

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246101

研究課題名(和文) 材料構成則と部材変形解析に基づく建築骨組の損傷制御型構造・耐火調和設計法の開発

研究課題名(英文) Development of Structural Design Procedure of Buildings Harmonizing Damage Control Seismic Design and Fire Design Based on Constitutive Laws of Materials and Deformation Analyses

研究代表者

西山 峰広 (Nishiyama, Minehiro)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50183900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 24,200,000円、(間接経費) 7,260,000円

研究成果の概要(和文)：建築物が火災時に崩壊・倒壊しないように設計するため、さらには、火災による部材の損傷状態を予測するため、鋼材とコンクリートという構造材料について、高温下での力学性状を調査した。特に、これらの材料間の付着-すべり関係をモデル化した。さらには、梁と柱部材とそれらの接合部からなる簡単な骨組の耐火実験を行い、部材間の相互作用、接合部の性状を把握し、材料の挙動モデルに基づく数値解析を行い、耐火性能を評価した。また、小さな炉において柱梁骨組を効率的に試験する方法も開発した。最後に、地震や経年劣化によってひび割れた鉄筋コンクリート部材の耐火性を、耐火実験と数値解析により調査した。

研究成果の概要(英文)：Steel and concrete as structural materials used for buildings were investigated at elevated temperatures, to design building structures not to collapse, and to predict damage on structural members during and after fire. Stress-strain relationships of these materials, and their bond-slip relationships were idealized on the basis of experiments and numerical analyses. Beam-column assemblages were tested at elevated temperatures. The results were compared with the numerical analysis ones. A new test method using a small furnace was developed for a beam-column subassembly. Finally, an influence of crack on temperature distribution in reinforced concrete members was experimentally and analytically studied.

研究分野：建築学

科研費の分科・細目：建築環境・設備

キーワード：耐火 鉄筋コンクリート 鉄骨 高温 付着 ひび割れ 設計

1. 研究開始当初の背景

現在、耐火設計は、構造設計からは独立している。例えば鉄筋コンクリート構造では、かぶり厚さは、耐久性と施工性から定まるのに対して、耐火設計では必要耐火時間を満足するように決定される。現行の構造設計に温度と時間を変数として加えることにより耐火設計と耐久設計を、それぞれ構造設計と統合して行うことができるようになる。

必要耐火時間は、建物内にいる人々が安全に避難するのに必要となる時間である。この間部材は、長期荷重下において、避難に支障があるような大きな変形をせず、また、破壊してはならない。

部材などの耐火時間を実験的に得るための耐火性能実験において ISO では、終局時として部材の変形と変形速度を規定している。部材変形の限界値は、部材の剛性低下を、また、変形速度の限界値は、部材剛性の低下の速度（時間に対する割合）を示している。これらの挙動は、材料の剛性低下と破壊に起因している。部材を構成する一部の材料の応力-ひずみ関係における剛性が低下する場合、その材料の部分の影響が大きくなり、部材全体の荷重-変形関係が負勾配とならなければ、部材は長期荷重を支持することができる。マクロ的には崩壊機構が形成されるかどうかによる。

地震により生じる損傷程度は、地震動の特性、建物の振動特性、強度、変形性能によって決まる。鉄筋コンクリート造建築物の損傷は、ひび割れ幅、コンクリート剥離、鉄筋降伏、コンクリート圧壊、鉄筋座屈・破断など、構成材料である鉄筋とコンクリートの状態によって評価される。

さらには経年劣化による損傷は、コンクリートのひび割れと剥離、鉄筋の腐食と断面減少に伴う耐力劣化という観点で評価される。

これら、耐久性、耐震性に対する設計を耐火設計と調和させる合理的な設計は、ニュージーランドなど一部諸外国では見られるが、我が国ではなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、建築構造材料、特に、鋼材とコンクリートおよびそれらの付着について、その高温時における力学的性状を調査し、構成則をモデル化することにある。また、梁、柱など部材の耐火実験を行うことにより、高温時における変形や強度を調べ、材料の構成則モデルを使用しての評価を行う。さらには、いくつかの部材と接合部からなる簡単な骨組の耐火実験を行い、部材間の相互作用、接合部の性状を把握し、これに対しても材料の構成則モデルに基づく解析を用いての評価を行う。以上より、材料特性に基づく、構造部材、構造要素および骨組の火災時挙動、特に強度と変形を予測する手法を開発する。とともに、限定された形状の炉において構造骨組を効率的に試験する方法の開発を行う。

