

機関番号：14301  
 研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20360252  
 研究課題名 (和文) 高強度高性能材料を用いた鉄筋コンクリート造建築構造物の  
 損傷制御型設計法の確立  
 研究課題名 (英文) Damage-controlling prestressed precast concrete building system  
 using high performance materials  
 研究代表者  
 河野 進 (KONO Susumu)  
 京都大学大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：30283493

研究成果の概要 (和文)：曲げおよびせん断が卓越する PCaPC 造柱 16 体および梁 11 体のモデル試験体を用いた実験を行い、曲げ性状・せん断性状を把握した。曲げ降伏・せん断斜張力破壊・せん断破壊についてのそれぞれの耐力予測式を組み合わせ、最終の破壊モードと耐力を精度良く予測する方法を提案した。また、プレキャストプレストレスト実大架構実験とモデル解析から、高性能材料を用いた損傷制御型 PCaPC 造架構の高い耐震性能を確認できた。

研究成果の概要 (英文)：Sixteen column and eleven beam model specimens with high performance materials were tested to investigate their flexure and shear behaviors. Their failure mode and capacity can be simulated by combining proposed assessment procedures. Test results and numerical simulation of two post-tensioned precast portal frame model specimens proved the effectiveness of damage controlling prestressed precast building system using high performance materials.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2008年度 | 7,700,000  | 2,310,000 | 10,010,000 |
| 2009年度 | 3,500,000  | 1,050,000 | 4,550,000  |
| 2010年度 | 3,500,000  | 1,050,000 | 4,550,000  |
| 総計     | 14,700,000 | 4,410,000 | 19,110,000 |

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

#### 1. 研究開始当初の背景

建物の耐震設計の動向は、地震による建物倒壊を防止するのみでなく、建物の振動を極力抑え、建物損傷、什器や設備機器損傷を軽減し、建物の継続使用を可能とする方向に向かっている。これを実現するための損傷制御型構造物は、柱・梁で構成される骨組みの弾性バネとエネルギー消費を行うダンパーが存在する並列システムとすることが、性能と価格の面で最適であると考えられる。並列システムでは、弾性バネとダンパーが独立して機能を発揮することにより、免震建物以上にエネルギー消費効率をあげることが可能と

なる。ここで、弾性バネで表現される骨組みは極力弾性変形をさせ、ダンパーは効率よく地震エネルギーを消費させなければならぬ。ダンパーには筋違い型、せん断パネル型、間柱型などこれまで様々な形式のものが提案され実用化されている。しかし、弾性バネとして表現される骨組みにはあまり注意が注がれてこなかった。エネルギー消費をダンパーで行う前提であれば、弾性バネは大きな復元性を有し、かつ適切な剛性を有しながら常に弾性挙動をする材料は損傷が軽減できて良い。この意味でコンクリート圧縮強度で 120MPa、鉄筋降伏強度で 500MPa を超えるよ

うな超高強度材料を用いたコンクリート造部材（以後 UHPRC Ultra High Performance Reinforced Concrete）は弾性バネ要素として最適であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、建築分野において超高層集合住宅下層階柱や連層耐震壁下層部にしか用いられてこなかった UHPRC 要素を、積極的に損傷制御設計での中核的要素として改めて見直す。

コンクリート強度で 100MPa 以上、鉄筋降伏強度で約 500MPa 以上の超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート（UHPRC）架構に高性能材料を用いたダンパーを付与した損傷制御型建築構造物システムを開発する。特に、拘束効果、曲げ・せん断特性、変形性能などの基本性状の把握と損傷評価法の確立、UHPRC を用いた損傷制御型建物の構築に焦点を当てる。

## 3. 研究の方法

曲げおよびせん断が卓越する柱や梁において、変形に伴う損傷状態の把握を目的とした載荷実験を行い、UHPRC 柱の基本性状を把握し、予想モデルの構築に必要なデータを蓄積した。他研究機関で行われた実験結果と合わせデータベースを構築し、このデータベースに基づいて、UHPRC 部材の力学的基本挙動を模擬し損傷予測が可能な解析モデルを提案した。また、準備研究で開発した波形鋼板ダンパーやダンパーケーブルに高性能材料を適用して、ダンパー性能の向上を図り、最終年度には、損傷制御型構造物の弾性要素として UHPRC 架構を有する建物部分モデルの載荷実験を行い、蓄積したデータに基づいた解析モデルの妥当性を確認する。

