

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560693

研究課題名(和文)プレストレストコンクリート部材の各種限界状態に注目した変形性能評価手法の構築

研究課題名(英文)Creation of Evaluation Method for Deformation Capacity in Prestressed Concrete Members Focusing on Different Limit States

研究代表者

北山 和宏(KITAYAMA, Kazuhiro)

首都大学東京・都市環境科学研究科・教授

研究者番号：70204922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：スラブおよび直交梁を有するプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の地震時の変形性能を各種限界状態に注目しつつ定量的に評価するために、十字形柱梁部分骨組試験体を用いた静的載荷実験を行った。また、梁曲げ最大耐力時の変形を評価するため、既往の提案を参照して変形性能評価を実施した。実験によってプレストレスト率およびPC鋼材回りの付着性状が骨組内のT形梁の力学挙動に与える影響を定量的に示した。最大耐力時の変形性能を既往の提案手法では精度よく評価できなかった。梁主筋あるいはPC鋼材の柱梁接合部からの抜け出しによる付加変形を陽な形で考慮すべきであることを指摘した。

研究成果の概要(英文)：Prestressed reinforced concrete (PRC) interior beam-column-slab subassembly specimens with transverse beams were tested under cyclic load reversals to evaluate deformation capacity of a PRC frame during earthquake excitation focusing on different limit states. Deformation capacity at peak flexural strength for a PRC beam were also researched based on recent proposal. Effect of both a contribution ratio of post-tensioning tendons to beam ultimate bending capacity and bond condition along PC tendons around concrete on structural behavior of a T-shaped beam in a PRC frame was indicated quantitatively by laboratory tests. The accuracy of beam deformation capacity estimated by the recent proposal at peak flexural strength was inferior. Additional deformation caused by pull-out of beam longitudinal bars and PC tendons from a beam-column joint should be considered in an explicit way.

研究分野：建築構造学

キーワード：プレストレスト・コンクリート部材 限界状態 変形性能評価 復元力特性 曲げ

## 1. 研究開始当初の背景

プレストレスト・コンクリート(PC)構造では、ひび割れ幅を制御することが鉄筋コンクリート(RC)構造よりも比較的容易であり、PC構造の柱・梁部材を主要な耐震抵抗要素とする中・高層建物が設計されつつある。PC建物の耐震設計は「PC設計施工規準・同解説」(日本建築学会、1961年)以来の終局強度に依存した強度型設計であり、PC建物の発揮する変形性能は陽には評価されない。一方、今後求められる性能評価型耐震設計においては、幾つかの地震動レベルに対応した要求性能を満足させることが必要になる。そのためには使用性、損傷制御性および安全性などの限界状態を物理的に規定する諸事象(残留ひび割れ幅、主筋やPC鋼材の降伏、コンクリートの圧壊など)が発生するときの部材変形を定量的に評価しなければならない。

曲げ性状が卓越するPC柱梁部材の荷重-変形関係(復元力特性)を終局状態まで定量的に評価した解析研究には中塚・阿波野(2002)、前田・岸本ら(2004)があるが、いずれも部材全体を対象とした複雑な数値計算を要するため実用的ではない。また柱梁接合部パネルからの鋼材の抜け出しを考慮した解析研究には是永ら(2000)の研究しかなく、数値計算は同様に複雑である。隅田・岸本ら(2007)は部材変形に応じて変化する塑性ヒンジ長さを解析結果に基づいて定式化し、これに断面曲率を乗じることによって部材変形を求める手法を提案した。この手法は簡易なため有望であるが、塑性ヒンジ長さは載荷ピーク時と除荷時との二点のみしか評価できない。これについては申請者が改良を加えた解析手法を提示し、全体的な変形挙動を再現できることを示した[嶋田・北山(2011)]が、塑性ヒンジ長さの評価式の妥当性を実験によって検証していないため、ミクロな挙動の再現性については未確認である。

