

(14) 高温を受ける鋼板コンクリート部材の力学的性状に関する実験および解析的研究

熊谷 仁志¹・平間 敏彦²・大橋 泰裕³・友藤 洋⁴・酒井 新吉⁵・松浦 敦⁶

¹正会員 清水建設株式会社 技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島3丁目4番地17号）
E-mail:hit.kuma@shimz.co.jp

²正会員 清水建設株式会社 原子力・火力本部（〒104-8370 東京都中央区京橋2丁目16番1号）
E-mail:hiraama@shimz.co.jp

³正会員 清水建設株式会社 原子力・火力本部（〒104-8370 東京都中央区京橋2丁目16番1号）
E-mail:ohashi_y@shimz.co.jp

⁴清水建設株式会社 原子力・火力本部（〒104-8370 東京都中央区京橋2丁目16番1号）
E-mail:h_tomofuji@shimz.co.jp

⁵正会員 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 科学システム事業部（〒100-6080 東京都千代田区霞が関3丁目2番5号）
E-mail:shinkichi.sakai@ctc-g.co.jp

⁶伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 科学システム事業部（〒100-6080 東京都千代田区霞が関3丁目2番5号）
E-mail:tsutomu.matsuura@ctc-g.co.jp

本論文は、高温を受ける鋼板コンクリート部材の力学的性状について研究したものである。鋼板コンクリート試験体上面（曲げ圧縮側）にヒーターを貼り付け、加熱面が175℃程度に達した状態で、4点曲げ実験を行った。常温で行った曲げ実験結果と比較することによって、鋼板コンクリート部材の曲げ剛性や曲げ耐力に与える加熱の影響について検討した。その結果、片面を175℃程度に加熱した場合には、曲げ剛性が60～70%に、曲げ耐力が約90%に低下することが明らかになった。

試験体は鋼板に覆われているため、実験途中の内部コンクリートのひび割れや損傷状況を確認することができない。そこで多方向ひび割れを考慮できる3次元弾塑性FEM解析を行って詳細な検討を行った。本解析手法は加熱によって発生したひび割れの影響を考慮できるのに加え、Eurocode式によるコンクリートのヤング率や強度の低下も考慮できるものである。FEM解析により、今回実験を行った高温を受ける鋼板コンクリート部材の力学的性状について評価することができた。

Key Words : steel-concrete composite beam, elevated temperature, 3D finite element analysis

1. はじめに

原子力発電施設では、安全性向上や環境負荷の低減を目的として、型枠や鉄筋の代わりに鋼板を用い、スタッド等を介してコンクリートとの一体化を図る鋼板コンクリート構造の採用が検討されている¹⁾。鉄筋コンクリート構造と比較しても、同等以上の耐力・変形性能を有していることが認められているが²⁾、過酷事象により高温を受けた場合の耐力・変形性能については、未だ不明な点も多い。

本研究では、特に曲げ圧縮性能に着目し、鋼板コンクリート梁試験体の曲げ圧縮側となる面を175℃程度に加熱した状態で、4点曲げ実験を行った。常温で行った実

験結果と比較することによって、鋼板コンクリート部材の耐力・変形性能に与える加熱の影響について検討した。さらに3次元弾塑性FEM解析を行って、実験結果のシミュレーションも試みている。

2. 実験概要

試験体は図-1に示すような鋼板コンクリート梁試験体である。同一の試験体を2体作成し、1体は非加熱（常温）で加力実験を行い、もう1体は加熱しながら加力実験を行った。試験体の断面はウェブ外側間の幅300mm（フランジ幅では310mm）×せい300mmである。全長は

