

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301  
研究種目：基盤研究（A）  
研究期間：2008～2011  
課題番号：20246090  
研究課題名（和文） 構造機能維持および超早期復旧を可能にする建築構造システムの構築  
研究課題名（英文） Building structural system to maintain structural functions during earthquakes and rapid recovery afterward  
研究代表者  
田中 仁史 （TANAKA HITOSHI）  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：20132623

## 研究成果の概要（和文）：

部材実験と解析モデルに基づいて、損傷制御型の高性能 RC 造構造システムを構築した。この成果として、NEES/E-Defense 日米共同研究コンクリート系実大建物実験研究の位置づけて、実大高性能 RC 造建物の振動台実験を行った。この実大実験では、1 階の PC 柱および PC 壁の脚部コンクリートが、プレストレスカと転倒モーメントによる付加曲げによって高圧縮状態となり、圧壊による損傷を受けたため、骨組剛性が大きく低下した。しかし、その他の性能は既存の RC 造建物に比較して機能維持・早期復旧に関して大変優れていることが証明された。

## 研究成果の概要（英文）：

A high performance RC building structural system has been constructed in order to maintain structural functions based on experiments and numerical analyses. To conclude the works in the project, a real scale four story post-tensioned precast concrete building was tested on the E-defense shaking table as a part of the collaborative US-Japan project. The structure shows excellent performance for various intensity of simulated earthquakes. Interstory drifts were minimal during the shaking and residual displacements and cracks were almost zero to achieve a damage control system. Unfortunately, the stiffness decreased dramatically for a Level 2 earthquake since bases of columns and walls had spalling of cover concrete. However, it was confirmed that the stiffness degradation could have been prevented by supplying fiber reinforced concrete at bases of columns and walls.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	15,500,000	4,650,000	20,150,000
2009 年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2010 年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011 年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
総計	36,500,000	10,950,000	47,450,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：コンクリート構造, 耐震工学, 損傷制御

## 1. 研究開始当初の背景

1981年の新耐震設計法の基本方針は、中小地震に対しては建物の継続利用を目指し、大地震に対しては構造物の倒壊を防止することであった。しかし、ここ10年間に発生した都市型地震の被害をみると、構造物の安全性確保が重要であることはもちろんだが、さらに損傷をできれば修復不要なレベルまで低減し、建物の機能維持・早期復旧を図ることが、社会一般が求める耐震性能であると考えられる。これは、住宅・集合住宅の財産価値の確保、病院などの緊急用施設の耐震性向上など、時代の要求が新耐震設計法の基本方針から抜け出すものになっていることを示す。

そこで、本研究では制振デバイスとPC構造を組み合わせ、地震時の応答および地震後の残存性能を設計者の意図するように制御することで、建物の機能維持・早期復旧を図る方法を構築するものとする。

## 2. 研究の目的

適切な制振部材を配してエネルギー消費性能を確保しつつ、プレストレス力で地震後の自己修復性を確保するPC造構造形式を確立する。この構造形式を用いて、地震時の耐震性能を向上させ、かつ地震後の部材損傷を最小限とすることが可能である建物の開発を行い、「建物の機能維持・早期復旧」を実現するための設計法を構築する。

- 自己修復性（残留変形を残さない。）に優れたPCaPC造建物に、配置が容易で安価な地震時のエネルギー消費デバイス（当研究グループで開発した波型鋼板やダンパーケーブル等の履歴型ダンパー）を組み込み、建物の機構維持および早期復旧を可能とする構造システムを数種類提案し、その性能を確認する。
- 提案した構造形式を有する架構の載荷実験を行い、エネルギー消費性能が十分大きいこと、残留変形が十分小さいこと、また、骨組自体のコンクリートのひび割れや圧壊・鉄筋座屈等の損傷が十分に低減されていることを確認する。
- 実験で得られた挙動を計算機上で追跡できる数値モデルを提案し、このモデルを用いて提案する構造システムを有する建築構造物の地震時応答予測を行い、各限界状態における性能評価を行う。さらに、提案する構造システムを有する建物を日本で設計する場合に必要な、地震力及び強度・変形能力の評価を行うための基礎資料を整備する。
- 確立された構造システムの想定地震に

対する損傷を予想し、構造物の機能低下程度、また復旧のコスト・時間を予想し、これらが社会的要求に十分合致することを検証する。同時に、地震で実際に被災した場合の損傷度を評価して残存性能を定量化し、これを被災後の補修設計・施工に生かすためのデータの集積及びモデル化を行う。