最終的に、外力、時間および温度をパラメータとした、材料あるいは部材レベルでの損傷に着目した、損傷評価型の鉄筋コンクリート構造および鉄骨造建築物に対する構造設計と耐火設計を調和した設計法を提案するための基礎データを得る。

3. 研究の方法

研究は、材料、材料間のインターフェイス、部材、および架構それぞれのレベルで実施した。コンクリート材料と鉄筋についての研究は多く、過去の研究を参照できるため、本研究では、材料間のインターフェイスとして、コンクリートと鉄筋間の付着-すべり特性に着目し、実験的、解析的に検討した。

これらと並行して、不静定骨組の耐火実験を床・梁炉で行う方法を開発した。

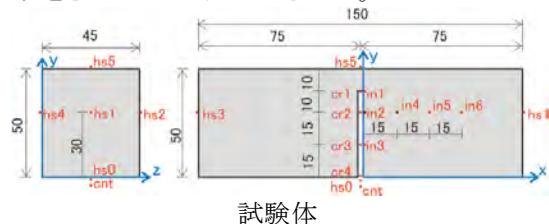
また、コンクリートにとって不可避のひび割れが耐火性能に及ぼす影響を調査した。これには、小型の直方体を用いた加熱実験と、実物の 1/2~1/3 スケールの梁試験体を用いた加熱実験を行った。

コンクリート系構造だけでなく、鉄骨造についても研究を行った。すなわち、鉄骨造不静定骨組の耐火試験を行い、鋼構造骨組に生じる変位とひずみ、加熱部材の熱膨張を非加熱部材が拘束することによる影響に関するデータを得た。

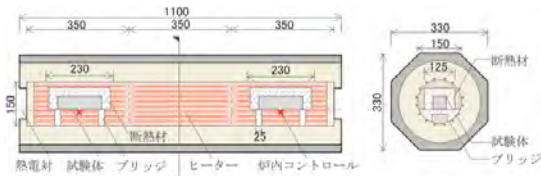
以下、各研究内容の詳細を記す。

(1) 付着構成則のモデル化：コンクリートからの鉄筋引き抜き試験と有限要素解析に基づき、fib Model Code に記載の常温時付着応力-すべり関係を高温時まで適用可能となるように拡張した。鉄筋引き抜き試験では、常温および 100°C から 600°C まで 100°C 刻みで試験温度を設定した。コンクリート強度についても目標強度を 20 N/mm² と 40 N/mm² の 2 種類とした。また、鉄筋とコンクリートのインターフェイス周辺を詳細にモデル化した有限要素解析を行い、コンクリートと鉄筋の高温時におけるヤング係数と強度低下が付着応力-すべり関係劣化につながるメカニズム解明への基礎資料を得た。

(2) ひび割れがモルタル内温度分布に与える影響：鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅と部材内温度分布との関係を調べるために、50×45×150mm のモルタル直方体中央部に 0~5mm 幅のひび割れを、テフロンシートを挟み込むことにより生じさせた。



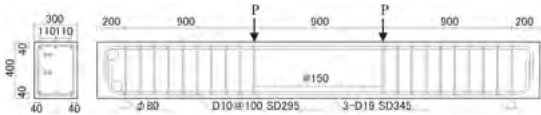
試験体



炉内試験体配置

要素内部温度を測定した結果、ひび割れ幅位置での内部温度上昇が確認された。

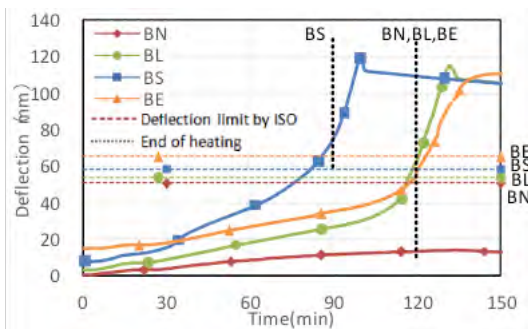
(3) ひび割れが鉄筋コンクリート梁の耐火性に与える影響：断面 $300 \times 400\text{mm}$ で、支点間距離 $2,700\text{mm}$ の鉄筋コンクリート梁に対して、鉛直荷重を加えることにより 150mm 間隔でひび割れを生じさせ、そのまま加熱し、梁内の温度分布を調べた。ひび割れは、 150mm 間隔で底辺 10mm 、高さ 5mm の三角形のノッチを設けることによって誘発させた。試験体は、無荷重の梁、長期荷重、短期荷重をそれぞれ加えた梁、および、梁変形角 $1/50$ まで変形させた後、長期荷重まで除荷した梁の全部で 4 体である。



