

# 論文 高温加熱された CFRP 補強コンクリートはりの温度・力学特性

黒田 一郎<sup>\*1</sup>・日野 伸一<sup>\*2</sup>・太田 俊昭<sup>\*3</sup>・升川 裕士<sup>\*4</sup>

**要旨：**CFRP等の新素材を用いたコンクリート部材の耐熱性の解明を目的として、CFRPロッドで補強されたコンクリートはりの高温加熱実験ならびに加熱後の載荷実験を行なった。未加熱のCFRPはりやRCはり、さらにはFEM解析値との比較検討の結果、CFRPロッドへの到達温度が200°C程度になれば、加熱中のはり内部の応力状態に影響が生じるが、加熱後には耐力、曲げ剛性などの力学性能は回復することなどが判明した。

**キーワード：**CFRPロッド、高温加熱、熱伝導、温度応力、曲げ性状

## 1. まえがき

近年の合成化学技術の発展により各種の連続繊維補強材(FRP)が開発されており、鋼材に代わる補強材としてコンクリート構造物への適用が進められている。その適用範囲が広がるにつれて火災などの予期せぬ高温下に曝される危険性を想定する必要がある。しかし、FRP補強材を適用したコンクリート部材の耐熱性については未だ十分に研究がなされていない[1]。

そこで本研究では、このFRP補強コンクリートの耐熱性の解明を目的として、CFRPロッドを用いたコンクリートはり(以下CFRPはり)を対象とした1000°Cまでの加熱実験および加熱後の静的曲げ試験を行ない、等価断面を有するRCはりや非線形FEM解析結果と比較しながら、高温下での温度特性ならびに加熱後の力学特性について検討を行なうものである。

## 2. 実験および解析の方法

### 2. 1 供試体および材料特性

高温加熱実験ならびに曲げ試験に用いた供試体を図-1に示す。供試体数はCFRPはりおよび比較対象用のRCはりのそれぞれ加熱の有無による4体で、これらの形状寸法は、幅20cm、高さ20cmの長方形断面、全長174cmである。軸方向補強材量は、温度特性、はり供試体の曲げ剛性の比較に主眼を置くため(ヤング係数×断面積)を等価にした。ただし、スターラップはいずれも鉄筋(SD345, D6)を用いている。使用したCFRPロッドは呼び径φ5およびφ10の2

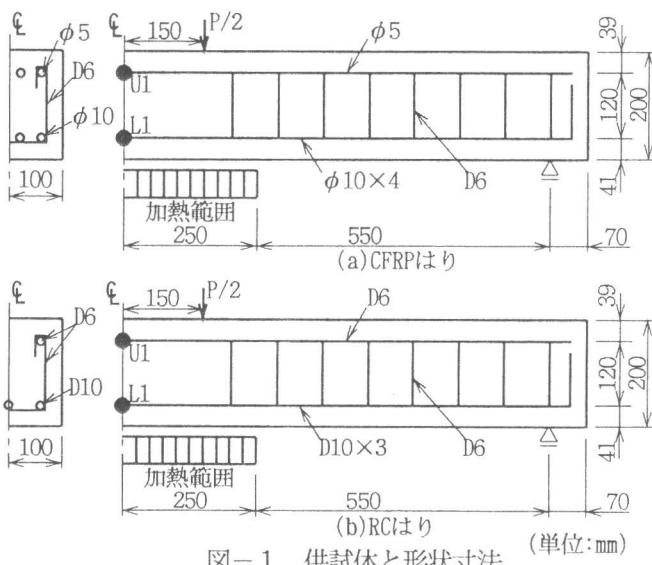


図-1 供試体と形状寸法 (単位:mm)