## 4. 研究成果

### (1) 高強度材料を用いた PCaPC 造部材の曲げおよびせん断性状把握と耐力予測

曲げおよびせん断が卓越する PCaPC 造柱や梁のモデル試験体を用いた実験を行い、曲げ性状・せん断性状を把握した。柱 16 体(2008 年に 6 体, 2009 年度に 4 体, 2010 年度に 6 体), 梁 11 体(2008 年に 7 体, 2009 年度に 4 体)の合計 27 体の試験体は、コンクリート圧縮強度 (60MPa~170MPa), せん断補強筋降伏強度 (295MPa~1275MPa), せん断補強筋比 (0%~0.84%), PC 緊張材の種類 (丸鋼, 異形鋼棒, マルチストランド) を主な実験変数とした。部材実験結果および耐力予測に関して以

下の結論を得た。

- ① 最終破壊モードは、曲げ破壊とせん断破壊に分類される。曲げ破壊は、曲げ降伏後の曲げ破壊【F】である。せん断破壊は、曲げ降伏後のせん断破壊【FS】、せん断補強筋降伏後のせん断破壊【ST】、せん断補強筋未降伏のせん断破壊【SC】、せん断補強筋未降伏でかつひずみがほぼ 0 のせん断斜張力破壊【DT】である。今回は、付着破壊は認められなかった。
- ② 丸鋼およびより線を緊張材に用いた場合、緊張材の応力レベルは最大耐力時まであまり変動せず、最大耐力時に緊張材の降伏は確認できない。ただし、コンクリートが圧壊することにより骨格曲線の剛性が著しく低下し、部材の曲げ降伏と判定された。異形鋼棒を緊張材に用いた場合、緊張材の応力レベルは部材の変形に伴って変動するが、やはり最大耐力時に緊張材の降伏は確認できなかった。曲げ耐力を計算する場合には、耐力時の PC 鋼棒応力レベルを適切に考慮すると予測精度が向上する。
- ③ せん断破壊した場合、最大耐力時のせん断補強筋ひずみレベルは、①ほぼ 0 の場合、②降伏はしていないが、かなりの応力を負担している場合、③降伏している場合、の 3 タイプに分類される。せん断破壊モードは、この基準に基づいて①せん断斜張力破壊【DT】、②せん断補強筋未降伏のせん断破壊【SC】、③せん断補強筋降伏後のせん断破壊【ST】、に分類した。せん断破壊モードは、コンクリート圧縮強度、せん断補強筋の降伏強度と量、プレストレス力を含めた軸力レベルによって決定される。判定は、後出の提案式を用いるとある程度の精度で可能である。
- ④ 等価粘性減衰定数は、層間変形角で 0.5%前後で最大強度に到達するまでは 10%以下である。ただし、最大強度到達後には、せん断補強筋の塑性変形やコンクリートの圧壊が進展することで、値が 50%程度まで大きくなった。
- ⑤ 残留変形および残留ひび割れ幅は、最大強度に到達するまではほぼ 0 に近く、最大強度到達後に徐々に大きくなる PC 部材の特徴が確認された。
- ⑥ せん断斜張力破壊を除くせん断破壊で最大耐力が支配された試験体の最大耐力到達後の靱性能は、せん断補強筋降伏強度に大きな影響を受ける。普通強度せん断補強筋 (Fy295) を使用した場合は、せん断耐力到達時にせん断補強筋降伏していることが多く、せん断耐力到達後に生じるコンクリートの体積膨張を抑

制できず、極めて脆性的な破壊モードを呈した。これに対し、高強度せん断補強筋 (Fy785 または Fy1275) は、せん断破壊時に未降伏である場合が多く、せん断耐力到達後もコンクリートの体積膨張を抑制し、徐々に部材の耐力が低下するじん性能に富んだ破壊モードを呈した。特に、コンクリート圧縮強度が Fc170 級と高くなると、コンクリートの体積膨張の度合いが普通コンクリートより小さく、より破壊モードが脆性的となる。