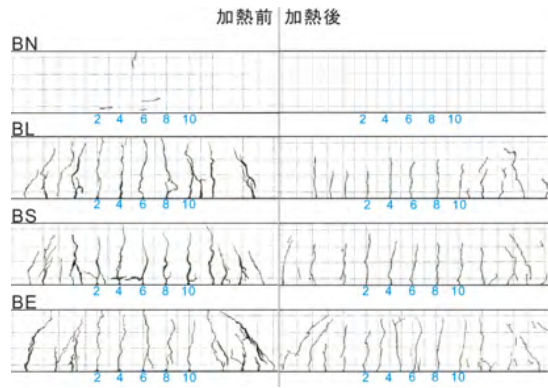
梁試験体



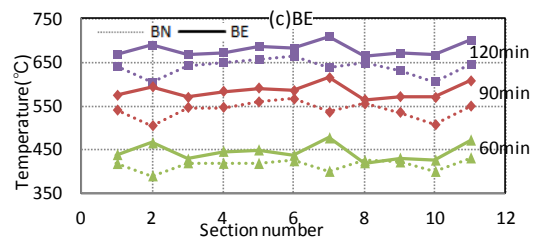
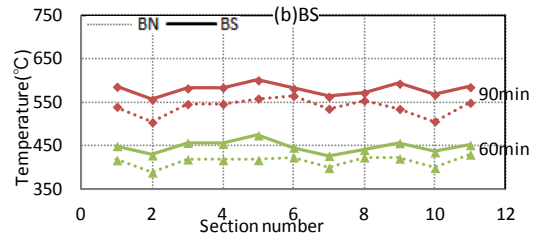
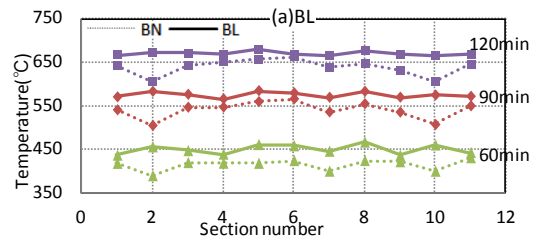
熱電対配置状況



加熱時間に対するたわみの推移

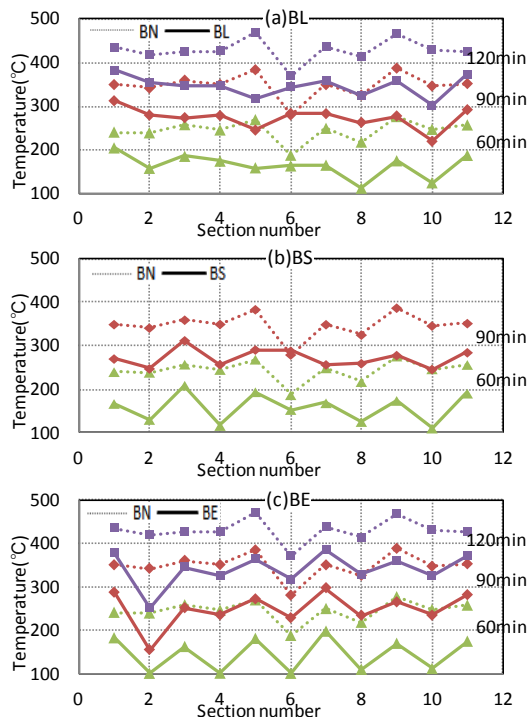


加熱前後のひび割れ状況



断面下端隅角部主筋位置における材軸方向の内部温度分布

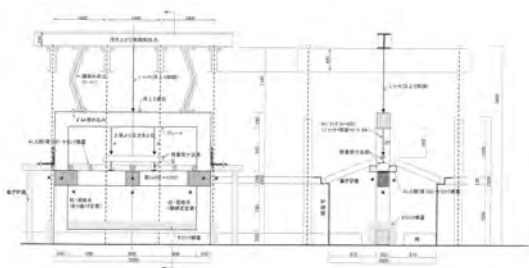
梁断面隅角部鉄筋位置では、ひび割れがある断面での温度が、ひび割れの無い断面での温度を最大で 90°C 上回った。一方、梁断面中央上下鉄筋位置では、ひび割れの無い断面の方が最大で 118°C 高い温度となった。