建物の用途・重要度に応じて、損傷構造物の復旧シナリオが変更できるような、損傷制御方法を提案する。

## 3. 研究の方法

### 3. 1

PCaPC部材のせん断性状を把握することを目的として、13体のPCaPC柱および梁の静的載荷実験を行った。実験変数はコンクリート強度(60MPa, 130MPa)せん断補強筋比( $p_w = 0.32\%$ ,  $0.63\%$ )、せん断補強筋強度( $w_{fy} = 785\text{N/mm}^2$ ,  $1275\text{N/mm}^2$ )、PC鋼棒の種類(丸鋼、異型)の4種類とした。高性能材料を用いたPCaPC柱では、試験体の破壊性状はせん断補強筋比の違いにより、曲げ耐力に到達後のせん断破壊および曲げ破壊に分類された。一方PCaPC梁の試験体では、最大耐力時にはPC鋼材の降伏が確認された。 $p_w = 0.21\%$ の試験体では、終局時に曲げひび割れから斜めに発展した斜張力ひび割れの発生により耐力が大幅に低下した。 $p_w = 0.42\%$ の試験体では、最大耐力に到達するまではせん断補強筋が $0.21\%$ の試験体とほとんど同じ破壊性状を示した。最大耐力に到達後、 $R = 9.0\%$ でせん断ひび割れが発生するまで、耐力の低下がほとんどない典型的な曲げ型の損傷が進展した。また、PC鋼棒のひずみ分布から丸鋼及び異型鋼棒の付着性状を確認し、この影響を考慮して曲げ強度計算する方法を提案した。その結果、丸鋼を用いた試験体では10%未満、異型鋼棒を用いた試験体では5%未満の精度で曲げ耐力を評価することができた。

当研究グループで開発した波型鋼板(図2)およびダンパーケーブルを、高性能PCaPC構造に組み込むための準備として、解析モデルを構築しパラメトリックスタディーを行なった。PCaPC柱および梁、さらにダンパー部材の履歴性状をモデル化し、既存の実験結果の時刻歴応答を追跡した。その結果、柱梁接合部やダンパー取付部など接合部における剛性評価と、PC鋼材の付着の影響を履歴復元力モデルに反映させることの2点が重要であることが分かった。

### 3. 2

785MPa級のせん断補強筋を用いたPCaPC部材のせん断性状を把握することを目的として、8体の柱および梁の逆対称せん断載荷実験を行った。

柱4体の実験変数はせん断補強筋公称降伏強度 ( $f_y=295, 785 \text{ MPa}$ ), せん断補強筋強度とせん断補強筋比の積 ( $p_w \cdot f_y=1.25, 2.49 \text{ MPa}$ ) の2種類とした。PCaPC柱では、試験体の破壊性状はせん断補強筋比と強度の違いにより、せん断引張破壊、せん断圧縮破壊および斜張力破壊に分類された。最大耐力時のせん断補強筋のひずみを見ると、高強度せん断補強筋を用いた試験体では、せん断補強筋の負担する応力が鋼材の降伏強度に達しておらず、せん断補強筋の降伏強度の差が最大耐力に反映されなかったものと考えられる。各試験体について曲げ終局強度を算定したところ、いずれの試験体においても曲げ終局強度算定値は最大耐力実験値を上回った。これは、各試験体の破壊モードがせん断型であることと整合する。

梁4体の実験変数は、せん断補強筋比 ( $p_w=0.00\%, 0.10\%, 0.21\%$ ), せん断スパン比 ( $a/D=1.0, 1.5$ ) の2種類とした。実験では2種類の破壊形式が確認された。せん断補強筋比が小さい試験体 ( $p_w=0.00\%, 0.10\%$ ) では、部材の両端圧縮部を結ぶ対角線上にせん断ひび割れが発生すると同時に、急激に耐力が低下する、せん断斜張力破壊が見られた。一方、せん断補強筋比が大きい試験体 ( $p_w=0.21\%$ ) では、せん断ひび割れ発生によって、せん断補強筋のひずみが増加し始め、終局時にはせん断補強筋が降伏して最大耐力に到達するせん断引張破壊が破壊形式となった。せん断斜張力破壊を起こした3体のうち、せん断補強筋が無い試験体に関しては、靱性保証型耐震設計指針・同解説記載のせん断ひび割れ強度式で計算したせん断ひび割れ強度で最大耐力の評価ができた。