- ⑦ Fc100 級以下のコンクリートを用いた PCaPC 部材のせん断耐力予測を行う場合、PC 規準 71.1 式および PC 規準 71.2 式でトラス寄与分を考慮しない場合はかなりの安全側、PC 規準 71.2 式トラス寄与分も考慮した場合および谷らの提案式では比較的精度良く実験結果を予測できる。ただし、トラス寄与分は丸鋼 PC 鋼棒を用いた場合にのみ考慮しない選択があり、異形鋼棒とより線を用いた場合には常に考慮する。また、PC 規準 71.1 式および PC 規準 71.2 式では、せん断補強筋の降伏強度上限値は無視し実降伏強度を使用した。これに対し、Fc170 級のコンクリートを用いた PCaPC 部材では、これらの式は安全側の評価とならないため、NewRC によるせん断耐力式を使用する必要がある。
- ⑧ せん断斜張力破壊時耐力は、主応力に基づくひび割れ強度を用いて精度良く予測できる。
- ⑨ Fc60~170MPa 級のコンクリート圧縮強度と Fy350~1450MPa 級のせん断補強筋降伏強度を有する PCaPC 造部材の曲げせん断実験結果に対して、斜張力破壊・せん断破壊・曲げ降伏後せん断破壊の終局時耐力と耐力算定値を比較し、予測式の精度を確認した。せん断ひび割れ強度、NewRC 式によるせん断終局耐力、断面解析を用いた曲げ強度精算値を計算し比較することで、破壊モードと終局時耐力を図-1 のように精度良く予測できる。

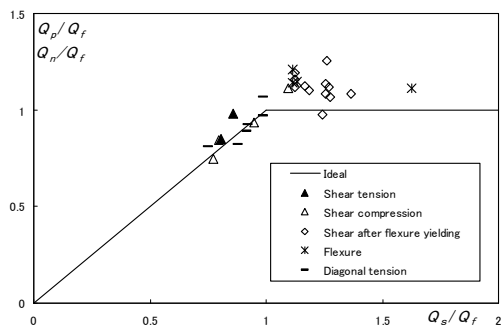


図1 PCaPC 部材の終局時耐力予測精度

## (2) PCaPC 部材を用いた損傷制御型架構の実現性検討

既存 RC 造柱梁架構を模擬した実大試験体を製作し、間柱型ダンパーとして平鋼板、波形鋼板を用いた制震要素を組み込んだ擬似動的載荷実験を実施した。また、実験結果をもとに、同制震システムで起こる挙動の再現が可能な数値解析モデルを構築した。以下に研究成果を示す。

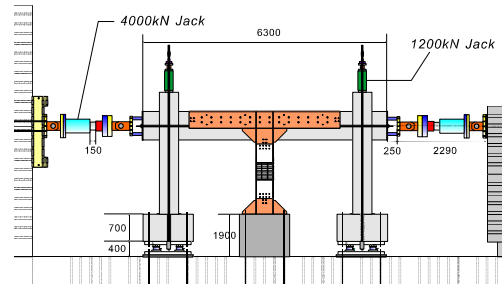


図2 PCaPC 架構のハイブリッド実験

- ① 層間変形角 0.10%以下の小変形時において鋼板ダンパーがせん断降伏し、エネルギー消費能力を発揮する間柱型ダンパーを設計、施工した。擬似動的載荷実験では、ダンパー以外の部材変形により、間柱ダンパー架構システムの水平剛性が低下し、層間変形角 0.50%付近に達するまで鋼板ダンパーがせん断降伏せず、設計時に想定したエネルギー消費効果を得ることはできなかった。今回の実験で確認されたダンパー以外の要素に変形が逃げるような挙動は、実構造物に同工法を採用した際にも起こりうることであり、設計、施工時に十分注意する必要がある。
- ② 擬似動的載荷実験では、上述した RC 骨組、間柱スタブの水平剛性の低下により、設計時に設定した最大応答のクライテリア (Level 1 地震波 1/200, Level 2 地震波 1/100) は満足できなかった。しかし、実験結果をもとに構築した骨組解析モデルを用いることで、擬似動的載荷実験の RC 骨組、間柱ダンパーの水平荷重-層間変形角関係、変位応答-時間関係が再現できることを確認しており、実験時に見られた問題点を改良することで、クライテリアを満たす構造システムの設計が可能になると考えられる。
- ③ 実験結果を用いて精度を検証した数値解析モデルを用いて、補強前後の RC 骨組の動的解析を行い、間柱ダンパーによる耐震補強効果を検証した。ダンパーが紡錘形の履歴ループを描いた Case14 (Elcentro NS 波 Level 1) では、補強

