

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 4 月 30 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560596

研究課題名（和文） 鋼材付着制御に基づくプレストレストコンクリート部材の
次世代耐震設計法の開発研究課題名（英文） Creation of Innovative Earthquake Resistant Design for Prestressed
Reinforced Concrete Members Based on Bond Condition Control to PC Tendons

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

研究成果の概要（和文）：プレストレスト鉄筋コンクリート（PRC）梁の耐震性能を評価するために、曲げ破壊が先行する PRC 十字形柱梁部分骨組実験と平面保持仮定からの逸脱によって PC 鋼材の付着劣化を考慮した断面解析を実施し、主筋および PC 鋼材の量および付着性状が PRC 梁部材の復元力履歴特性に与える影響を定量的に検討した。各種限界状態を決定する要因の一つである残留曲げひび割れ幅から経験最大部材角を評価する推定式を提案し、その精度を実験および解析によって確認した。

研究成果の概要（英文）：Static tests under cyclic load reversals for prestressed reinforced concrete (PRC) cruciform beam-column subassemblages designed to form beam yielding mechanism, and section analyses assuming that plane sections remain plane, but taking account of bond deterioration along PC tendons by incorporating a strain deviation from a plane section, were carried out to investigate influences of bond condition along beam bars and PC tendons on restoring force hysteresis curves for PRC beams. A simple expression was proposed to evaluate an experienced peak deflection for PRC beams through residual flexural crack width which is one of factors for determining different limit states of beams. A beam deflection related to residual flexural crack width agreed with test results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野： 建築構造学

科研費の分科・細目： 建築学 / 建築構造・材料

キーワード： プレストレストコンクリート、 PC 鋼材、 付着、 耐震設計、
耐震性能評価、 梁、 柱梁骨組、 限界状態

1. 研究開始当初の背景

プレストレストコンクリート（PC）構造は、ひび割れが生じやすいという鉄筋コンクリート（RC）構造の宿命的な弱点をある程度克服できる構造形式である。2000 年の建築基準

法改正以降、PC 構造の柱・梁部材を主要な耐震抵抗要素として中・高層建物を設計しようとする機運が高まり、そのために必要な PC 構造建物の耐震設計法の発展的整備に対しても注目されるようになった。

PC 建物の耐震設計は 1961 年以來の終局強度型設計法によっており、性能評価型耐震設計法の策定が求められるが、それを可能とするための基礎資料が欠除している研究領域が多く存在する。

このように未解明な研究領域のひとつとして、曲げ性状が支配的なプレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 柱梁部材の復元力特性 (骨格曲線および繰返し載荷時の履歴性状) の定量評価がある。PRC 部材の復元力特性では、主筋および PC 鋼材の量とそれらのコンクリートとのあいだの付着性状とが重要である。このうち主筋および PC 鋼材に沿った付着性状が梁部材の耐震性能に与える影響を解析によって検討した研究は少なく [例えばは永ら (2000)、阿波野 (2002)]、実験研究に至ってはほとんどない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、主筋および PC 鋼材の付着性状が PRC 曲げ部材の復元力特性に与える影響を、静的正負交番載荷実験および PC 鋼材の付着劣化を平面保持仮定からの逸脱によって考慮する断面解析によって定量的に検討する。これらから、ひび割れ発生、鋼材の降伏、かぶりコンクリートの圧壊、コアコンクリートの圧壊および鋼材の座屈・破断の各事象が発生するときの部材変形を詳細に調査する。また、PRC 曲げ部材の使用性、損傷制御性および安全性などの各種限界状態を決定する要因を検討する。

以上の研究成果は、PRC 曲げ部材の復元力特性を精度よく評価する手法を開発するために資するものとなる。また、各種限界状態を決定する要因の一つである残留曲げひび割れ幅を用いて、経験した最大変形を評価する推定式を提案し、その精度を実験および解析によって検証する。