### 3. 3

適切な制振部材を配してエネルギー消費性能を確保しつつ、プレストレス力で地震後の自己修復性を確保するPC造構造形式を確立する。この構造形式を用いて、地震時の耐震性能を向上させ、かつ地震後の部材損傷を最小限とすることが可能である建物の開発を行い、「建物の機能維持・早期復旧」を実現するための設計法を構築する。

他の構造では取り入れられている性能設計をプレストレスコンクリート(以下、PC)造にも取り入れるために、性能設計の考え方

を取り入れた指針の作成が必要である。そこで、断面解析によるPC構造部材の性能検証を行い、4つの限界状態(使用限界, 修復限界Ⅰ, 修復限界Ⅱ, 安全限界)に達するときの変形角および要因を考察した。その結果、おおむねPC鋼材や普通鉄筋に先んじて、コンクリートが4つの限界状態に達した。また、煩雑な材料レベルの限界状態決定条件を用いず、材端回転角のみで限界状態が決定できること示した。

また、NEES/E-Defense日米共同研究コンクリート系実大建物実験研究「高性能鉄筋コンクリート造建物の開発研究」において、実大高性能RC造建物の振動台実験に参画した。この実大実験では、1階のPC柱およびPC壁の脚部コンクリートが、プレストレス力と転倒モーメントによる付加曲げによって高圧縮状態となり、圧壊による損傷を受けたため、骨組剛性が大きく低下した。しかし、その他の性能は既存のRC造建物に比較して機能維持・早期復旧に関して大変優れていることが証明された。

### 3. 4

50%寸法のPCaPC造柱モデル試験体の静的載荷実験を行い、せん断剛性・せん断ひび割れ・曲げによるコンクリートの圧壊点などに加え、せん断ひび割れの本数と幅を測定し、層間変形角との相関関係を実験的に明らかにした。得られた実験結果は、日本建築学会性能評価指針因で提案された方法を用いた計算値と比較した。剛性や耐力に関しては、良い精度で予測できたが、ひび割れの本数と幅に関しては、軸力やプレストレス力の影響を考慮した予測式の必要性が改めて認識された。

685N/mm<sup>2</sup>級の主筋と150N/mm<sup>2</sup>級のコンクリートを用いて作成したRC部材実験において、ひび割れ強度・テンションスティフニング効果・平均ひび割れ幅やひび割れ間隔が、コンクリートの収縮ひずみに対する鉄筋の拘束の影響を受けることがわかった。

柱梁曲げ強度比が1.0~2.0の範囲の幅広い実験を行いL型柱梁接合部、柱基礎ばり接合部などの耐震実験を実施し、構造性能を確認した。

また、NEES/E-Defense日米共同研究コンクリート系実大建物実験研究「高性能鉄筋コンクリート造建物の開発研究」における実大高性能RC造建物の振動台実験結果を用いて、PCaPC造耐震壁におけるひび割れを中心とした損傷状況の進展状況を、デジタル映像を用いて解析した。層間変形角が大きくなると、

静的ひび割れ状況と動的ひび割れ状況に違いが見られた。層間変形角が大きくなった場合には、動的効果を考慮した評価法が必要であることが示された。

### 3. 5

鉄筋コンクリート (RC) 造ラーメン構造では、現行の柱梁接合部の耐震規定 (例えば、建築学会の靱性保証型耐震設計指針) を満たしても、柱梁曲げ強度比が 1.0 に近い場合には柱梁接合部にせん断破壊が生じることが解明され、従来の方法に代わる新しい柱梁接合部の構造性能評価法の確立が急務とされている。そこで、柱梁曲げ強度比が 1.0 ~ 2.0 の範囲の幅広い実験を行い柱梁接合部の構造性能を確認した。2008 年度には主として十字形柱梁接合部の実験を、2009 年度には主として T 形柱梁接合部の実験を、2010 年度には、多様なバリエーションを、2011 年度には、L 型柱梁接合部、柱基礎ばり接合部などの耐震実験を実施した。

### 3. 6

685N/mm<sup>2</sup>級の主筋と 150N/mm<sup>2</sup>級のコンクリートを用いて作成した鉄筋コンクリート部材に関し、コンクリートの長期的な収縮挙動が部材の構造性能に与える影響を調べることを目的として、実験的に検討を行ったものである。その結果、ひび割れ強度、テンションスティフニング効果、平均ひび割れ幅やひび割れ間隔などは、自己収縮ひずみに対する鉄筋の拘束の影響を受けることがわかった。

