

特集 「火災に強い都市をめざして」

火災加熱を受ける鉄筋コンクリートデッキスラブのFEM解析

丹羽 博 則 長 沼 一 洋

Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deck Slab Exposed to Fire

Hironori Niwa Kazuhiro Naganuma

Abstract

This paper describes a numerical analysis methodology and analysis results for a reinforced concrete deck slab under fire conditions. The purpose of this study was to verify an analysis method and to evaluate the fire resistant performance of structural members. First, heat transfer analyses were conducted for the deck slab using the finite element method under transient conditions. These analyses demonstrated that when the latent heat effects of water in concrete are taken into account in the analysis, a reasonable good correlation is obtained between test and the analysis results. Successively, thermal stress analyses were performed for the same slab considering material nonlinearity. The results indicate that the transient strain of concrete under compressive stress needs to be considered in the analysis for a precise simulation of structural behavior, such as deflection of the slab.

概 要

耐火建築物の主要構造部は、火災時においても所定の荷重支持能力や遮熱性能を保持している必要がある。一般にこれらの性能は耐火実験により評価されるが、これを解析的に予測することが可能となれば、合理的な実験計画の策定や様々な設計条件に応じた部材の耐火性能の把握が可能になるなど、その利便性・有用性が期待される。そこで数値解析による耐火性能予測手法を確立するため、デッキスラブの加熱実験を対象に有限要素解析を実施し、解析手法の妥当性を検討した。その結果、非定常熱伝導解析では、コンクリート含有水の蒸発潜熱を考慮することで実験値を概ね十分な精度で評価できたが、より精密に評価するためにはコンクリート中の水分移動を考慮する必要があることが示唆された。また非線形熱応力解析では、圧縮応力下で加熱を受けるコンクリートに生じる過渡ひずみ成分を考慮することで、試験体のたわみ変形を精度良く評価できることが確認された。

1. はじめに

一般に、デッキプレートをを用いた耐火被覆の無い鉄筋コンクリートスラブ（以下、デッキスラブ）を耐火構造として実建物に使用するためには、二方向配筋されたスラブを除き、耐火実験に基づき所定の耐火性能を有することを確認する必要がある。デッキスラブが火災加熱にさらされると、常温時には引張応力を負担するデッキプレートが温度上昇に伴い急速に耐力を失うとともに、熱膨張等の影響によりコンクリート面から剥離するなど、その構造性能が大きく変化する。そのため、実用的な精度でデッキスラブの耐火性状を予測することが難しいことも、耐火実験に依存せざるを得ない要因の一つとなっている。

従って、デッキスラブの耐火性能、即ち非損傷性（荷重支持能力）や遮熱性を解析的に予測・評価することが可能となれば、事前解析に基づく合理的な実験計画の策定や、様々な設計条件に応じた部材の耐火性能の把握が可能になるなど、その有用性、利便性が期待される。そこで筆者らは、数値解析による耐火性能予測手法を確立するため、耐火被覆の無い一方向配筋デッキスラブの2時間耐火試験¹⁾を対象として、有限要素法（以下、FEM）による非

定常熱伝導解析および非線形熱応力解析を実施した。

本報では、上記実験結果と解析結果を比較することにより、本解析手法の妥当性について検討を行った結果を報告する。

2. 解析対象

解析対象とした床スラブ試験体は、幅2,000mm、長さ4,400mm、厚さ150mmの一方向配筋されたデッキスラブ¹⁾である。デッキスラブ試験体の概要をFig. 1に示す。試験体のコンクリート強度は、設計基準強度 $F_c 21\text{N/mm}^2$ （普通コンクリート）であり、一方向配筋された下端鉄筋にはD13（SD295）、上端筋（ひび割れ拡大防止筋）には溶接金網φ6-150×150mm、デッキプレートには溶融亜鉛メッキ鋼板（厚1.0mm）が使用されている。本デッキスラブの特徴は、デッキプレートの強辺方向に配されたリブをデッキ上面に向けてスラブ内に埋設することにより、スラブ下面をフラットとして意匠性の向上や天井作業の施工性向上、天井高さの確保などが図られている点にある。