3. 研究の方法

(1) 平面十字形 PRC 柱梁部分骨組の実験

実物の約 1/2 スケールを有する平面十字形 PRC 柱梁部分骨組試験体を 8 体 (他の予算による 1 体を含む) 作製し、水平力を正負に交番載荷する実験を行った。実験状況を写真 1 に示す。

実験は以下のように 4 体ずつの二シリーズに分けて実施した。

① 第一シリーズ 梁断面の主筋径と PC 鋼より線の径との組み合わせによってプレストレスト率 (断面の終局曲げ耐力に対する PC 鋼材の寄与率) を 0.45~0.79 に設定して実験変数とした。梁主筋には D13 (SD295A) あるいは D19 (SD345) を用い、PC 鋼より線にはいずれも 7 本よりの $\phi 12.7$ あるいは $\phi 15.2$ を用いた。これによって、梁主筋の付着の良否とプレストレスト率とが PRC 梁部材の耐震性

能に与える影響を検討した。

コンクリートの圧縮強度は 69 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 70 N/mm^2 であった。



写真 1 十字形 PRC 柱梁部分骨組の実験



写真 2 PRC 梁の二点曲げ載荷実験 (実験終了後)

② 第二シリーズ 梁断面の主筋種 (異形鉄筋および丸鋼) と PC 鋼材種 (異形 PC 鋼棒、丸形 PC 鋼棒および PC 鋼より線) との組み合わせを変えることによって、梁主筋および PC 鋼材の付着の良否を実験変数とした。プレストレスト率は 0.8 (一定) とした。梁主筋には異形鉄筋 (D13、SD295A) あるいは丸鋼 ($\phi 13$ 、SS400) を用い、PC 鋼材には異形 PC 鋼棒 (22mm)、丸形 PC 鋼棒 (21mm) および PC 鋼より線 (19 本より 17.8mm) を用いた。これによって、梁主筋および PC 鋼材の付着の良否の組み合わせが PRC 梁部材の耐震性能に与える影響を検討した。

コンクリートの圧縮強度は 65 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 $61\sim 68 \text{ N/mm}^2$ であった。

(2) PRC 梁の二点曲げ載荷実験

純曲げを受ける PRC 梁部材の各種限界状態について実験によって検討した研究は少ない。そこでここでは梁せい 450mm、梁幅 300mm の梁形試験体 2 体に二点曲げ載荷する実験を行い、PC 鋼より線の付着性状、純曲げを受ける PRC 梁部材のひび割れ幅、各種限界状態を決定する物理的要因などを検討した。実験終了後の損傷状況を写真 2 に示す。

実験変数はPC鋼より線の径(12.7mmと17.8mm)であり、中央の純曲げ区間は900mm、両側のせん断区間はそれぞれ1000mmとした。コンクリート圧縮強度は42 N/mm²、グラウト圧縮強度は52 N/mm²であった。実験は漸増片振り荷重とし、主筋降伏、PC鋼材の弾性限界および降伏、圧縮縁コンクリートの圧縮強度到達などのときに一旦除荷した。

(3) PC鋼材の付着劣化を考慮した断面解析と各種限界状態の解析評価

部材の損傷を解析的に検討する場合、平面保持を仮定した断面解析によるのが簡便である。そこで平面保持を仮定した断面解析結果を用いてPRC梁部材の各種限界状態を検討した。また、各種限界状態を規定する損傷状況である残留変形角および残留ひび割れ幅の評価手法についても考察し、残留変形角と残留ひび割れ幅との関係を定量的に評価する手法を提示した。

平面保持を仮定した断面解析ではコンクリートと鉄筋は完全付着とした。コンクリートとPC鋼材とのあいだの付着が劣化すると、PC鋼材のひずみが平面保持仮定から逸脱することを考慮して、六車らによるひずみ適合係数(F値)を用いた。断面降伏以降の梁部材角は、隅田・岸本らによる等価塑性ヒンジ長さに断面曲率を乗じることによって算定した。残留曲げひび割れ幅の最大値を推定するために、RC梁部材を対象とした評価手法(RC造建物の耐震性能評価指針(案)、2004)を準用した。ここで残留変形角が必要となるが、これを前述の方法で求めた梁部材角を用いた場合と浜原による残留変形推定式を用いた場合とについて比較・検討した。