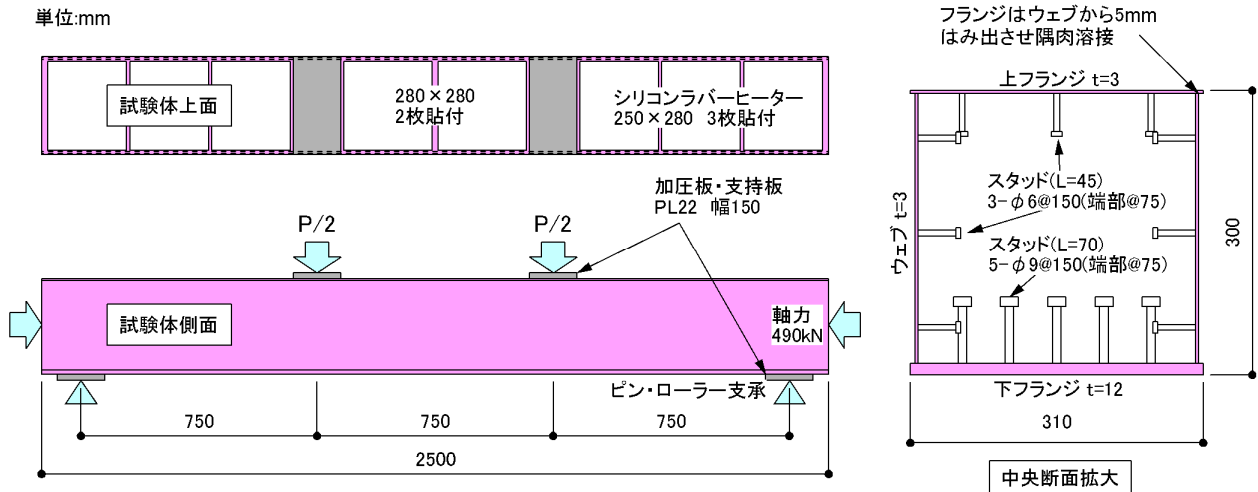


表-1 コンクリートの力学的性質

圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	縦弾性係数 (N/mm ²)
29.5	29.5	23658

表-2 鋼板の力学的性質

鋼板厚 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
PL3	291	473
PL12	350	535

表-3 曲げ実験結果一覧

試験体	最大荷重 (kN)	最大荷重時たわみ (mm)
常温	911	13.4
加熱	826	17.0
加熱/常温比率	0.91	1.27

2500mm, 支持スパンは2250mmで, 支持スパンを3等分する点の2箇所に荷重を加える。下フランジ鋼板は厚さ12mm, 上フランジおよびウェブ鋼板は厚さ3mmである。フランジとウェブの内面にはスタッドを溶接している。鋼板の厚さや後述する圧縮軸力は, 試験体中央区間が曲げ圧縮破壊するように設計したものである。

使用したコンクリートの水セメント比は55%であり, セメントには普通ポルトランドセメント, 細骨材には山砂および硬質砂岩砕砂, 粗骨材には硬質砂岩碎石を用い

ている。圧縮強度は表-1に示すように約30N/mm²である。試験体は梁端部から(90度回転させた状態で)打設し, 約4週間気中養生した。使用した鋼材の力学的性質を表-2に示す。

試験体上面にはほぼ全面にわたってシリコンラバーヒーターを貼り付け, 厚さ50mmのグラスウールを外周に巻き付けて加熱を行う。ヒーター温度はおおむね175℃で一定になるように制御している。3日間経過後, 温度を維持したまま両側のジャッキで軸力490kNを導入し, 6MN試験機を用いて破壊に至るまで単調荷重を行う。ヒーター, 試験体内部, 試験体下面に熱電対を取り付け, 温度を計測する。試験体上面から30mmの位置には埋め込み式ひずみ計を設置し, 試験体下面にはひずみゲージを貼り付けて, ひずみを計測する。

3. 実験結果

表-3に曲げ実験結果一覧を, 図-2に加熱試験体の温度履歴を示す。試験体上面は加熱を開始した直後におおむね175℃に達するが, 試験体内部および下面は約2日間経過してほぼ温度が一定になっている。曲げ実験開始時の試験体下面の温度は, 約110℃であった。

図-3に荷重-変形関係を示す。横軸の変形は試験体中央のたわみであり, 加熱→軸力載荷後をゼロとして示したものである。加熱により最大耐力は常温の91%, 初期剛性は60~70%に低下し, 最大耐力時の変形は約1.3倍に増大している。最大耐力以降の荷重低下は加熱した場合のほうが緩やかであり, 実験終了時には常温とほぼ同等の荷重になっている。

図-4に実験終了後の試験体の状況を示す。曲げ圧縮

部に鋼板の膨らみが見られるが、溶接部が破断することではなく、常温と加熱試験体で破壊状況に差は見られなかった。

図-5 に荷重－ひずみ関係を示す。横軸のひずみは試験体中央断面における試験体下面のひずみゲージおよび埋め込み式ひずみ計で計測された値を温度補正したものである。常温試験体ではコンクリート圧縮ひずみが約 4000μ に達したときに最大荷重に至っているが、加熱試験体では最大荷重時の圧縮ひずみは 10000μ を超えている。