一方、PC部材における鋼材降伏やコンクリート圧壊などの諸事象が発生するときの変形を実験によって検証することは重要である。特に実際のPC建物内の柱梁部材では、柱梁接合部パネルからの鋼材の抜け出しによる付加変形を無視することができないため、十字形柱梁部分骨組試験体を用いた静的載荷実験が必要であるが、そのような実験研究は数少ない。そこで申請者は、平面の十字形柱梁部分骨組実験によってPC鋼材や梁主筋の付着性状が梁部材の変形性能に与える影響を調査してきた[田島・北山(2006~2008)、矢島・北山(2009、2010)]が、試験体数が少ないこともあって梁部材の変形機構は検討途上にあり、変形性能の定量評価手法の構築には至っていない。また現実には存在するスラブおよび直交梁を取り付けた柱梁部分骨組実験もほとんど行われていない。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、スラブおよび直交梁を

付加した十字形柱梁部分骨組試験体を用いた静的載荷実験、および梁曲げ最大耐力時の変形を評価する既往の提案を参照して変形性能評価を実施する。これらによって、PC柱梁曲げ部材の各種限界状態に対応する諸事象発生時の変形を精度良くかつ簡便に求める手法を構築するための基礎となす。なおここではポスト・テンション部材のうち、現場打ちのPC柱梁部材を検討対象とした。

## 3. 研究の方法

実験研究および解析研究に分けて以下に記述する。

### (1) スラブおよび直交梁を付加した十字形 PRC 柱梁部分骨組の実験

実物の約1/2スケールを有する、スラブおよび直交梁を付加した十字形 PRC 柱梁部分骨組試験体を合計4体作製し、水平力を正負に交替載荷する静的実験を行った。実験状況を写真1および2に示す。

実験は以下のように2体ずつの二シリーズに分けて実施した。

第一シリーズ 梁断面に配置するPC鋼材の径を操作することにより、プレストレス率(断面の終局曲げ耐力に対するPC鋼材の寄与率)を0.39~0.82に設定して実験変数とした。梁断面には上下とも2-D13(SD295A)を配筋し、PC鋼材にはいずれも丸鋼の11あるいは21を上下に1本ずつ配した。スラブを付加したT形梁のプレストレス率は、PC鋼材に11を用いたときには上端引張り時に0.39、下端引張り時に0.56であり、21を用いたときには上端引張り時に0.69、下端引張り時に0.82であった。試験体の柱梁曲げ耐力比は2.5以上とし、梁曲げ破壊となるように設計した。

コンクリートの圧縮強度は81~85 N/mm<sup>2</sup>、PC鋼材を格納するシース管に充填したグラウトの圧縮強度は71~75 N/mm<sup>2</sup>であった。



写真1 スラブおよび直交梁を付加した十字形 PRC 柱梁部分骨組の実験 (第一シリーズ)

第二シリーズ PC 鋼材の表面形状 (丸鋼の 21 および異形の D22) を実験変数として、PC 鋼材とグラウト間の付着性状が柱梁骨組の力学挙動に与える影響を検討した。梁断面には上端に 4-D19 (SD345) を、下端に 2-D13 (SD345) をそれぞれ配筋した。両試験体ともスラブを付加した T 形梁のプレストレス率は上端引張り時で 0.5、下端引張り時で 0.9 と共通とした。試験体の柱梁曲げ耐力比は 2 以上とし、梁曲げ破壊となるように設計した。コンクリートの圧縮強度は  $66 \text{ N/mm}^2$ 、PC 鋼材を格納するシース管に充填したグラウトの圧縮強度は  $56 \text{ N/mm}^2$  であった。

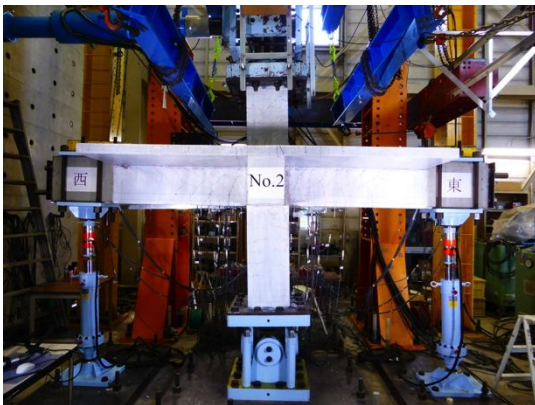


写真 2 スラブおよび直交梁を付加した十字形 PRC 柱梁部分骨組の実験 (第二シリーズ)