4. 研究成果

上述の(1)および(2)の実験研究、(3)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) 平面十字形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：

- ① 梁主筋として付着の良いD13を使用した試験体3体は紡錘形の復元力特性を示し、梁付け根のコンクリートの圧壊と梁主筋の座屈・破断が生じた。梁主筋として付着の悪いD19を使用し、プレストレス率が0.45の試験体はRC造に類似した復元力特性を示し、柱梁接合部パネル内の梁主筋の付着劣化によって履歴ループのピンチ化と梁コンクリートの圧壊を生じた。
- ② 全試験体で梁部材角の増加とともに梁危険断面から0.5D(D:梁全せい)の領域内の曲げひび割れ幅が増加し、その区間の梁主筋が塑性化した(図1参照)。
- ③ 梁付け根のコンクリート圧壊領域はプレ

ストレス率が大きくなるほど拡大し、押し切り荷重時でプレストレス率が最大の0.79である試験体は、プレストレス率が最小の0.45である試験体の1.8倍であり、圧壊長さは全試験体で0.18D~0.33Dであった。

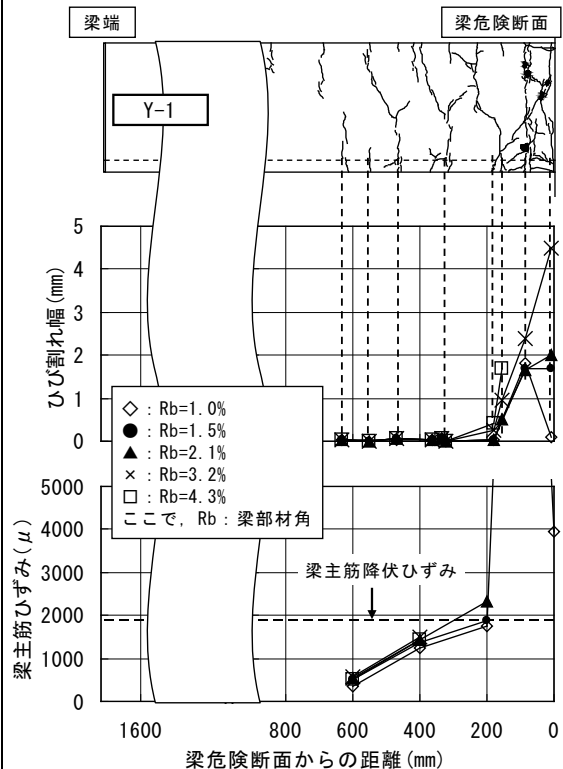


図1 梁のひび割れ幅分布と梁主筋ひずみ分布

- ④ 梁部材角 3% (梁の最大耐力程度) 時の梁のためみに占める梁危険断面から0.5Dまでの領域の回転変形の割合は全試験体とも80~90%であった。
- ⑤ 梁の残留変形と残留ひび割れ幅はプレストレス率に影響し、プレストレス率が大きくなるほど残留変形が小さくなり、荷重ピーク時に対する除荷時の曲げひび割れ幅の比は、プレストレス率が0.45ではRC造と同様の0.5程度であったが、プレストレス率が0.79ではその比は0.14であった。
- ⑥ 各種限界状態時の梁部材角は、使用限界は0.25~0.50%、修復限界1は0.93~1.66%、修復限界2は1.35~2.26%、および安全限界は2.94~4.32%であった。
- ⑦ 梁部材の等価粘性減衰定数はPC鋼材量が増加するほど低下する傾向にあった。

第二シリーズの実験から得られた結論：

- ① 復元力特性の履歴形状は梁主筋の付着性能によって支配され、梁主筋の付着が良い場合には紡錘形となったが、付着が悪い場合にはやせた逆S字形となった。梁主筋の座屈・破断はPC鋼材の付着性能に依存し、付