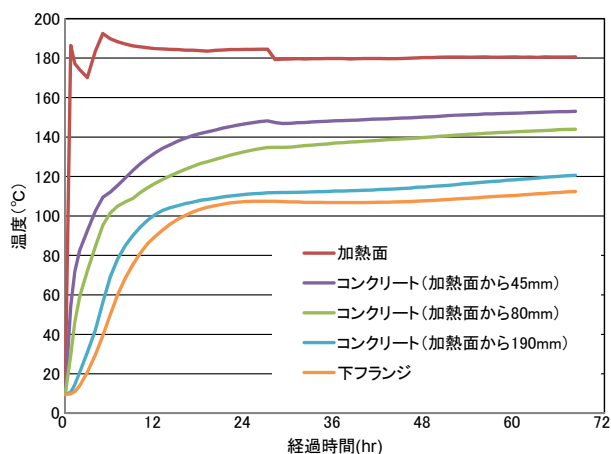


図-2 加熱試験体の温度履歴

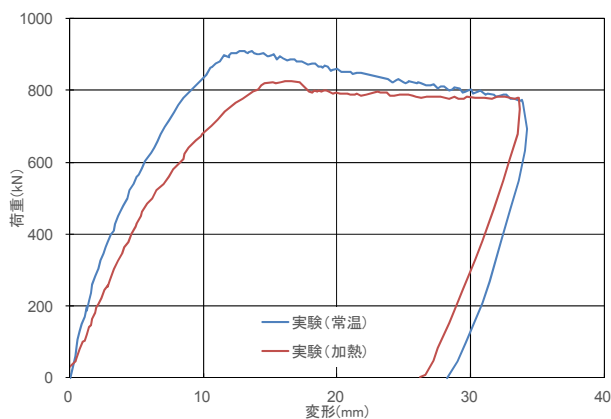


図-3 荷重－変形関係



常温試験体 加熱試験体

図-4 実験終了後の試験体の状況

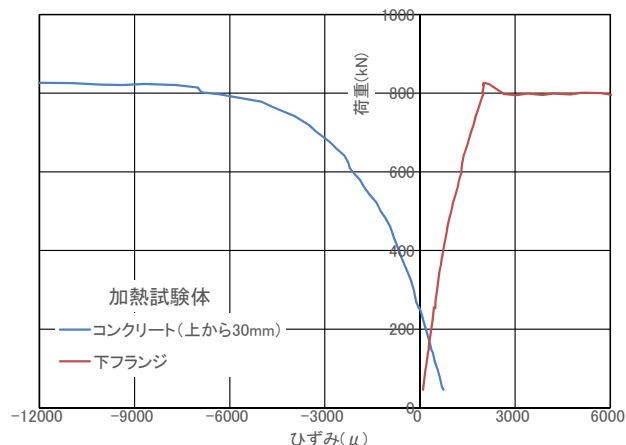
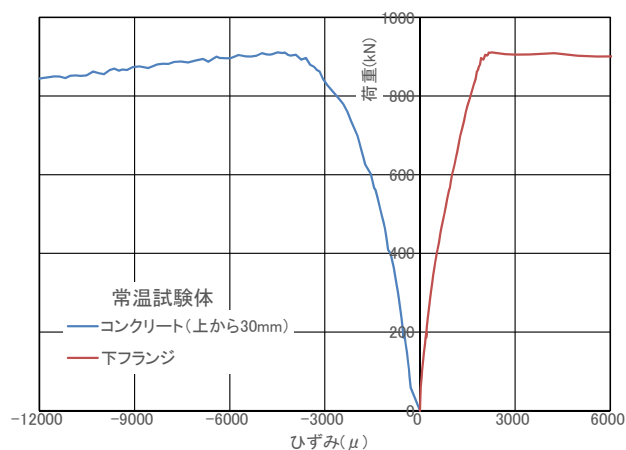
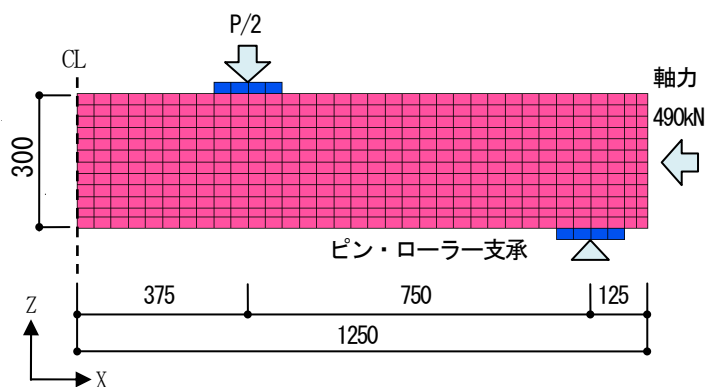