#### (2) PRC 骨組内の梁部材の変形性能評価

日本建築学会より 2015 年に発刊された「プレレストコンクリート部材の構造性能評価指針 (案)・同解説」には、PRC 曲げ部材の復元力特性を定量的に評価する手法のうち最大耐力時の変形性能は岸本らによる提案を用いて評価する。提案されたヒンジ部の塑性回転角  $R_h$  および梁部材角  $R_u$  の評価式を以下に示す (記号の説明は省略)。

$$R_h = \{(\varepsilon_{py} - \varepsilon_{ori}) / F\} / (d_{pb} / D - q_{pr} / 2 - 0.25)$$

$$R_u = \{R_h \cdot (L_o - l_{eq} / 2) + \delta_e\} / L_o$$

しかしこの評価式は多変数解析の結果を統計的に処理して導かれたものであり、PRC 柱梁骨組内の梁部材を用いた実験による妥当性の検証は行われていない。

そこで本研究室で以前に実施した PRC 柱梁部分架構試験体 20 体 (平面十字形 16 体、平面 T 形 2 体およびスラブ付き十字形 2 体) を用いて最大耐力時の梁の変形性能について検証を実施した。

#### 4. 研究成果

上述の(1)の実験研究、(2)の解析研究と分析・検討について、得られた結論をそれぞれ以下に示す。

#### (1) スラブおよび直交梁を付加した十字形 PRC 柱梁部分骨組の実験

第一シリーズの実験から得られた結論：

両試験体とも梁主筋の降伏後に PC 鋼材の降伏と同時あるいはそのあとに最大耐力に到達し、その後は梁主筋の座屈および破断によって耐力が急激に低下して、梁付け根コンクリートが激しく圧壊した。

復元力履歴特性のループの太り具合を表す指標である等価粘性減衰定数  $heq$  を、上端引張り時および下端引張り時の各加力半サイクルのループについて求めた。半サイクルの等価粘性減衰定数  $heq$  は、鋼材 (梁主筋、スラブ筋および PC 鋼材) の引張り力の和が上端引張り時および下端引張り時とで大きく異なる場合には、下端引張り時の  $heq$  のほうが上端引張り時のそれよりも大幅に大きくなった。一方、上端および下端引張り時の鋼材引張り力の和の差が小さい場合には、等価粘性減衰定数  $heq$  の違いは小さくほぼ同じ数値であった。

スラブの等価協力幅は梁主筋降伏と同時の梁部材角 0.15% 程度で梁スパンの 0.1 倍を超え、最大層せん力に達する前に梁スパンの 0.2 倍に達した。

PC 鋼材の残留緊張力は、プレストレス率が 0.5 程度の場合、梁変形の増大とともに初期緊張力よりも増加したが、プレストレス率が 0.75 程度の場合には逆に低下した。PC 鋼材降伏後の梁部材角 1.5% 時の緊張力残留率は 0.85~1.29 であった。

最大層せん断力除荷時の残留変形角および残留ひび割れ幅にスラブの影響は見られなかった。

上端曲げ耐力が下端曲げ耐力よりも大きい T 形梁断面では、矩形断面と比べて上端引張り時には早期に下端コアコンクリートが圧壊し、主筋の座屈および破断を誘発した。

使用限界は梁部材角 0.15~0.53% で「残留ひび割れ幅 0.2mm」および「主筋の僅かな降伏」によって、修復限界 I は梁部材角 0.24~0.90% で「PC 鋼材の弾性限界」および「残留ひび割れ幅 1.0mm」によって、修復限界 II は梁部材角 0.69~1.69% で「残留変形角 1/200」、「PC 鋼材の僅かな降伏」および「残留ひび割れ幅 2.0mm」によって、安全限界は梁部材角 2.66~4.36% で「コアコンクリートの圧壊」および「主筋の破断」によって各々決定した。