着が良い場合にはこれらは生じなかったが、付着が悪い場合には座屈・破断が見られた。

② 異形鉄筋を梁主筋として用いたとき、梁主筋の柱梁接合部内中央での付着強度は、PC 鋼材の付着性能に支配された。PC 鋼材の付着性能が良好な場合、付着作用によってシース管から放射状の圧縮力が周辺のコンクリートに伝達され、柱軸力と合わせて梁主筋を拘束した結果、梁主筋の付着強度が増大したと考える（図 2 参照）。

③ 梁の残留変形と残留曲げひび割れ幅は PC 鋼材の付着性能に支配され、付着が良いほどこの両者は大きくなった。

④ 各種限界状態時の梁部材角は、使用限界は梁主筋の降伏によって決まり 0.24~0.59%であった。修復限界 1 は PC 鋼材の弾性限界あるいはかぶりコンクリートの軽い圧壊で決まり、そのときの梁部材角は 0.97~1.28%であった。修復限界 2 は残留変形角 1/200 あるいは PC 鋼材降伏で決まり、そのときの梁部材角は 1.70~2.71%であった。安全限界はコア・コンクリートの圧壊で決まり、そのときの梁部材角は 2.88~4.36%であった。

⑤ 日本建築学会による提案手法によって推定した、梁のせん断力-部材角関係の復元力骨格曲線は、実験による復元力履歴特性の包絡線とほぼ一致したが、諸事象発生時の梁部材角は過小に評価した。

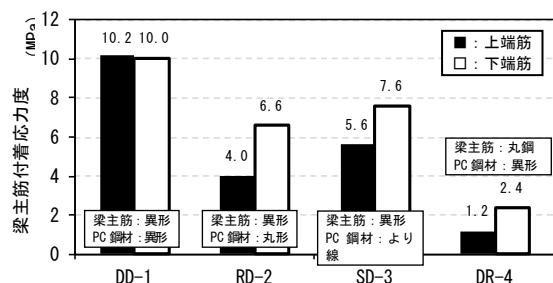


図 2 柱梁接合部内中央での梁主筋の付着強度

(2) PRC 梁の二点曲げ荷重実験

① プレストレスレベルを2倍に増やした梁部材の残留ひび割れ幅は、もとの梁部材の半分程度と小さかった。

② プレストレス率が0.75である梁部材の純曲げ区間におけるひずみ適合係数は、0.6~0.7の一定値を示したのちに断面曲率の増加とともに低下し、PC鋼材降伏時には0.35になった。

③ 両梁部材の各種限界状態は、使用限界が「主筋の僅かな降伏」あるいは「PC 鋼材弾性限界」で決定され、修復限界のほとんどは残留変形角 (1/400 あるいは 1/200) で決まった。この傾向は、既往の PRC 柱梁十字形部分架構内の梁部材の結果と同様であった。

(3) PC 鋼材の付着劣化を考慮した断面解析と各種限界状態の解析評価

① PC 鋼材のひずみが平面保持仮定から逸脱することによって PC 鋼材の付着劣化を考慮して断面解析を行い、この結果と隅田・岸本らが提案する等価塑性ヒンジ長さを組み合わせることにより、PRC 梁部材の復元力特性をおおむね良好に評価できた。

② RC 梁と同様の評価手法によって、PRC 梁部材の残留曲げひび割れ幅と部材角との関係の評価することができる。ただし、定数の同定と推定の精度について課題が残った。

③ PRC 梁部材の限界状態を規定する損傷状況は実験・解析ともに、使用限界は主筋のひずみによって、修復限界は残留変形角によってそれぞれ決定され、その時の梁部材角も解析でおおむね良好に評価できた。

以上の研究成果は、プレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 梁部材の構造性能や各種限界状態時の変形性能を精度良く評価する手法の開発に役立てることができる。特に梁主筋および PC 鋼材の柱梁接合部内での付着性状が PRC 梁部材の復元力特性や各種限界状態に与える影響を詳細に検討できたので、鋼材の付着制御に基づいた新しい性能評価型耐震設計法の構築に向けた基礎資料を整えることができたと考える。