耐火試験（非載荷加熱実験）では、上記のデッキスラブ試験体を支点間距離4mで単純支持した状態で、スラブの

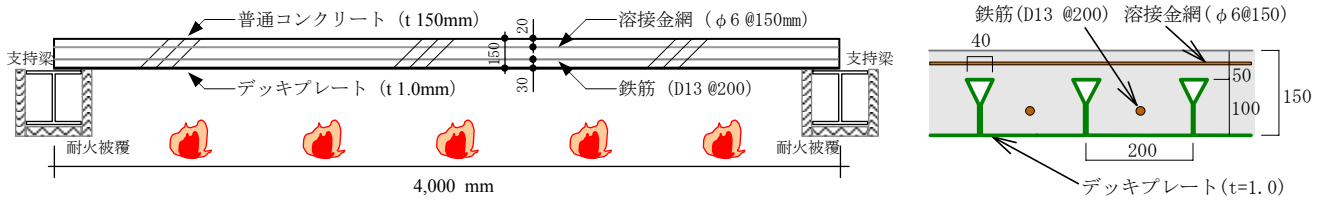


Fig. 1 デッキスラブ試験体の概要 (断面図)
Configuration of Slab Specimen (Cross Section)

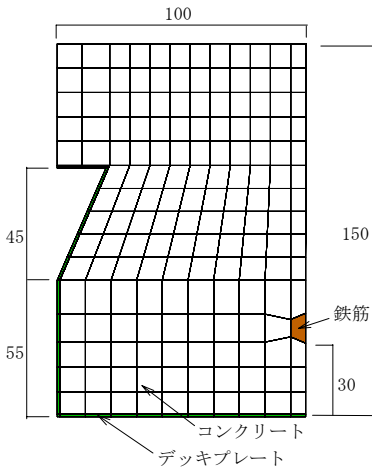


Fig. 2 熱伝導解析モデル
Finite Element Mesh
for Heat Transfer Analysis

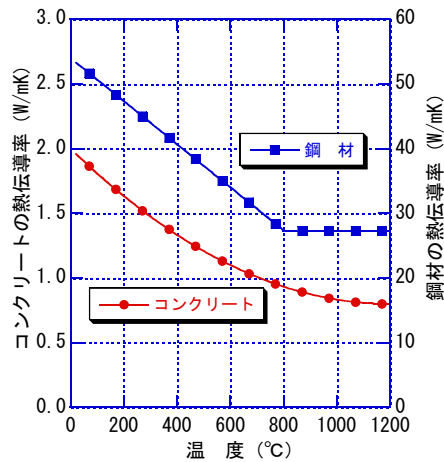


Fig. 3 コンクリートと鋼材の熱伝導率²⁾
Thermal Conductivity of
Concrete and Steel

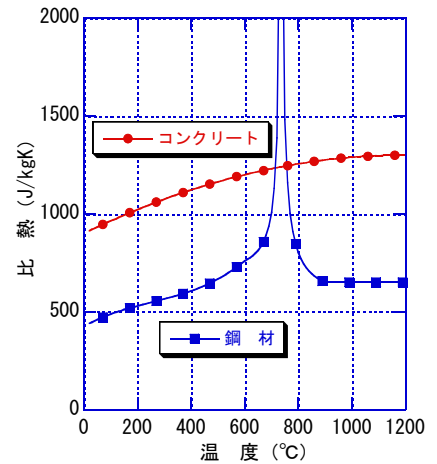


Fig. 4 コンクリートと鋼材の比熱²⁾
Specific Heat of
Concrete and Steel

下面側より標準加熱温度曲線に従った2時間加熱を与え、鉄筋温度やスラブ裏面温度、スパン中央部のたわみ量等を測定している。

3. 熱伝導解析

3.1 解析モデル

熱伝導解析では、デッキスラブのスパン方向における温度分布は一樣であるものと仮定し、断面の規則性を利用して、弱辺方向の基本断面を二次元でモデル化した。熱伝導解析モデルをFig. 2 に示す。コンクリート・鉄筋・デッキプレートはいずれも4節点平面要素でモデル化し、溶接金網はスラブ内の温度分布に与える影響が小さいと考えられることから、熱伝導解析モデルでは無視した。