図-5 荷重－ひずみ関係

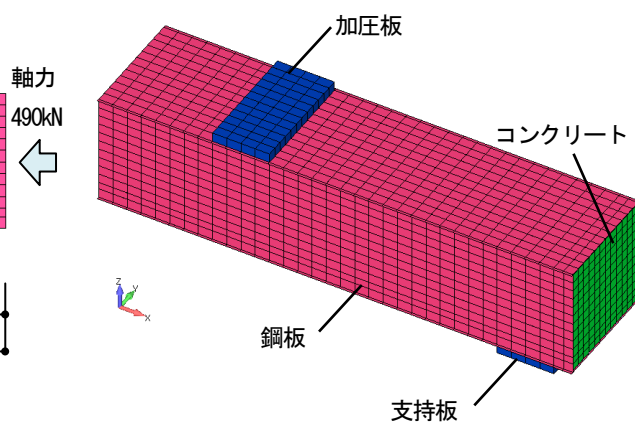
4. 3次元FEM解析

3次元弾塑性FEM解析を通じて実験結果と比較し、解析手法について検討する。解析コードには「FINAS/STAR³⁾」を用いる。本コードではコンクリートの構成則に、多方向ひび割れを考慮できる前川・福浦らのモデル⁴⁾を採用している。図-6に解析モデルを示す。解析モデルは対称条件を考慮した1/2モデルとし、鋼板をシェル要素、コンクリートをソリッド要素でモデル化し、スタッドはばね要素でモデル化する。図-7にスタッドのモデル化の概要を示す。スタッドの軸方向は剛結とし、せん断方向は実験結果に基づく多折れ点近似した非線形ばねとする。また、スタッド以外の鋼板とコンクリートの接触面は、軸引張時の剥離を考慮する。

コンクリートの材料特性に与える加熱の影響は、Eurocode式⁶⁾により評価する。具体的には、前川・福浦らのモデルに対し、各要素の温度に応じたコンクリート圧縮強度および圧縮強度時の歪を適用する。コンクリートの応力－歪関係を図-8に示す。