\*1 九州大学助手 工学部建設都市工学科、工博（正会員）

\*2 九州大学助教授 工学部建設都市工学科、工博（正会員）

\*3 九州大学教授 工学部建設都市工学科、工博（正会員）

\*4 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻

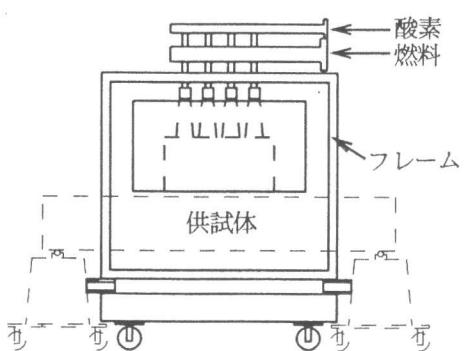


図-2(a) 加熱装置

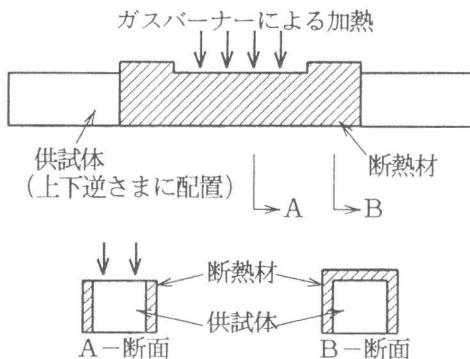


図-2(b) 供試体の断熱

種類で、引張強度 $23,000\text{kgf/cm}^2$ 、ヤング係数 $1.5 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ 、線膨張係数 $0.68 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であり、炭素繊維をより線状に成形せずに軸方向に直線状に配向しているのが特徴である。なお、比較対象用のRCはりの鉄筋はSD345(D10, D6)を用いている。また、コンクリートの水セメント比は50%（普通ポルトランドセメント）、設計基準強度は $255\text{kgf/cm}^2$ である。

## 2. 2 高温加熱実験

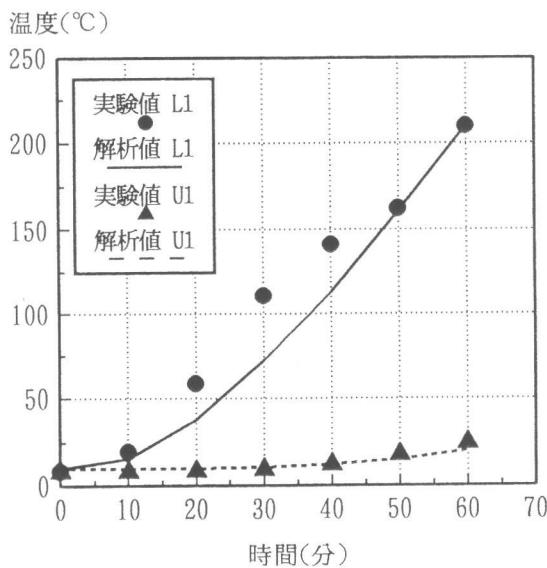
供試体の加熱はガスバーナーを用いて行なった。加熱範囲は図-1に示すように、はり中央部の $50\text{cm} \times 20\text{cm}$ の範囲である。ガスバーナーを用いた加熱装置ならびに供試体の断熱範囲を図-2(a), (b) にそれぞれ示す。加熱温度は常温(室温)から $1000^\circ\text{C}$ までを60分かけて直線的に上昇させた。この加熱温度は火災による高温負荷に近い条件を想定したものである[2]。本実験では、設計断面における引張側表面からの加熱を想定するため、加熱装置の関係上、供試体を上下逆にして上方から加熱した。ただし、初期条件として加熱側コンクリートにおけるひび割れの存在は考慮していない。供試体の加熱範囲以外の面は断熱材(熱伝導率 $0.1\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ 以下)で覆って熱的に絶縁した。各時間ステップで、はり内部に埋め込んだ熱電対およびひずみゲージにより、高温加熱中のCFRPロッド、鉄筋の温度変化ならびにひずみ変化を測定した。

## 2. 3 热伝導・温度応力解析

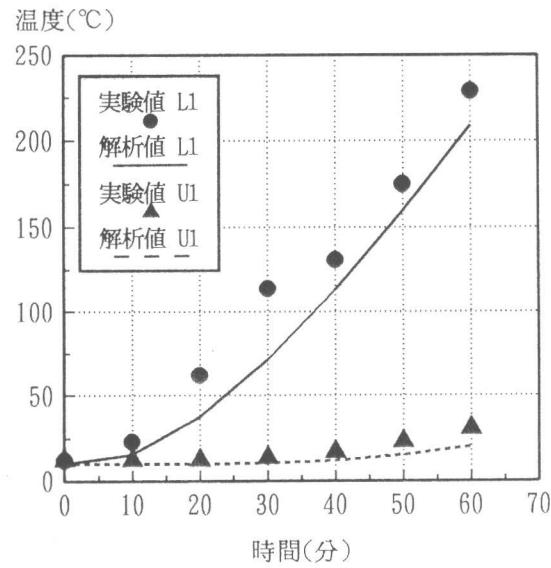
2. 2の加熱実験結果と比較検討するために、FEMによる熱伝導・温度応力解析を行なった[3, 4]。解析には2次元四辺形8節点要素を用い、はりの対称性を考慮してはり全体の $1/2$ を70要素に分割した。熱伝導解析は熱伝導率の温度依存性を、温度応力解析はコンクリートのひび割れによる剛性低下を考慮した非線形解析である。非定常熱伝導解析を行なうための時間増分は2分とした。なお本解析ではCFRPロッドや鉄筋とコンクリートの完全付着を仮定している。