断面下端中央主筋位置における
材軸方向の内部温度分布

(4) 床・梁炉における骨組試験法の開発：梁柱接合部など部材同士の接合部の高温時における挙動、および、梁の軸方向への熱膨張を柱が拘束する影響などを検討するためには、柱梁骨組に荷重を行った状態での耐火試験を行う必要がある。これには大規模な炉が必要となるため、容易に行うことができない。

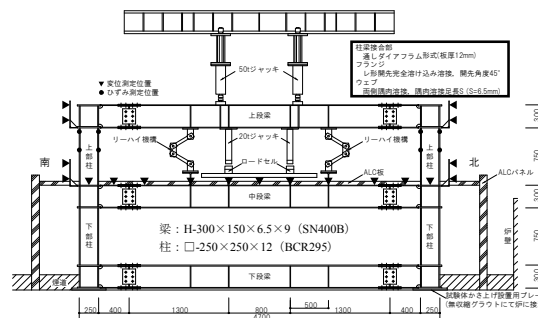
本研究において提案した方法では、梁に長期荷重を載荷した状態で、梁、柱およびそれら接合部の耐火試験を、床・梁炉において行うことができる。



不静定骨組の床・梁炉における耐火試験

(5) 鋼構造不静定骨組の火災時挙動：鋼構造骨組に生じる変位とひずみ、加熱部材の熱膨張を非加熱部材が拘束することによる影響に関するデータを得ることなどを目的として、鋼構造不静定骨組に対して荷重加熱実験を行った。ここでは、本研究において開発した、荷重しながら不静定骨組の耐火試験が実施できる試験方法を用いた。その結果、

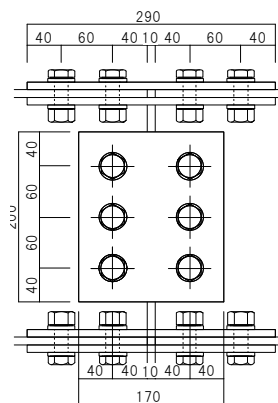
中段梁の材軸方向の温度分布は、中央部に比べ、高力ボルト継手部では8割程度の温度となり、端部では最高温度で200°C程度低い温度となった。



鉄骨不静定骨組試験体

フランジ
高力ボルト F10T-M16、首下55mm
添え板(外)：PL-9×150×290
添え板(内)：2PL-9×60×290

ウェブ
高力ボルト F10T-M16、首下50mm
添え板：2PL-6×170×200



高力ボルト摩擦接合継手

4. 研究成果

本研究から以下のような成果が得られた。

(1) コンクリート円柱から鉄筋を引き抜くという付着試験の結果に基づき、コンクリートと鉄筋間の付着-すべり特性のデータを得た。これらデータと fib Model Code 記載の常温での付着-すべり関係モデルに基づき、高温下での付着-すべり特性モデルを提案した。

(2) テフロンシートによりひび割れを作製した直方体試験体の加熱実験における要素内部温度測定結果から、ひび割れ幅位置での内部温度上昇が確認された。

(3) ノッチにより150mm間隔でひび割れを作製した鉄筋コンクリート梁試験体に対する加熱試験からは、梁断面隅角部鉄筋位置では、ひび割れがある断面での温度が、ひび割れの無い断面での温度を最大で90°C上回った。一方、梁断面中央上下鉄筋位置では、ひび割れの無い断面の方が最大で118°C高い温度となった。試験体内における水分移動が温度分布に影響を与えていると推測されるが、