(1) モデル寸法



(2) 全体図

図-6 解析モデル

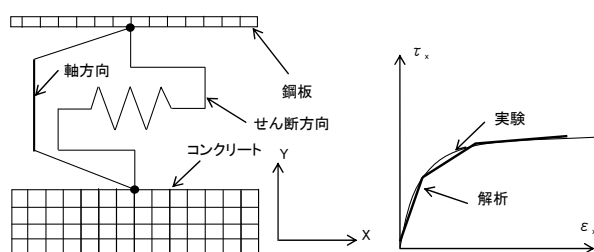


図-7 スタッダのモデル概要

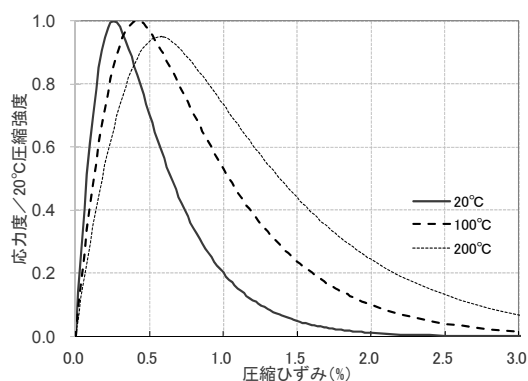


図-8 コンクリートの応力-歪関係

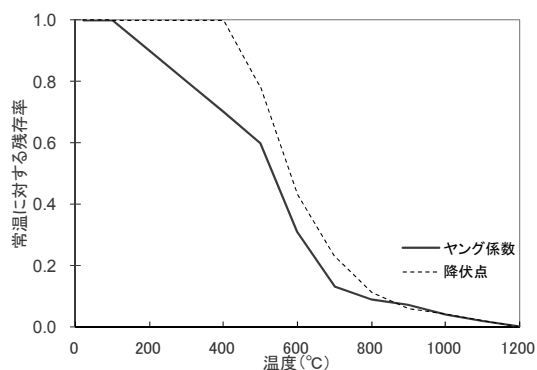


図-9 高温時における鋼板の材料特性の残存比

なお、鋼板の材料特性に与える加熱の影響は、図-9に示す高温下における鋼板の材料特性の残存比に示すように、本試験で対象とする温度では小さいため考慮しない。

解析は実験の詳細挙動を模擬することを目的とし、評価手法の違いが解析結果に与える影響を分析するため、以下の4ケースについて実施する。

- Case 1 : 軸力载荷および曲げ加力の解析
- Case 2 : コンクリートの材料特性のみに加熱の影響を考慮した軸力载荷および曲げ加力の解析
- Case 3 : コンクリートの材料特性に対し加熱の影響を考慮し、加熱試験体の载荷時の温度分布に応じた熱応力を考慮した軸力载荷および曲げ加力の解析
- Case 4 : コンクリートの材料特性に対し加熱の影響を考慮し、加熱試験体の温度履歴に応じた熱応力を考慮した軸力载荷および曲げ加力の解析

Case 1は常温試験体に対応した解析を、Case 2, Case 3およびCase 4は加熱試験体に対応した解析として実施する。加熱試験体に対応した解析では、全ての解析ケースで加熱による材料定数の低減を考慮するが、Case 2では熱応力解析は実施せず、Case 3では载荷時の定常状態を想定した熱応力解析を、Case 4では加熱試験体の昇温過程を模擬した熱応力解析を実施する。

図-10に各解析ケースの荷重-変形関係を示す。図-10に示すように、加熱によるコンクリートの材料定数の低減による影響に比べ、熱応力解析が初期剛性、最大耐力に与える影響が大きいことがわかる。特に、加熱試験体の温度履歴を模擬したCase 4では、加熱初期段階での試験体内部の温度差が大きくなり、温度ひび割れが他の解析ケースよりも多く生じるため、初期剛性が低下したものと考えられる。

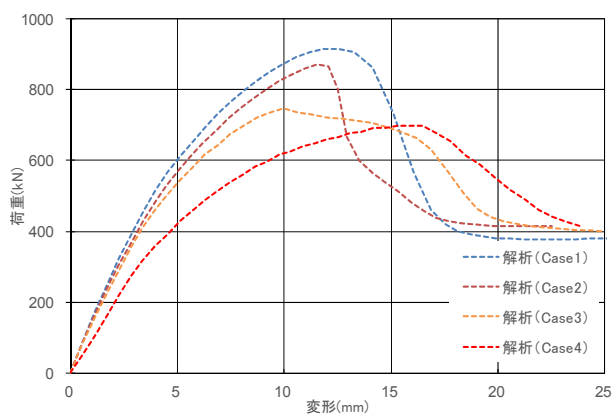


図-10 Case 1～4における荷重—変形関係

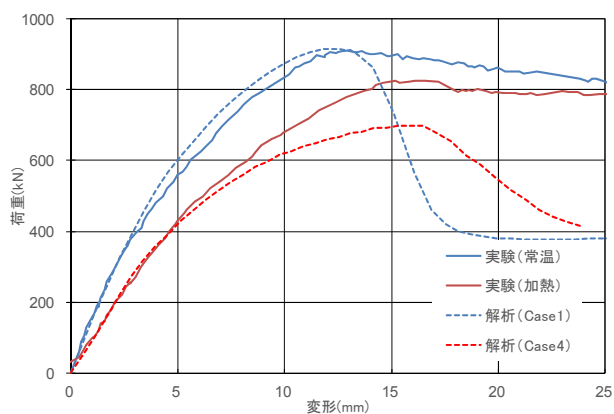
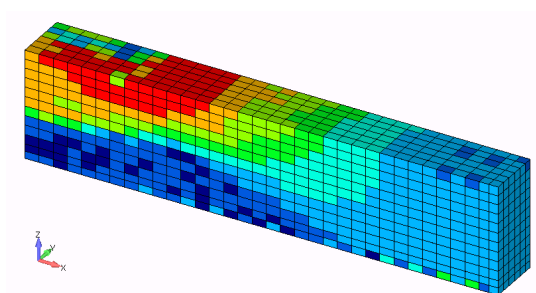
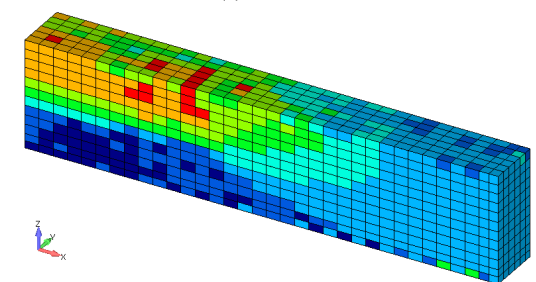