## 2. 4 加熱後の載荷試験

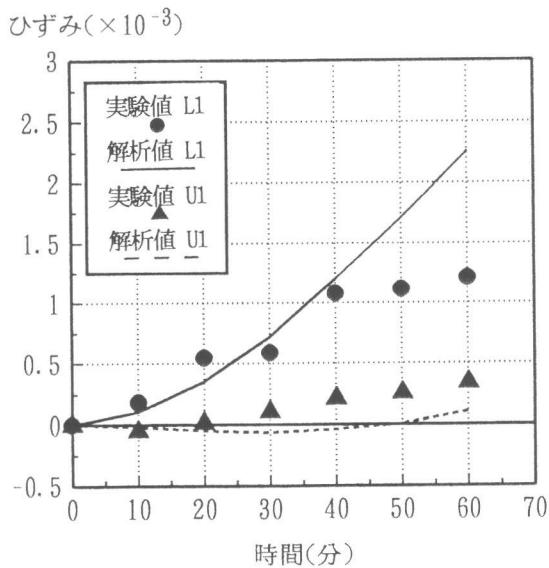
2. 2で加熱された供試体は室温で約2週間自然冷却した後、加熱後の耐荷特性を検討するために、静的曲げ試験を実施した。なお、比較用に同一断面諸元を有する未加熱状態のCFRPおよびRCはりについても同様の載荷実験を行なった。載荷方法はスパン $160\text{cm}$ 、載荷幅 $30\text{cm}$ の2点載荷とし、破壊に至るまで静的に漸増載荷した。測定項目は、はり中央点のたわみ、CFRPロッドおよび鉄筋のひずみ、ひび割れおよび破壊荷重である。



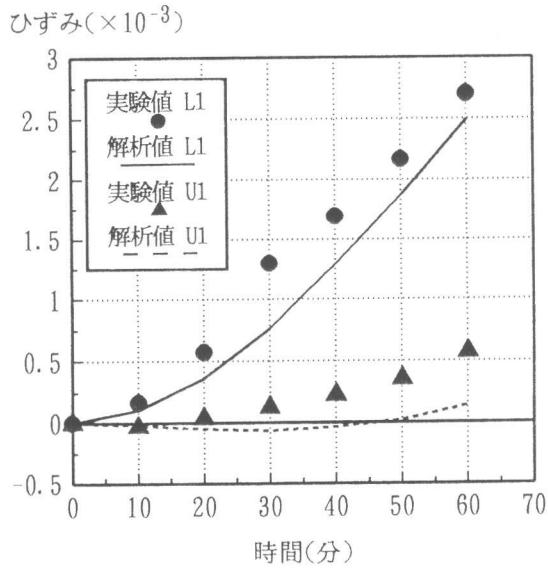
図－3(a) 温度履歴(CFRPはり)



図－3(b) 温度履歴(RCはり)



図－4(a) ひずみ履歴(CFRPはり)



図－4(b) ひずみ履歴(RCはり)

### 3. 高温加熱によるはりの温度特性

#### 3. 1 温度分布

図－3(a), (b) に実験および解析で求めた温度履歴の一例を示す。図中、測定位置L1, U1は、はり中央断面の引張・圧縮補強材位置である(図－1 参照)。また、●、▲印は熱電対により測定した値であり、実線および破線はFEMによる解析値である。

図より、CFRPはりとRCはりの間には顕著な差異はみられず、本実験のCFRPへの到達温度220°C程度までの加熱条件下では、熱伝導特性に及ぼす補強材の種類の影響はきわめて小さいといえる。

