデッキ合成スラブの遮熱性に関して貴重な実測データが得られ、また有限要素解析モデルの改良もできた。これにより、申請時の計画の主要部分は達成できた。予算の関係で軽量 1 種コンクリートを用いたデッキ合成スラブについては実験できなかったが、既往の実験データと本研究で作成した有限要素解析モデルを用いた分析も可能であろう。

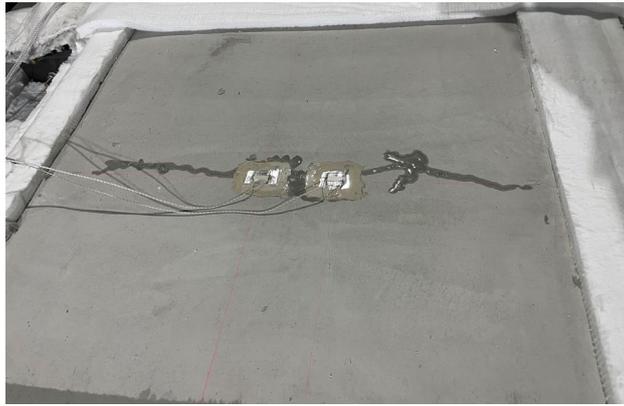


Figure 6 Water at unexposed surface of H50-60 slab

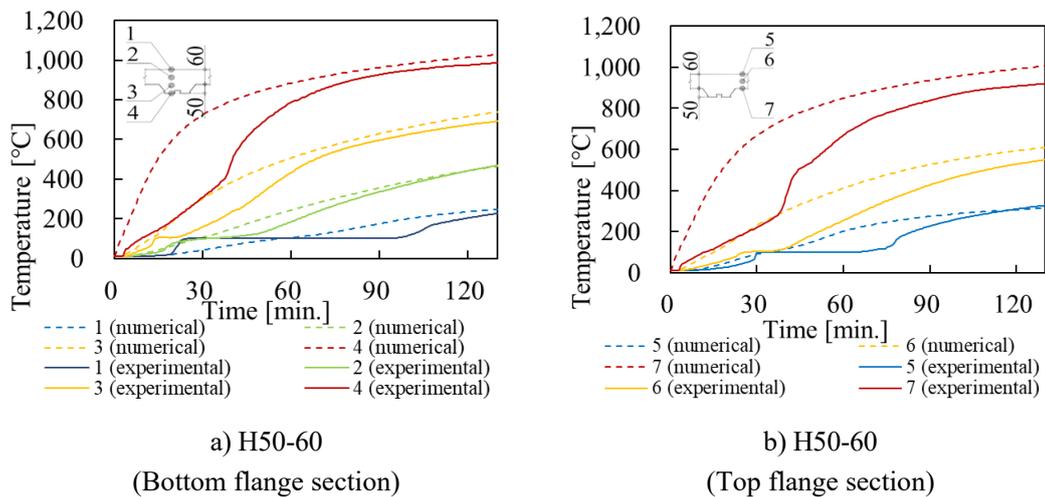


Figure 7 No detachment case

参考文献

- [1] ISO 834-8, Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction, International Organization for Standardization, Geneva, 1999.
- [2] Abaqus, Abaqus Analysis User's Guide, Simulia, 2016.
- [3] L. Lim, Membrane Action in Fire Exposed Concrete Floor Systems, Doctoral Thesis University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2003.
- [4] EN 1994-1-2 (2005): Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design.
- [5] Minh-Phuong Nguyen, Temperature profile and resistance of flat decking composite slabs in- and post-fire, Fire Safety Journal 98 (2018) 109–11, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.04.001>

4. 今後の展望（今後の発展性、見込み等についても記述）

まずは、この研究成果であるデッキ合成スラブ有限要素解析の精度・遮熱性再現レベルについて日本火災学会で発表し、本解析モデルの有効性を認知させる。更に、本解析モデルを活用し、デッキ合成スラブの耐火性能検証法（案）に提示されている遮熱性保有耐火時間設計式の精度向上を進め、日本建築学会大会等でオーソライズを図る。将来的には、告示（建設省告示第 1433 号）への追加を目指していく。これにより超高層建築物を中心とした耐火性能検証法を用いる建物にもデッキ合成スラブの適用を広めていく。

また、本研究で得られた「デッキ合成スラブ有限要素解析モデル」を発展させ、様々なパラメータでの耐火性能の把握を目指すことで、新商品・技術開発への活用に期待できる。

5. 成果の公表状況（学会への発表、学術誌への投稿等を記述。予定も含む）

- 1) チン ホアイ ドウック、焦 瑜、河野 守、石丸 亮、竹田 達、関 勝輝、伊藤 善三、佐藤 駿：標準加熱された合成スラブの温度分布に関する実験・解析、2023 年度日本火災学会研究発表会、2023.5.（発表予定）

6. 経費の使用状況

消耗品費・会議費・印刷費等		旅費		人件費	
事 項	金額(円)	事 項	金額(円)	事 項	金額(円)
試験体製作、 搬入・設置、 廃棄費用等	1,499,850				
小計	1,499,850	小計		小計	
東京理科大学 負担分 総計 1,499,850 円					

上記以外 合成スラブ工業会 負担分 総計 1,144,000 円

以上

※ページは適宜増やしてください。

※上記 5 に記載された成果公表については、別刷 1 部をご提出願います。PDF ファイル等の電子データでも構いません。

※本成果報告概要書に記載された内容は、本拠点の成果報告として Web 等で公開されることをお含み置き下さい。

※本成果報告概要書と併せて、研究報告書を提出頂いても構いません。（フォーマットは問いません。）

※後日開催予定の成果発表会で使用されるプレゼンテーション用の電子ファイルについても提出願います。