前の RC 骨組と比較し、補強後の RC 骨組の最大応答は 6 割程度に軽減された。また、ダンパーによるエネルギー消費量は、平均的等価減衰  $H_s$  により定量的に評価できた。但し、Case14 よりも小さい地震動を用いたため、ダンパーのエネルギー消費が無い、もしくは非常に小さくなったケースでも、補強による応答低減効果が確認されており、ダンパーのエネルギー消費による応答低減効果については更なる検討が必要である。

(3) まとめ

以上により、高強度材料を用いた PCaPC 造部材の曲げおよびせん断性状を把握し、耐力予測が可能となった。また、実大実験とモデル解析から、高強度材料を用いた損傷制御型 PCaPC 造架構の高い耐震性能を確認できた。

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 13 件)

- ① 李在満, 谷昌典, 坂下雅信, 河野進: 高強度せん断補強筋を有するプレキャストプレストレストコンクリート梁のせん断斜張力破壊に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, JCI, Vol. 32, No. 2, pp. 493-498, 2010. 査読有
- ② 内山元希, 長谷川弘明, 坂下雅信, 河野進: 785MPa 級のせん断補強筋を用いた PCaPC 柱のせん断性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, JCI, Vol. 32, No. 2, pp. 487-492, 2010. 査読有
- ③ 李在満, 谷昌典, 坂下雅信, 河野進, 西山峰広: 高強度せん断補強筋を用いたプレキャストプレストレストコンクリート梁の曲げせん断性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75, No. 653, pp. 1335-1342, 2010. 査読有
- ④ Bechtoula H., Kono S., Watanabe F.: Seismic performance of high strength reinforced concrete columns, Structural Engineering and Mechanics, Techno Press, Vol. 31, No.6, pp. 697-716, 2009. 査読有
- ⑤ Kono S. and Katayama T.: Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Building Structures with Prestressed Braces, Journal of Advanced Concrete Technology, JCI, Vol. 7, No.3, pp. 337-346, 2009. 査読有
- ⑥ 内山元希, 坂下雅信, 河野進, 西山峰

広: 高強度材料を用いた PCaPC 柱のせん断耐力に関する研究, 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. 71-76, 2010.

- ⑦ 李在満, 谷昌典, 坂下雅信, 河野進: 高強度せん断補強筋を有するプレキャストプレストレストコンクリート梁のせん断斜張力破壊に関する実験的研究, 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. 77-80, 2010.

[学会発表] (計 26 件)

- ① Ichioka Y., Kono S., Watanabe F.: New Structural Building System with Minimal Residual Seismic Damage, Second International Workshop on Performance, Protection and Strengthening of Structures under Extreme Loading, Aug 19-21, Hayama, Japan, Paper #N066, 2009.
- ② Kono S., Hasegawa H., Mori K., Ichioka Y., Sakashita M., Watanabe F.: Low cycle fatigue characteristics of high strength concrete, Eighth International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, October 27-29, Tokyo, Vol. 1, pp. 616-621, 2008.
- ③ Kono S., Ichioka Y., Ohta Y., Watanabe F.: Hybrid RC Building Structures with Corrugated Steel Shear Panels, IABSE Congress on Creating and Renewing Urban Structures, Tall Buildings, Bridges and Infrastructure, September 17-19, Chicago, Paper #A-0903, 2008.
- ④ Tanaka Y., Ichioka Y., Kono S., Ohta Y., Watanabe F.: Precast Prestressed Portal Frames with Corrugated Steel Panel Dampers, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China, Paper #12-P01-0123, 2008.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

- ① 名称: ブレース  
発明者: 河野進 他 4 名  
権利者: 長井栄治 他 3 名  
種類: 特許  
番号: 特願 2008-334229  
出願年月日: 平成 20 年 1 2 月 2 6 日  
国内外の別: 国内

- ② 名称：鋼材  
発明者：河野進 他2名  
権利者：飯干福馬 ほか2名  
種類：特許  
番号：出願公開 2009-121190  
出願年月日：平成20年12月26日  
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ：

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河野 進 (KONO Susumu)  
京都大学大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30283493

### (2) 研究分担者

田中 仁史 (TANAKA Hitoshi)  
京都大学防災研究所・教授  
研究者番号：20132623  
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  
田村 修次 (TAMURA Shuji)  
京都大学防災研究所・准教授  
研究者番号：40313837  
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  
塩原 等 (SHIOHARA Hitoshi)  
東京大学大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：50272365  
寺岡 勝 (TERAOKA Masaru)  
呉工業専門学校・建築学科・教授  
研究者番号：60442464

### (3) 連携研究者

特に無し