3.2 熱伝導解析手法

熱伝導解析には、大林組の自社開発FEM解析プログラム「FINAL[®]」を使用した。同プログラムでは、熱伝導解析から熱応力解析を一貫して行うことが可能であり、コンクリートと鋼材の熱伝導率および比熱の温度依存性、ならびにコンクリート中に含まれる水分の蒸発潜熱を考慮することが可能な非定常熱伝導解析手法を用いている。ただし、本解析では、コンクリート中の水分移動は考慮していない。

コンクリートと鋼材の熱特性値はEurocode 4²⁾ に従い、

Table 1 に示す温度依存性を考慮した。熱伝導率と比熱の温度変化をFig. 3, 4 に示す。デッキスラブの上下面には熱伝達境界を設定し、スラブ上面の雰囲気温度は加熱中を通じて常温一定とし、デッキ下面側の雰囲気温度として標準加熱温度曲線の時刻歴を与えることにより、試験体の内部温度を求めた。なお、コンクリートの初期温度は12°C、初期含水率は3.4 mass% (実験時の実測値) とした。

3.3 熱伝導解析結果

熱伝導解析では、コンクリート中に含まれる水分による蒸発潜熱の考慮の有無を解析パラメータとした。水分の蒸発潜熱を考慮する解析では、コンクリート中の含水状態が断面内で一樣であると仮定した解析ケースに加え、スラブ下面からの加熱の影響により、コンクリート中に含まれる水分の総量の約1/2がスラブ上面に滞留するものと仮定して、スラブ最上面から深さ10mmの範囲のコンクリートを含含水率20%、その他の部分は3.4%で一樣と仮定した解析ケースを設定した。これは、実際の耐火試験時には、スラブ表面(非加熱側)に水分が移動して高含水状態となるため、この現象を解析上において模擬することを意図したものである。

熱伝導解析より得られた鉄筋温度および裏面温度(スラブ上面温度)の経時変化を、実験値と比較してFig. 5, 6に示す。なお、同図中に示す実験値は、実験時に測定された

Table 1 コンクリートと鋼材の熱特性値²⁾
Thermal Properties of Concrete and Steel

熱伝導率 [W/mK]	コンクリート $\lambda_c = 2.0 - 0.24 \cdot (T/120) + 0.012 \cdot (T/120)^2$ [20°C ≤ T ≤ 1200°C]
	鋼材 $\lambda_s = 54.0 - 3.33 \cdot (T/100)$ [20°C ≤ T ≤ 800°C] = 27.3 [800°C < T ≤ 1200°C]
比熱 [J/kgK]	コンクリート $C_c = 900 + 80 \cdot (T/120) - 4 \cdot (T/120)^2$ [20°C ≤ T ≤ 1200°C]
	鋼材 $C_s = 425 + 7.73 \cdot 10^{-1} \cdot T$ $- 1.69 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \cdot T^3$ [20°C ≤ T ≤ 600°C] = 666 - (13002/(T-738)) [600°C < T ≤ 735°C] = 545 + (17820/(T-731)) [735°C < T ≤ 900°C] = 650 [900°C < T ≤ 1200°C]
密度 [kg/m ³]	コンクリート $\rho_c = 2,300$
	鋼材 $\rho_s = 7,850$

12カ所の温度データの平均値を示す。Fig. 5 より、コンクリート中に含まれる水分の蒸発潜熱を考慮しない解析ケースでは鉄筋温度の上昇が速く、その最高値は実験における最高到達温度を大きく上回る521°Cに達している。

一方、水分の蒸発潜熱を考慮した解析ケースでは、加熱を終了した120分経過時までには温度がやや高めであるが、鉄筋温度の最高値は427°Cとなり、実験結果をほぼ再現している。

Fig. 6 に示す裏面温度については、実験では加熱終了後も温度上昇が継続し、加熱を終了してから約3時間経過した後約145°Cに達している。これに対して、コンクリート中に含まれる水分の蒸発潜熱を考慮しない解析ケースでは、時間の経過に従いほぼ線形的に温度が上昇し、最高温度は264°Cに達している。