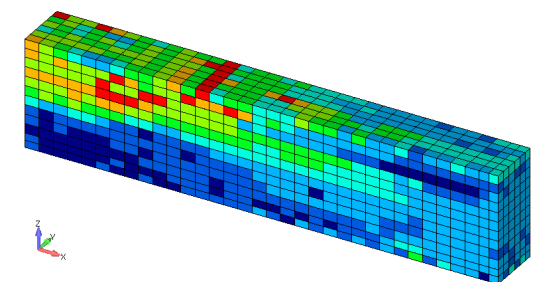
図-11 実験と解析の荷重—変形関係



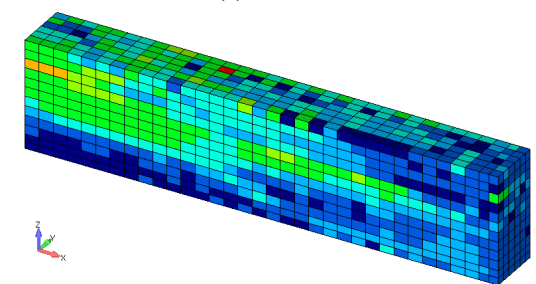
(1) Case 1



(2) Case 2



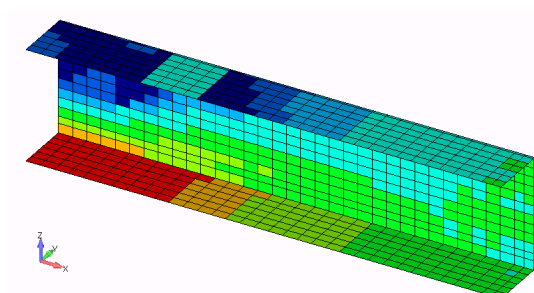
(3) Case 3



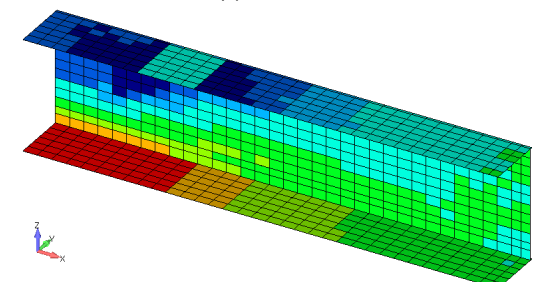
(4) Case 4



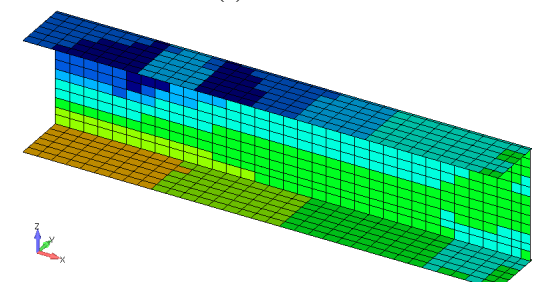
図-12 コンクリートの軸応力分布



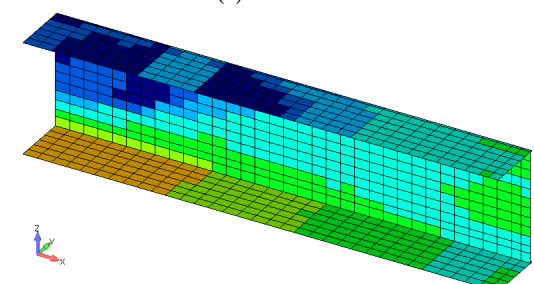
(1) Case 1



(2) Case 2



(3) Case 3



(4) Case 4



図-13 鋼板の軸応力分布

図-11 に実験と代表的なケースの解析結果による荷重－変形関係を示す。常温試験体の比較対象として Case 1 の結果を、また加熱試験体との比較対象として、加熱による材料定数の低減と加熱試験体の温度履歴に応じた熱応力解析を実施した Case 4 の結果を示す。常温時の実験結果に対して、解析では初期剛性、最大耐力ともよく模擬できている。また加熱時においても加熱による材料定数の低減と加熱試験体の挙動を詳細に模擬することで、試験体の挙動を模擬できることがわかった。

図-12、図-13 に各解析ケースの最大耐力時のコンクリートおよび鋼板の軸応力分布を示す。Case 2 では温度によるコンクリートの材料特性の低減を考慮しているため Case 1 に比べ曲げ圧縮側でコンクリートの圧縮応力が低下する。しかしながら引張フランジ鋼板は降伏応力に達しているため曲げ耐力の低下が小さいと判断される。

一方、熱応力解析を実施した Case 3、Case 4 では、温度によるコンクリートの材料特性の低減に加え、熱応力解析時のひび割れに伴い、曲げ圧縮側のコンクリートの圧縮応力が低下し、引張フランジ鋼板が降伏応力に到達する前に曲げ耐力に到達していることがわかる。また、加熱試験体の昇温過程を模擬した Case 4 は Case 3 に比べ曲げ圧縮側のコンクリートの圧縮応力が小さく、熱応力解析時の温度ひび割れの影響が大きいことがわかる。

以上より、加熱試験体の昇温過程の挙動を模擬することにより、加熱試験体の初期剛性や最大耐力の評価が改善することが確認できた。

5. まとめ

最高で 175℃まで加熱した鋼板コンクリート部材の曲げ実験を行った。常温で行った曲げ実験結果と比較すると、鋼板コンクリート部材の曲げ剛性は 60%～70%に、

曲げ耐力は約 90%に低下することが明らかになった。

しかしながら、試験体は鋼板で覆われているため、実験途中の内部コンクリートのひび割れや損傷状況を確認することはできない。そこで、加熱試験体の詳細挙動評価を実施するため、多方向ひび割れが考慮できる FEM 解析を実施した。材料定数の加熱による低減と、加熱試験体の温度履歴に応じた熱応力によるひび割れを考慮した複数のケースによる解析を実施し、評価手法の違いが解析結果に与える影響を分析した。本稿では材料定数の加熱による低減と加熱試験体の温度履歴に応じた熱応力解析を実施すると、加熱時における詳細挙動評価ができることが明らかになった。ただし実験結果と解析結果を比較すると、小さい変形時には初期剛性や耐力について挙動を精度よく模擬できているものの、最大耐力については差異がある。終局時の詳細挙動評価については今後の課題と考えている。