また、解析値は実験値の傾向をよく捉えており、CFRPはりの熱伝導解析にも従来のRCはりの解析法がそのまま適用できることがわかる。なお、加熱開始後20~40分(温度 100°C前後)で、実験値と解析値の差が大きいところもあるが、これは発生したひび割れに沿った水蒸気の移動による影響や、水分損失による比熱の変化等が原因として考えられる。

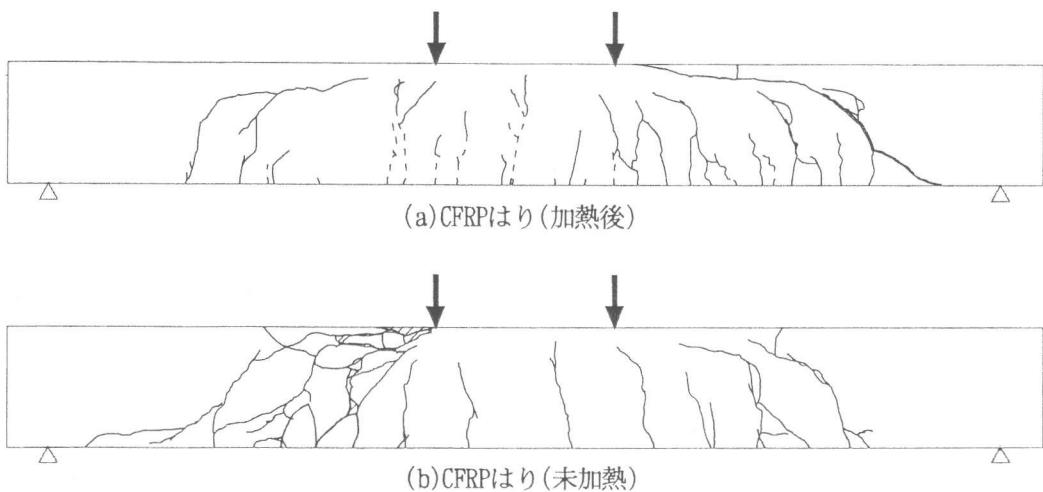


図-5 終局時のひび割れ分布

本実験では供試体自重による発生応力度は最大で $2\text{kgf/cm}^2$ 程度であり、供試体自重によるひび割れ発生やその助長は考えられない。ただし、実構造物においては、作用荷重によってひび割れが既に生じた部材が加熱を受ける場合や加熱早期にひび割れが生じる場合を考えられ、その場合には、ひび割れに沿って多量の熱が流入し、主筋温度の急上昇を招く恐れもある。数百°Cの高温下でのコンクリートのひび割れに沿った熱の移動については現在のところ十分な資料はなく、今後の研究を要する。

### 3. 2 ひずみ分布

図-4(a), (b)に実験および解析で求めたひずみ履歴を示す。図より、CFRPはりとRCはりの間に顕著な差異がみられる。すなわち、CFRPはりの加熱側の点L1では、加熱開始後40分までは温度上昇とともにひずみも増加傾向を示し、また、解析値も実験値をよく追跡しているものの、それ以後は実験でのひずみの増加が急激に鈍り、非加熱側のU1やRCはりの挙動、さらには解析結果とは顕著な差異を呈している。これについては、加熱開始後40分以降で点L1の温度が $200^\circ\text{C}$ 近くまで上昇していることから、繊維に含浸した合成樹脂の熱的変化によるCFRPロッドの付着性能の劣化が一因として考えられる。

### 4. 加熱後のはりの耐荷特性

加熱、未加熱のCFRPはりについて終局時のひび割れ分布をそれぞれ図-5(a), (b)に示す。図中、破線は加熱実験によって生じたひび割れ、実線は載荷試験によって生じたひび割れである。高温加熱によって生じたひび割れが載荷試験によって進展し、結果として加熱を受けたはりの方がひび割れ分散性の良いものとなった。

次に、スパン中央断面(点L1)におけるCFRPはりおよびRCはりの荷重-ひずみ関係を図-6(a), (b)に示す。先に加熱を受けたはりは、CFRP、RCの両タイプともに載荷開始以前にはり高12cm程度まで熱によるひび割れが生じているため、荷重 $2\text{tf}$ 程度までは未加熱のはりに比べて発生ひずみは大きいが、それ以後のひずみはほぼ等しい。特に、加熱試験中に $200^\circ\text{C}$ 付近で変状のみられたCFRPはりについても、自然冷却後は未加熱のはりと比べてほとんど遜色のない曲げ性状を示す