(4) 今後の検討課題および残された問題

今後は、日本建築学会において現在作成中の「PC 部材の構造性能評価指針 (案)・同解説」を適宜修正、改良あるいは新規項目を提案して、その妥当性を本研究の成果を用いて検証してゆきたい。

研究課題申請当初に掲げた幾つかの研究過程のうち、PC 鋼材-グラウト材-シース管-周辺コンクリートという複合系の付着性状を制御する手法の創出は、残念ながら未完である。上述のような実験研究、断面解析のほか有限要素解析なども駆使して、PC 鋼材-シース管系の付着制御を可能とするための具体的な方法について、さらに検討を続ける必要がある。

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 9 件)

① 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、2012 年 7 月 (掲載決定)、査読有

② 嶋田洋介、北山和宏：PRC柱梁十字形部分架構における梁部材の各種限界状態の解析的検討(その1：試験体諸元と解析概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2 構造IV、2011年8月、pp. 839-840. 査読無

③ 北山和宏、嶋田洋介：PRC柱梁十字形部分架構における梁部材の各種限界状態の解析的検討(その2：検討結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2 構造IV、2011年8月、pp. 841-842. 査読無

④ 嶋田洋介、北山和宏：プレストレスト鉄筋コンクリート柱梁十字形部分架構における梁部材の各種限界状態、コンクリート工学年次論文集、Vol. 33、No. 2、2011年7月、pp. 523-528. 査読有

⑤ 北山和宏、矢島龍人：梁の曲げ性状が支配的なPC十字形部分架構の耐震性能に関する研究(その1 実験概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2 構造IV、2010年9月、pp. 819-820. 査読無

⑥ 嶋田洋介、北山和宏、浜田公也：PC鋼より線を用いたPRC梁部材のゲージ養生と純曲げ区間における各種限界状態に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 32、No. 2、2010年7月、pp. 505-510. 査読有

⑦ 矢島龍人、北山和宏：梁曲げ破壊型プレストレストコンクリート十字形部分骨組の耐震性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 32、No. 2、2010年7月、pp. 511-516. 査読有

⑧ 田島祐之、北山和宏：梁曲げ破壊するプレストレスト鉄筋コンクリート柱梁十字形部分架構の梁部材における等価粘性減衰定数の定量評価、日本建築学会構造系論文集、2009年10月 第74巻、第644号、pp. 1831-1840. 査読有

⑨ 田島祐之、北山和宏：梁曲げ降伏後に接合部せん断破壊するPRCおよびPC構造の柱梁十字形部分架構の耐震性能評価、コンクリート工学年次論文集、Vol. 31、No. 2、2009年7月、pp. 295-300. 査読有

[学会発表] (計 12 件)

① 北山和宏：PC部材性能評価法、日本建築学会大会パネル・ディスカッション、2011年8月25日、早稲田大学

② 田島祐之、北山和宏：梁曲げ破壊するプ

レストレスト鉄筋コンクリート構造の十字形部分架構における梁部材の等価粘性減衰定数、日本建築学会大会、2010年9月9日、富山大学

③ 北山和宏、矢島龍人、見波 進、浜田公也、毛利 浩：スリーブ継手で柱接合したプレキャストPRC骨組の力学特性に関する実験的研究、日本地震工学会年次大会、2009年11月13日、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター

④ 矢島龍人、北山和宏：PC鋼より線を用いた梁曲げ破壊型PRC十字形骨組の力学特性に関する実験的研究、日本地震工学会年次大会、2009年11月13日、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター

⑤ 嶋田洋介、北山和宏：PC柱梁十字形部分架構の梁部材における各種限界状態の検討、日本地震工学会年次大会、2009年11月13日、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター

⑥ 北山和宏、田島祐之：PRCおよびPC構造の柱梁十字形部分架構における梁曲げ降伏後の接合部せん断破壊に関する研究、日本建築学会大会、2009年8月29日、東北学院大学

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

(3) 連携研究者

なし