他方、水分の蒸発潜熱を考慮した解析ケースでは、裏面温度が100°Cに達するまでの過程においては、実験値と良好な対応を示している。しかし、コンクリート中の含水率を3.4%で同様とした解析ケースでは、100°Cにおける温度停滞の時間が実験値よりも短く、またその後の温度上昇が急激であり、最高到達温度も実験値を30°C程度上回っている。これに比して、スラブ最上面の含水率を20%と仮定した解析ケースでは、水分蒸発に伴う温度停滞の時間や裏面温度の最高値が実験値により近づいていることから、実際にはコンクリート中の水分がスラブ上面に移動し、解析よりも水分蒸発がゆっくり進んだものと推察される。

水分の蒸発潜熱を考慮した解析結果(スラブ最上面の含水率を20%と仮定したケース)について、加熱60分後および

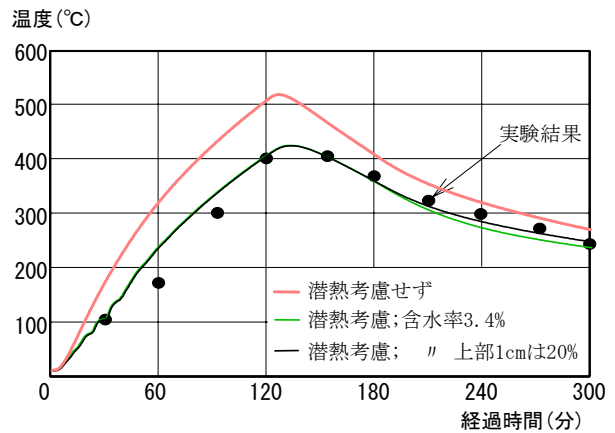


Fig. 5 鉄筋温度の経時変化
Measured and Calculated Temperature
of Reinforcing Bar

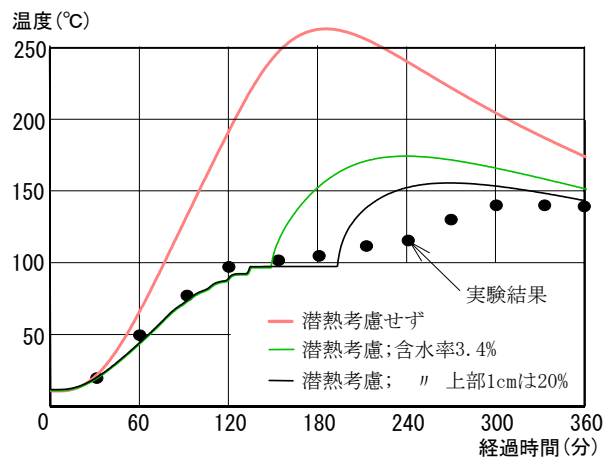


Fig. 6 裏面温度(スラブ上面温度)の経時変化
Measured and Calculated Temperature
at Top Surface of Slab