参考文献

- 1) 日本電気協会：鋼板コンクリート構造耐震設計技術規程，JEAC 4618-2009，2009.
- 2) 熊谷仁志，太田和也，池田竜介：孔あき鋼板リブを用いた鋼板コンクリート柱の構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.2, pp.1165-1170, 2010.
- 3) 福浦尚之，4 方向ひび割れを有する鉄筋コンクリート要素の履歴依存型構成モデル，東京大学博士論文，1999
- 4) 前川宏一，福浦尚之：擬似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No.634，pp.157-176，1999.11
- 5) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991
- 6) Eurocode 2, Design of Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design, CEN EN 1992-1-2: 2004
- 7) 土木学会：複合構造標準示方書(2009 年)

STRUCTURAL PERFORMANCE ON STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAM UNDER ELEVATED TEMPERATURE

Hitoshi KUMAGAI et al.

Series of bending experiment is carried out to obtain structural performance of steel-composite beam under elevated temperature. In the tests, the result shows that bending stiffness and ultimate bending capacity are degraded 60% to 70%, 90% respectively compared with ambient condition's one. Because specimens are covered with steel plate, it is not clear how specimens have degraded under elevated temperature. That's why 3D finite element analysis considering about the multi-direction's cracks is established to estimate the nonlinear behavior of experiment at high temperature. Series of analyses are conducted using material properties at high temperature and thermal stress analysis. The calculated results show good agreement with experimental result successfully.