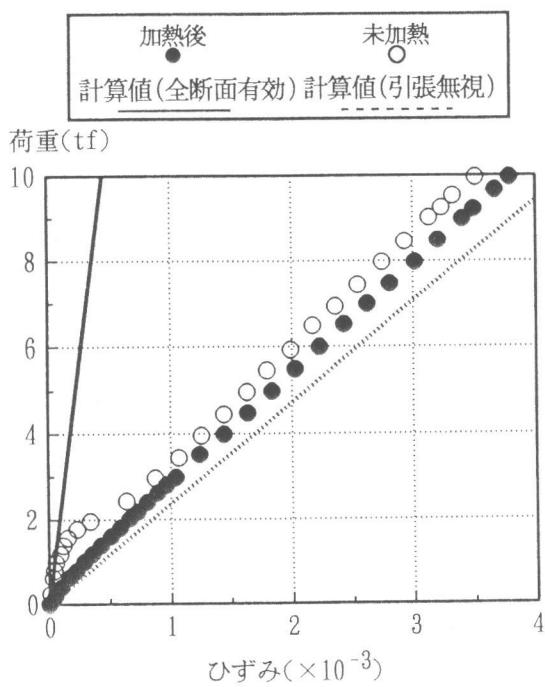


図-6(a) 荷重-ひずみ関係(CFRPはり)

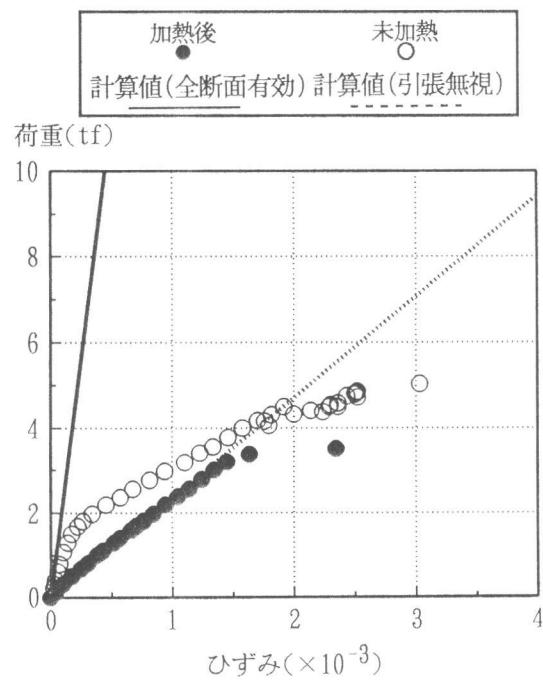


図-6(b) 荷重-ひずみ関係(RCはり)

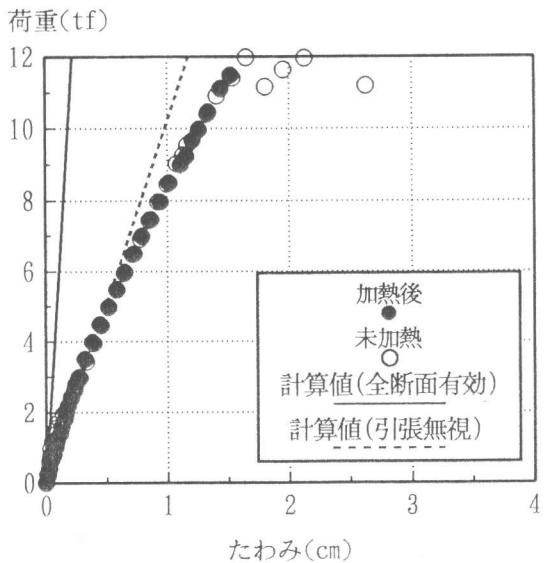


図-7(a) 荷重-たわみ関係(CFRPはり)