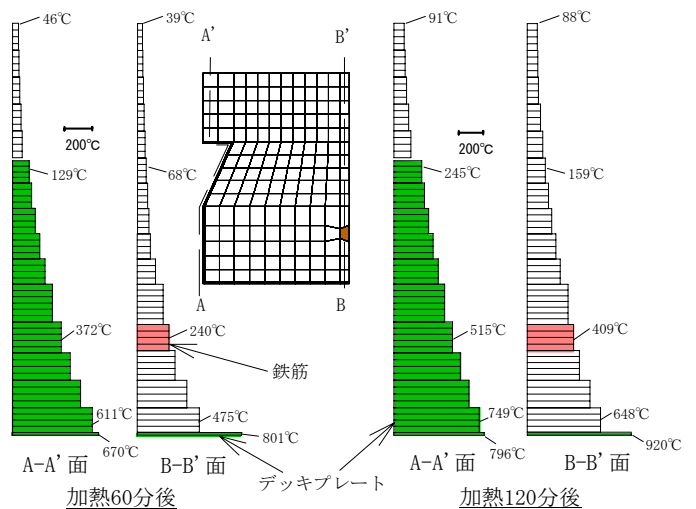


Fig. 7 断面内部の温度分布
Calculated Temperature Distributions

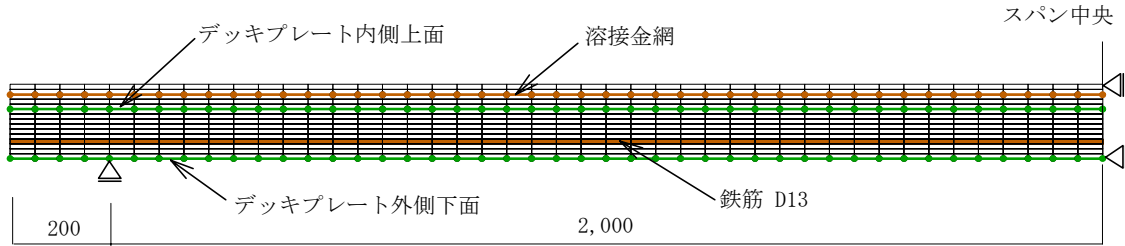


Fig. 8 熱応力解析モデル (1/2モデル)
Finite Element Mesh for Thermal Stress Analysis

び120分後における断面内部の温度分布をFig. 7 に示す。同図より、コンクリート内部に埋設されたデッキプレートの垂直部では、デッキプレートの熱橋効果により加熱面からの深さが同じ位置のコンクリートに比べて温度が高く、また逆に、加熱表面においてはリブの無いデッキプレート平板部よりも温度が低い傾向を示している。

4. 熱応力解析

4.1 解析モデル

熱応力解析は二次元問題として取り扱い、熱伝導解析で得られた基本断面における温度分布がスパン方向および幅方向に一樣に生じるものと仮定した上で、形状の対称性を利用してスパンの1/2を解析対象としてモデル化した。Fig. 8 に熱応力解析モデルを示す。コンクリート・鉄筋・デッキプレート(垂直部)は4節点平面要素でモデル化し、それぞれFig. 2 に示す基本断面を幅方向に投影することにより解析モデルを構築した。また、溶接金網およびデッキプレートの水平部は、いずれも2節点線材要素に置換した。なお、コンクリートとデッキプレートの間には接合要素を挿入し、極めて小さなすべり剛性 ($1.0 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^3$) を与えることで両者間の付着すべりを考慮した。

4.2 熱応力解析手法

熱応力解析には、熱伝導解析に引き続きFEM解析プログラム「FINAL」を使用した。本解析では、コンクリートと鋼材の力学的性質および線膨張係数の温度依存性を考慮した。解析手順としては、デッキスラブに自重を与えた後、熱伝導解析から得られた温度の時刻歴を30秒刻みで増分的に与えるものとした。なお、熱応力解析では、前節で示した熱伝導解析結果のうち実験値との対応が最も良かった解析ケース、即ちスラブ最上面の含水率を20%と仮定した解析ケースの温度データを使用した。

4.3 解析条件

熱応力解析に用いたコンクリートおよび鋼材の熱物性を以下に示す。なお、各材料の常温時における力学的性質の設定値をTable 2に示す。

4.3.1 線膨張係数 コンクリートおよび鋼材の線膨張係数(単位: $1/^\circ\text{C}$)は、Eurocode 4²⁾に基づき次式により定めた。

Table 2 常温時における各材料の力学的性質
Mechanical Properties of Concrete and Steel at Room Temperature

コンクリート	鋼材
圧縮強度 21 N/mm ²	降伏点
ヤング係数 $2.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$	鉄筋 295 N/mm ²
圧縮強度時のひずみ 0.002	デッキプレート 200 N/mm ²
引張強度 2.0 N/mm ²	溶接金網 400 N/mm ²
ポアソン比 0.17	ヤング係数 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

Table 3 コンクリートと鋼材の
力学的性質の温度依存性
Mechanical Properties of Concrete and Steel at High Temperature

温度T [°C]	コンクリート			鋼材	
	圧縮強度の残存比 $\sigma_{B,T}/\sigma_B$	圧縮強度時のひずみ比 $\epsilon_{cu,T}/\epsilon_{cu,20^\circ\text{C}}$	ヤング係数比 $E_T/E_{20^\circ\text{C}}$	降伏点比 $\sigma_{y,T}/\sigma_{y,20^\circ\text{C}}$	ヤング係数比 $E_T/E_{20^\circ\text{C}}$
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100	0.95	1.40	0.68	0.96	0.98
200	0.90	1.80	0.50	0.92	0.96
300	0.85	2.40	0.35	0.82	0.90
400	0.75	3.00	0.25	0.76	0.82
500	0.60	3.80	0.16	0.65	0.71
600	0.45	5.00	0.09	0.53	0.60
700	0.30	5.60	0.05	0.65	0.45
800	0.15	5.80	0.03	0.12	0.29
900	0.08	6.00	0.01	0.09	0.19
1000	0.04	6.00	0.01	0.05	0.09
1100	0.01	6.00	0.01	0.03	0.05
1200	0.00	6.00	0.00	0.00	0.00