これまで実験データがなかったため、さらなる実験データの蓄積と、解析的検討が必要である。

(4) 床・梁炉において長期荷重を載荷した構造骨組の耐火試験を行う方法を開発した。

(5) 鋼骨組を対象とした載荷加熱実験より、以下が明らかになった。

(a) 鋼骨組の中段梁のたわみ量が IS0834 の限界値付近になっても、柱梁接合部の損傷は見られず、継手部の高力ボルトも破断しなかった。

(b) 鋼骨組上部柱に生じる剪断力は、中段梁の温度が 500℃位に達するまで増大し、荷重支持能力を失う時点ではほぼ消滅した。

(c) 骨組内部にある梁の限界温度は本実験では梁ウェブの剪断崩壊で決まり、単純梁については梁中央の曲げ崩壊で決まった。両者とも、計算値と実験値は概ね一致した。

(d) 鋼梁の受熱温度が 500℃位の場合においては、冷却後における剛性低下は見られなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

① 富永 暖子、西山 峰広、坂下 雅信、高温におけるコンクリートと鉄筋の付着-すべり関係に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、35 巻、2013、1159-1164

② Takeo Hirashima, Kazuma Okuwaki, Xuansu Zhao, Yuki Sagami and Koji Toyoda, An Experimental Investigation of Structural Fire Behaviour of a Rigid Steel Frame, Fire Safety Science - The 11th International Symposium, Christchurch, New Zealand, Feb. 10 - 14, 2014. (reviewed)

③ M. M. RAOUFFARD, A. TOMINAGA, M. NISHIYAMA, M. SAKASHITA, Temperature distribution on cracked mortar prisms in fire conditions, JCI (Japan Concrete Institute) Annual Convention Proceedings, July 2014 (reviewed, to be published)

[学会発表] (計 10 件)

① 林成俊、大田周平、阪口明弘、田中義昭、田坂 茂樹、谷昌典、原田和典、西山峰広、鉄筋コンクリート柱梁接合部を有する不静定ラーメン架構の耐火実験：その 1～3、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、A-2, pp. 21-26

② 西山峰広、松田司、林成俊、谷昌典、鉄筋コンクリート造ト型部分架構の耐火実験(その 1～2)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、A-2, pp. 209-212

③ 富永暖子、坂下雅信、大西志拓、西山峰広、高温におけるコンクリートと鉄筋の付着-すべり関係に関する研究(その 1～2)、日

本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、A-2, pp. 881-884

④ 平島 岳夫、奥脇 一馬、相模 裕輝、豊田 康二、鋼構造骨組の火災時挙動に関する実験(その 1～4)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、2013 年、北海道大学

⑤ 平島 岳夫、奥脇 一馬、趙 玄素、相模 裕輝、豊田 康二、火災加熱時とその冷却時における鋼構造骨組の挙動、日本火災学会 2013 年度研究発表会、2013 年、熊本大学

⑥ 網倉 彩乃、M. Mahdi Raouf、松田 司、坂下 雅信、原田 和典、西山 峰広、鉄筋コンクリート部材の耐火性に対するひび割れの影響(その 1～3)、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、2014 年、神戸大学

⑦ Minehiro Nishiyama, Research, Design and Construction of Precast Floor Systems in Japan, 2013 PCI Convention and National Bridge Conference, 2013 年、アメリカ

⑧ Minehiro Nishiyama, Precast Concrete Research, Design and Construction in Japan, Third Brazilian Meeting on the Integration of Research, Design, Production in the Field of Precast Concrete, 2013 年、ブラジル

⑨ Minehiro Nishiyama, Precast Concrete Research, Design and Construction in Japan, Department Seminar in Civil & Natural Resources Engineering of University of Canterbury, 2014 年、ニュージーランド

⑩ RAOUFFARD M, NISHIYAMA M, SAKASHITA M, External reinforced concrete beam-column subassemblages in fire, New Zealand annual conference on earthquake engineering, Auckland, P41, Mar. 2014.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西山 峰広 (NISHIYAMA, Minehiro)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50183900

(2) 研究分担者

平島 岳夫 (HIRASHIMA, Takeo)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20334170

河野 進 (KONO, Susumu)

東京工業大学・

応用セラミックス研究所・教授

研究者番号：30283493

原田 和典 (HARADA, Kazunori)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90198911

坂下 雅信 (SAKASHITA, Masanobu)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50456802

谷 昌典 (TANI, Masanori)

独立行政法人建築研究所・

構造研究グループ・研究員

研究者番号：50533973

(3) 連携研究者

()

研究者番号：