### 4. 研究成果

様々な、部材実験と解析モデルに基づいて、損傷制御型の高性能 RC 造構造システムを構築した。この成果として、NEES/E-Defense 日米共同研究コンクリート系実大建物実験研究の位置づけて、実大高性能 RC 造建物の振動台実験を行った。この実大実験では、1 階の PC 柱および PC 壁の脚部コンクリートが、プレストレス力と転倒モーメントによる付加曲げによって高圧縮状態となり、圧壊による損傷を受けたため、骨組剛性が大きく低下した。しかし、その他の性能は既存の RC 造建物に比較して機能維持・早期復旧に関して大変優れていることが証明された。

### 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 36 件)

1. 長江拓也, 田原健一, 福山國夫, 松森泰造, 塩原等, 壁谷澤寿海, 河野進,

西山峰広, 西山功: プレストレストコンクリート造建物の耐震性能評価と向上に関する E-ディフェンス振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 77, 671, pp. 75-84, 2012.

2. Hitoshi Shiohara. (2012). Reinforced Concrete Beam-column Joints : An Overlooked Failure Mechanism. ACI Structural Journal, Vol. 109, No. 1, January-February, 2012, pp. 65-74.
3. 長江拓也, 田原健一, 福山國夫, 松森泰造, 塩原等, 壁谷澤寿海, 河野進, 西山峰広, 西山功: 4 階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 76, 669, pp. 1961-1970, 2011.
4. 狩野芳規, 河野進, 岸本一蔵: 断面解析に基づく曲げ降伏先行型 PC 梁部材の性能評価, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, PCEA, pp. 97-102, 2011.
5. 内山元希, 坂下雅信, 河野進, 西山峰広: せん断破壊する PCaPC 柱の破壊モードとせん断耐力評価, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, PCEA, pp. 85-90, 2011.
6. Kono S., Inada K., Sakashita M., Sato Hisataka: Lateral Load Resistance of L-Shaped Core-Walls for Tall Buildings, 3rd International fib Congress, , Washington DC, USA, Paper #613, 2010.
7. 佐藤幸博 (フジタ), 高森直樹 (フジタ), 寺岡勝: 材齢 1 年における超高強度コンクリート中の鉄筋の付着特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No. 2, pp. 595-600, (2010)
8. Ichioka Y., Kono S., Nishiyama M., Watanabe F.: Hybrid System Using Precast Prestressed Frame with Corrugated Steel Panel Damper, Journal of Advanced Concrete Technology, JCI, Vol. 7, No.3, pp. 297-306, 2009.

[学会発表] (計 53 件)

1. 松森泰造, 長江拓也, 田原健一, 福山國夫, 塩原等, 壁谷澤寿海, 河野進, 西山峰広, 西山功: 鉄筋コンクリート造建物とプレストレストコンクリート造建物に関する実験概要その 1~その 6, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系, C2, pp. 795-806, 2011 年 8 月 23 日, 早稲田大学.

2. 内山元希, 八田有輝, 坂下雅信, 河野進, 西山峰広: 高性能材料を用いたPCaPC 柱のせん断耐力評価 (その1 実験概要) (その2 実験結果と考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系, C2, pp. 843-846, 2011年8月23日, 早稲田大学.
3. 坂下雅信, 土井公人, 岡田勇佑, 河野進, 田中仁史, 加藤博人, 諏訪田晴彦, 福山洋: 偏在開口を有するRC造連層耐震壁のせん断性状に関する研究 (その6: 第3シリーズの実験概要・結果) (その7: FEM解析, 計算式によるせん断耐力評価) (その8: 残留せん断ひび割れ幅の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系, C2, pp. 361-366, 2010年9月9日, 富山大学.
4. 寺岡 勝, 高森直樹 (フジタ): 材齢1年における超高強度コンクリートの付着特性, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第33巻, CD-ROM, 2010年3月5日, 徳山工業高等専門学校.

研究者番号: 40313837  
坂下雅信 (SAKASHITA MASANOBU)  
京都大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 50456802  
塩原等 (SHIOHARA HITOSHI)  
京都大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 50272365  
寺岡勝 (TERAOKA MASARU)  
呉高等専門学校・建築学科・教授  
研究者番号: 60442464

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.rc.archi.kyoto-u.ac.jp/>

<http://www.rcs.arch.t.u-tokyo.ac.jp/main/sutaffu.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中仁史 (TANAKA HITOSHI)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号: 20132623

### (2) 研究分担者

西山峰広 (NISHIYAMA MINEHIRO)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号: 50183901

河野進 (KONO SUSUMU)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 30283493

田村修次 (TAMURA SHUJI)

京都大学・防災研究所・准教授