$$\text{コンクリート: } \alpha_c = \begin{cases} 9.0 \times 10^{-6} + 6.9 \times 10^{-11} \times T^2 & [20^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C}] \\ 0.0 & [700^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}] \end{cases}$$

$$\text{鋼材: } \alpha_s = \begin{cases} 12.0 \times 10^{-6} + 0.8 \times 10^{-8} \times T & [20^\circ\text{C} \leq T \leq 750^\circ\text{C}] \\ 0.0 & [750^\circ\text{C} < T \leq 860^\circ\text{C}] \\ 20.0 \times 10^{-6} & [860^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}] \end{cases}$$

4.3.2 高温時におけるコンクリートの力学的性質

コンクリートの応力-ひずみ関係には、修正Ahmad式³⁾を適用した。本モデルは、低強度から高強度コンクリートまでを対象として、常温時における一軸および三軸圧縮下の応力-ひずみ関係を精度よく再現でき、また最大応力到達後のひずみ軟化域までを統一的に表現することが可能なモデルである。

本解析では、この常温時モデルを高温域に拡張して応力度-ひずみ度関係を設定した。高温時におけるコンクリートの圧縮強度、ヤング係数および圧縮強度時のひずみは、Eurocode 4に準拠してTable 3に示すように常温時に対す

る比としてモデルに取り込み、ヤング係数については Eurocode 4における応力-ひずみ曲線 (Popovics式) の初期接線剛性に基づき設定した。本解析に用いた高温時におけるコンクリートの応力-ひずみ関係をFig. 9に示す。コンクリートの引張強度は、圧縮強度の1/10と仮定し、圧縮強度の温度依存性に応じた強度低下を考慮した。また、圧縮応力下で温度上昇するコンクリートには過渡ひずみ ($c_{\epsilon_{tr}}$) と呼ばれる収縮ひずみが生じることが実験的に明らかとなっている⁴⁾。この過渡ひずみは、高温下のコンクリートに生じるひずみ成分の中で非常に大きな割合を占めるため、特に熱応力解析により熱変形状を適切に評価しようとする際には、この過渡ひずみを考慮する必要がある⁵⁾。本解析では、文献4)に従い下式により過渡ひずみを考慮した。

$$c_{\epsilon_{tr}} = -k_2 \times (\sigma / \sigma_B) \times c_{\epsilon_{th}}$$

ここで、 σ は存在応力 (圧縮)、 σ_B は常温時の一軸圧縮強度、 $c_{\epsilon_{th}}$ は熱膨張ひずみを表し、 k_2 の値は2.35とした。

4.3.3 高温時における鋼材の力学的性質 鉄筋の高温時における力学的性質については、文献6)に基づき常温時に対する比としてTable 3に示す温度依存性を仮定した。なお本解析では、デッキプレートと溶接金網の降伏点およびヤング係数の温度依存性も、鉄筋の設定値に準じるものとした。

4.4 熱応力解析結果

4.4.1 変形状 熱応力解析では、過渡ひずみの考慮の有無を解析パラメータとした。また既に述べた通り、今回の解析ではデッキプレートとコンクリートの付着すべりを考慮した解析条件としているが、過渡ひずみを考慮した解析条件においては、デッキプレートとコンクリートの付着条件を完全付着と仮定した解析も加え、計3ケースの解析を行った。デッキスラブのスパン中央部におけるたわみの経時変化について、実験値と各解析値を比較してFig. 10に示す。同図中に示す実験値は、実験において測定された3カ所の測定データの平均値を示す。また、過渡ひずみおよびデッキプレートの付着すべりを考慮した解析ケースについて、加熱120分後におけるデッキスラブの変形モードをFig. 11に示す。

Fig. 10より、実験では加熱時間の経過とともにスパン中央部のたわみ量がほぼ直線的に増加しており、加熱終了時には約120mmに達している。これに対して解析では、加熱開始直後に一度たわみが急増し、その後は実験値にほぼ等しいたわみ速度で変形が進む傾向を示している。特に、