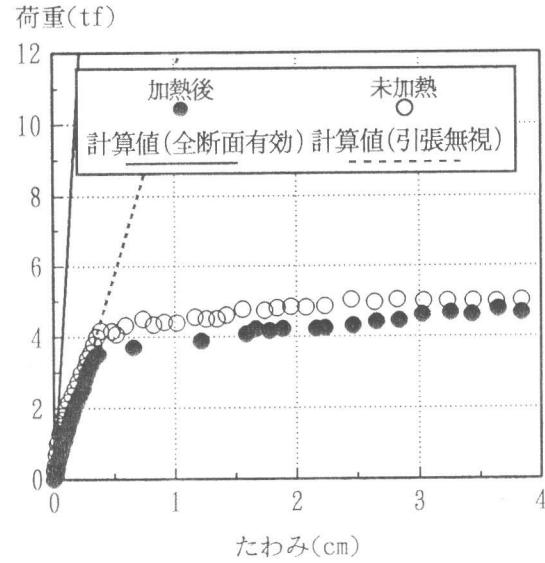


図-7(b) 荷重-たわみ関係(RCはり)

ことが確認された。これらより、加熱後のはりと未加熱のはりとの間にみられた初期荷重時のひずみ差は、加熱によって生じたコンクリートのひび割れに起因するものであり、本実験の加熱条件の下では、補強材の加熱による劣化は特にないことが確認された。なお、このことは図中に併せて示したコンクリート全断面有効と引張部無視の計算値との比較によっても明らかである。

CFRPはりおよびRCはりの荷重-たわみ関係を図-7(a), (b)に示す。加熱後と未加熱の供試体を比較するとほとんど差がなく、曲げ剛性に及ぼす加熱のダメージが小さいことがわかる。

また、全供試体について破壊荷重の比較を表-1に示す。ここで表中の計算値は土木学会コンクリート標準示方書[5]に基づき算定したものである。CFRPはりの終局耐力については、比較的

表-1 破壊荷重の比較

供試体	実験値(tf)		計算値(tf)		実験値 計算値
	破壊荷重	破壊形式	曲げ	せん断	
CFRPはり(加熱後)	12.1	せん断	11.6	9.4	1.29
CFRPはり(未加熱)	12.0	せん断			1.28
RCはり(加熱後)	4.7	曲げ	4.2	9.4	1.12
RCはり(未加熱)	5.2	曲げ			1.24

加熱の影響の小さいせん断スパンでのせん断破壊であったため、熱による強度低下について言及することは難しいが、少なくとも実験での破壊荷重(12.1tf)が曲げ破壊荷重の設計値(11.6tf)を上回ったことは十分評価できるものと考える。

## 5. まとめ

本研究は、CFRPロッドで補強されたコンクリートはりの高温加熱実験および加熱後の静的曲げ試験を行ない、高温加熱されたCFRP補強コンクリートはりの温度・力学特性について検討したものである。得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 1000°Cまでの外的加熱すなわちCFRPロッドの到達温度220°Cまでの加熱では、熱伝導特性におけるCFRPはりとRCはりの差異は認められず、RCはりの熱伝導解析法をCFRPはりにも十分適用することが可能である。
- (2) CFRPロッドの温度が200°C付近に到達すると、繊維に含浸させた樹脂の熱的変質による補強材の付着性能の劣化と思われる温度応力(ひずみ)の変化が認められた。
- (3) 加熱後のCFRPはりの曲げ剛性に及ぼす加熱の影響は小さい。  
ただし、初期荷重時における挙動に対する高温加熱の影響は認められるが、これはあくまでコンクリートの温度ひび割れによるものであり、CFRPの補強材としての性能劣化は特に認められない。

## 参考文献

- [1]例えば、蓮尾孝一、岡本直、谷垣正治：連続繊維筋を用いたコンクリート梁の耐火性能、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 2、pp. 917-922、1993. 6
- [2]古村福次郎：コンクリートと熱（1）、コンクリート工学、Vol. 17、No. 8、pp. 87-95、1979. 8
- [3]太田俊昭、黒田一郎、日野伸一：高温下における鉄筋コンクリートはりの熱伝導特性と温度応力特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 1、pp. 333-338、1991. 6
- [4]Kuroda, I., Ohta, T. and Hino, S.: Thermal Behavior of Composite Beams under External Heating, Proceedings of the International Conference on Concrete under Severe Conditions, Vol. 2, pp. 1582-1589, Aug. 1995
- [5]土木学会：コンクリート標準示方書設計編、土木学会、1991. 9