第二シリーズの実験から得られた結論：

実験では 2 体とも梁曲げ破壊を生じた。PC 鋼材として丸鋼を用いてその付着性状が不良の場合には、梁付け根の下端コンクリートが圧壊して、梁主筋の座屈を生じた。スラブ面のひび割れ状況には PC 鋼材の付着の良否による影響はほとんど見られなかった。ほかの実験において、スラブの付く T 形梁断面の上下の PC 鋼材径を変えることによって上端あるいは下端引張り時のプレストレス率を同程度にしたところ、梁に生じるひび割れ状

況はスラブのない矩形断面梁（既往の実験によるもの）の場合と類似した。このことからスラブが PRC 梁のひび割れ性状に与える影響は小さいと考える。PRC 柱梁骨組内の梁部材の各種限界状態の決定要因およびそのときの変形を特定して考察を加えた。詳細についてはさらに検討を要する。

## (2) PRC 骨組内の梁部材の変形性能評価

試験体 20 体の計 38 本の梁について最大耐力時の梁部材角  $R_u$  の評価結果と実験値との比較を行った。76 個のデータの内 68 個の計算値が実験値を下回った（図 1）。実験値を計算値で除した値の平均値は 1.85、標準偏差は 0.65 であり、評価の精度は良好でなかった。また、スラブ付十字形の試験体では 8 個のデータ（図 1 内の 印）の内 6 個の計算値が実験値を上回った。

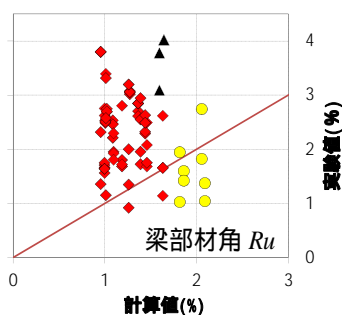


図 1 PRC 梁の最大耐力時の変形評価  
計算値と実験値との比較

実験結果よりもとめたヒンジ領域長さ  $l_h$  を用いて最大耐力時梁部材角  $R_u$  の評価をおこなった場合、等価塑性ヒンジ長さ  $l_{eq}$  を梁せい  $D$  と等しいと仮定した場合よりも、評価の精度は低下した。具体的には実験値を計算値で除した値の平均値は 2.26、標準偏差は 0.24 であり、評価の精度は良好でなかった。

これは提案されたヒンジ領域回転角  $R_h$  の評価式が、十字形部分骨組における柱梁接合部での梁主筋の抜け出しによる付加変形を陽な形で考慮できないことが一因であると考えられる。しかし、ト形試験体においても全ての計算値が実験値を下回った。

## 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 11 件）

島 哲也、北山和宏、遠藤俊貴：梁曲げ破壊型のスラブ付きプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の耐震性能と各種限界状態の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、No.2、2014 年 7 月、pp.727-732. 査読有り

北山和宏、島 哲也：梁曲げ破壊型のスラ

ブ付きプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の耐震性能（その 3 スラブの等価協力幅）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2014 年 9 月、pp.767-768. 査読なし

島 哲也、北山和宏：梁曲げ破壊型のスラブ付きプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の耐震性能（その 4 各種限界状態の評価）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2014 年 9 月、pp.769-770. 査読なし

星野和也、北山和宏：PRC 造梁曲げ破壊型骨組の梁部材における復元力特性の評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2014 年 9 月、pp.729-730. 査読なし

森口佑紀、島 哲也、野中翔太、北山和宏、遠藤俊貴：梁曲げ破壊型のスラブ付きプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の耐震性能（その 1 実験概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2013 年 8 月、pp.893-894. 査読なし

島 哲也、森口佑紀、野中翔太、北山和宏、遠藤俊貴：梁曲げ破壊型のスラブ付きプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の耐震性能（その 2 実験結果の検討）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2013 年 8 月、pp.895-896. 査読なし