コンクリートに生じる過渡ひずみを考慮していない解析ケースでは、加熱中を通じた全般的なたわみ量が実験値よりも大きい傾向を示している。

一方、過渡ひずみを考慮した解析ケースでは、加熱初期におけるたわみ量が実験値に比べて大きいものの、加熱120分後におけるたわみ量の最大値は、実験結果と良好な対応を示している。また、デッキプレートの付着条件を完全付着と仮定した解析ケースでは、付着すべりを考慮した解析ケースよりもたわみ量を若干大きく評価しているが、両者の差はわずかなものとなっている。この理由としては、今回解析対象とした耐火試験ではデッキ下面に耐火被覆

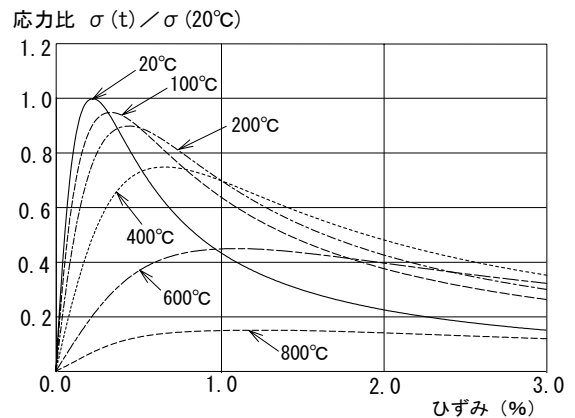


Fig. 9 高温時におけるコンクリートの応力-ひずみ関係
Stress-Strain Relationships of Concrete at High Temperature

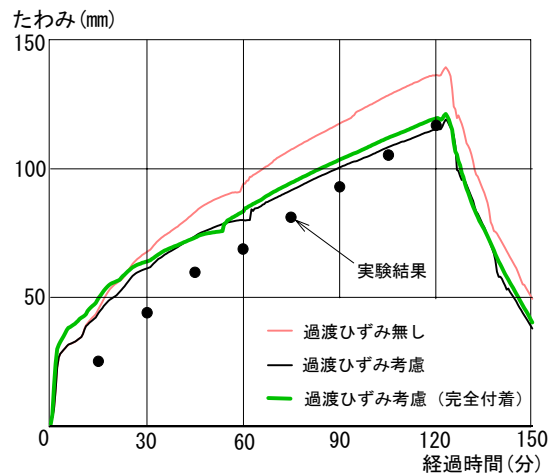


Fig. 10 スパン中央部たわみの経時変化
Vertical Deformation at Center of Span

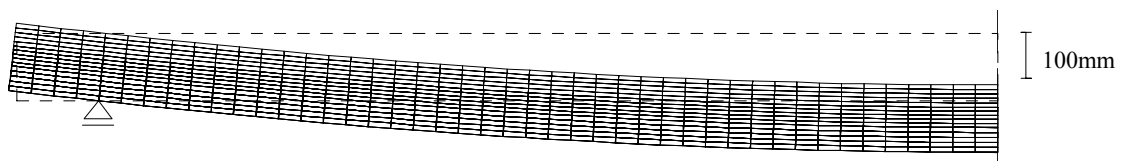


Fig. 11 変形モード (加熱120分後)
Deformation Mode after 120 Minutes

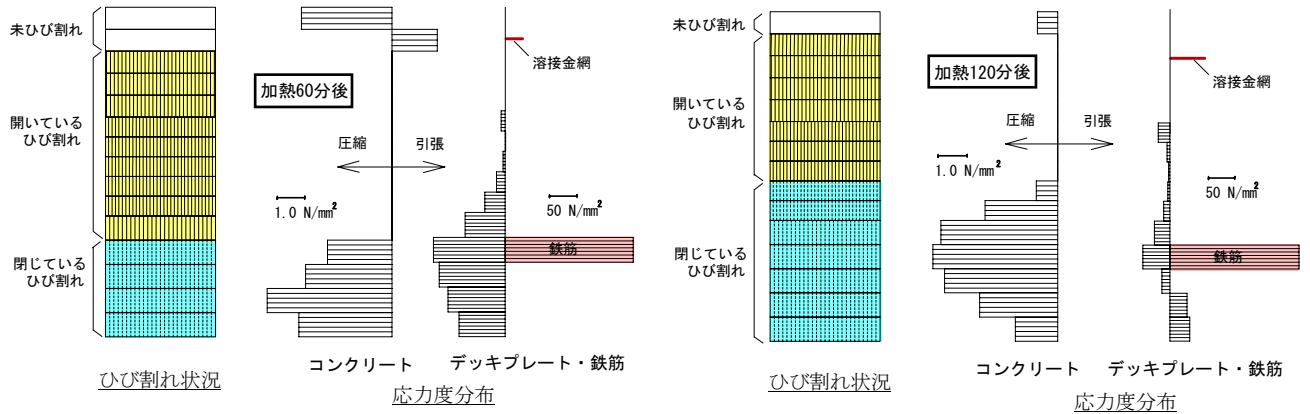


Fig. 12 断面内部の応力度分布およびコンクリートのひび割れ状況
Calculated Stress Distributions and Crack Propagation

が施されていないため、デッキプレートの温度上昇が著しく、材料強度が早期に低下することにより、デッキプレートが試験体の変形性状に及ぼす影響が少なかったものと推察される。

4.4.2 断面内部の応力度分布とひび割れ状況 過渡ひずみならびにデッキプレートの付着すべりを考慮した解析ケースについて、加熱60分後および120分後におけるスパン中央断面内部の応力度分布とコンクリートのひび割れ状況をFig. 12に示す。同図より、加熱面側の下端コンクリートには加熱初期にひび割れが生じているが、コンクリート温度の上昇に伴う熱膨張によってひび割れが閉じるとともに、圧縮応力が生じている。その後、加熱の進展に伴い下端コンクリートの圧縮領域が増大するとともに、ひび割れがスラブ上面へと進展している。本解析では、非載荷加熱試験を対象としているため、試験体のたわみ変形が比較的少ないことが影響し、加熱120分後においてもスラブ断面の下面側半分程度のコンクリートに圧縮領域が存在していることがわかる。

5. まとめ

耐火被覆の無い一方向配筋デッキスラブの2時間耐火試験を対象にFEM解析を実施し、その解析手法の妥当性を検討した。

熱伝導解析では、コンクリート中に含まれる水分の蒸発潜熱を考慮することで、耐火試験時の鉄筋温度をほぼ再現することができ、本解析手法の妥当性が確認された。また、裏面温度（スラブ上面温度）については、100℃到達までの対応性は良好であったが、水分蒸発後の温度上昇をやや過大に評価する傾向があった。この理由としては、耐火試験時にはコンクリート内部の水分がスラブ上面に滞留することが影響しているものと推察される。従って、解析精度をより向上させるためには、加熱時の水分移動性状を考慮した適切なモデル化、あるいは水分移動を直接考慮することが可能な解析手法の検討が必要であるものと考えられる。

熱応力解析では、コンクリートの過渡ひずみを考慮することによって、耐火試験時におけるスパン中央部のたわみ量をほぼ予測できることが確認された。また、今回解析対象とした試験条件においては、デッキプレートとコンクリートの相対すべりの有無は、スラブの熱変形性状にほとんど影響を及ぼさないことが確認された。

謝辞

貴重な実験データとともに、本研究を実施する機会を与えて戴きましたJFE鋼板株式会社（旧 川鉄鋼板株式会社）の関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 川鉄鋼板株式会社：ハイデッキR100 設計・施工技術概要、(2001)
- 2) Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Draft for Part 1.2 : Structural Fire Design, CEN/TC250/SC4 N56, prENV 1994-1-2
- 3) 長沼一洋：三軸応力下のコンクリートの応力～ひずみ関係、日本建築学会構造系論文集、第474号、pp. 163-170、(1995)
- 4) Anderberg, Y. and Thelandersson, S.: Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures, 2. Experimental Investigation and Material Behaviour Model, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Lund, Sweden, (1976)
- 5) 丹羽博則、他：コンクリート充填鋼管柱の耐火性に関する解析的研究～過渡ひずみを考慮した解析～、日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 229～232、(1995)
- 6) 長尾覚博、他：鉄筋コンクリート用棒鋼の高温引張試験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集A-2、pp. 75-76、(2000)