村上友梨、北山和宏：プレストレスト鉄筋コンクリート骨組における梁部材の耐震性能評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.2、2012 年 7 月、pp.451-456. 査読有り

北山和宏、村上友梨：鋼材の付着性能に着目したプレストレスト鉄筋コンクリート十字形部分骨組における梁部材の耐震性能（その 1 実験概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2012 年 9 月、pp.941-942. 査読なし

村上友梨、北山和宏：鋼材の付着性能に着目したプレストレスト鉄筋コンクリート十字形部分骨組における梁部材の耐震性能（その 2 実験結果）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2012 年 9 月、pp.943-944. 査読なし

KITAYAMA Kazuhiro and YAJIMA Ryuto : Earthquake Resistant Performance of Prestressed Reinforced Concrete Beam-Column Subassemblages Forming Beam Yield Mechanism, Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012, September, USB-Rom, Paper No.0218. アブストラクトによる査読あり

TAJIMA Yuji and KITAYAMA Kazuhiro : Estimation of Equivalent Viscous Damping Ratio for Flexural Beam in Prestressed Reinforced Concrete Frame, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012, September, USB-Rom, Paper No.1948. アブストラクトによる査読あり

〔学会発表〕(計9件)

島 哲也、北山和宏、遠藤俊貴：梁曲げ破壊型のスラブ付きプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の耐震性能と各種限界状態の評価、日本コンクリート工学会年次大会、2014年7月9日から11日まで、サンポート高松（香川県高松市）

北山和宏、島 哲也：梁曲げ破壊型のスラブ付きプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の耐震性能(その3 スラブの等価協力幅) 日本建築学会大会、2014年9月12日から14日まで、神戸大学（兵庫県神戸市）

島 哲也、北山和宏：梁曲げ破壊型のスラブ付きプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の耐震性能(その4 各種限界状態の評価) 日本建築学会大会、2014年9月12日から14日まで、神戸大学（兵庫県神戸市）

星野和也、北山和宏：PRC 造梁曲げ破壊型骨組の梁部材における復元力特性の評価に関する研究、日本建築学会大会、2014年9月12日から14日まで、神戸大学（兵庫県神戸市）

森口佑紀、島 哲也、野中翔太、北山和宏、遠藤俊貴：梁曲げ破壊型のスラブ付きプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の耐震性能（その1 実験概要）日本建築学会大会、2013年8月30日から9月1日まで、北海道大学（北海道札幌市）

島 哲也、森口佑紀、野中翔太、北山和宏、遠藤俊貴：梁曲げ破壊型のスラブ付きプレストレスト鉄筋コンクリート骨組の耐震性能（その2 実験結果の検討）日本建築学会大会、2013年8月30日から9月1日まで、北海道大学（北海道札幌市）

村上友梨、北山和宏：プレストレスト鉄筋コンクリート骨組における梁部材の耐震性能評価に関する研究、日本コンクリート工学会年次大会、2012年7月4日から6日まで、広島国際会議場（広島県広島市）

北山和宏、村上友梨：鋼材の付着性能に着目したプレストレスト鉄筋コンクリート十字形部分骨組における梁部材の耐震性能（その1 実験概要）日本建築学会大会、2012年9月12日から14日まで、名古屋大学（愛知県名古屋市）

村上友梨、北山和宏：鋼材の付着性能に着目したプレストレスト鉄筋コンクリート十字形部分骨組における梁部材の耐震性能（その2 実験結果）日本建築学会大会、2012年9月12日から14日まで、名古屋大学（愛知県名古屋市）

〔図書〕(計1件)

北山和宏ほか：プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針（案）・同解説、V. 部材構造性能評価編（編集統括および分担執筆）日本建築学会、2015年2月、pp.243-403。（総ページ数：503 ページ、執筆ページ数：161 ページ）

〔その他〕

ホームページ等

北山研究室の研究成果

<http://www.comp.tmu.ac.jp/kitayama-lab/study/result.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北山 和宏 (KITAYAMA Kazuhiro)

首都大学東京・都市環境科学研究科・教授  
研究者番号：70204922

### (2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

なし ( )

研究者番号：