

論文 緊張PC鋼棒により横補強したRC造柱はり接合部の弾塑性性状

上原 修一^{*1}・山川 哲雄^{*2}・祐本 和也^{*3}

要旨：緊張PC鋼棒によりせん断補強した接合部の補強効果を確認する破壊実験を行った。既存接合部を想定し、外部横補強したものおよび新設の接合部を想定したX形に斜め補強したものについての実験である。その結果、緊張PC鋼棒により外部横補強あるいはX形に斜め補強をすると、接合部せん断ひび割れ強度を2倍以上に上昇させることができるほか、接合部の損傷をほぼ完全に防止できることがわかった。

キーワード：接合部，耐震補強，プレストレス，PC鋼棒，せん断

1. はじめに

著者らはこれまでに、高強度中子筋で接合部を面外方向に横補強すると接合部破壊から梁端破壊へ破壊形式を移行できることを示した¹⁾。しかし、接合部パネルのある程度の破壊は防止できないことも明らかとなった¹⁾。これは、鉄筋がコンクリートのひび割れ後に効果を発揮するためと考えられる。

そこで本研究では、PC鋼棒によって接合部コンクリートにプレストレスを与えることにより、コンクリートを能動的に拘束することを試みた。本研究

で採用する方法は、著者の一人の山川がこれまでに柱の耐震補強法として提案し、その有効性を確認している²⁾工法に基づいた「PC鋼棒を接合部回りに外帯筋状に配し緊張力を与える工法（以下PC外部横補強とよぶ）」と「PC鋼棒を接合部にX形に配し緊張力を与える工法（以下PCX形補強とよぶ）」の2つである。前者の補強工法は、開発が求められている既存構造物の接合部の補強工法と想定している。後者は新設の接合部の補強工法と想定している。

表-1 試験体一覧

試験体番号	試験体名	PC鋼棒補強
No.1	2005-IJ1	なし
No.2	2005-IJ2	PC外部横補強
No.3	2005-IJ3	PCX形補強

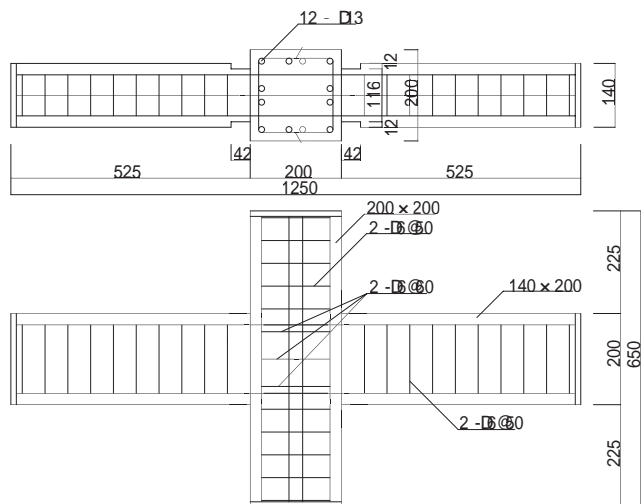
表-2 使用材料の力学的性質
(a) 鉄筋

種別	呼び名	用途	降伏点	ヤング係数	引張強度	伸び率
			(MPa)	(N/mm ²)	(MPa)	(%)
SD295	D6	せん断補強	365	1.90×10 ⁵	515	26.7
SD345	D13	主筋	368	1.86×10 ⁵	584	22.2
PC鋼棒1*	Φ5.4	外部横補強	>1102	2.06×10 ⁵	>1102	-
PC鋼棒2	Φ11	X形補強	1252	1.71×10 ⁵	1273	12

* PC鋼棒1については降伏前にネジ部で破断した。

(b) コンクリート

試験体番号	試験体名	圧縮強度
		(MPa)
No.1	2005-IJ1	30.5
No.2	2005-IJ2	30.5
No.3	2005-IJ3	27.8



北側梁上端筋
北側梁下端筋
南側梁上端筋
南側梁下端筋
上柱北側主筋
上柱南側主筋
下柱北側主筋
下柱南側主筋
接合部東面帯筋
接合部西面帯筋

図-1 試験体(No.1, No.2)形状・配筋およびゲージ貼付位置図

*1 有明工業高等専門学校 建築学科 教授 博士(工学)(正会員)

*2 琉球大学工学部 環境建設工学科 教授 工学博士(正会員)

*3 有明工業高等専門学校 専攻科 建築学専攻(正会員)

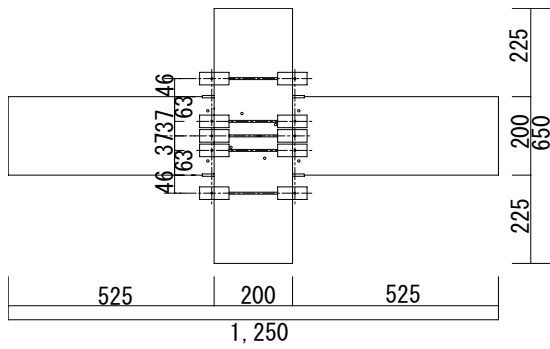


図-2 PC外部横補強筋取り付け位置(No.2試験体)

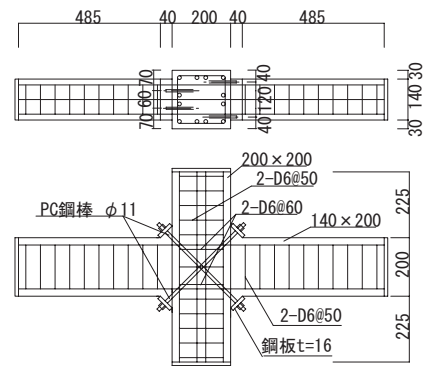


図-3 PCX形補強筋取り付け位置(No.3試験体)

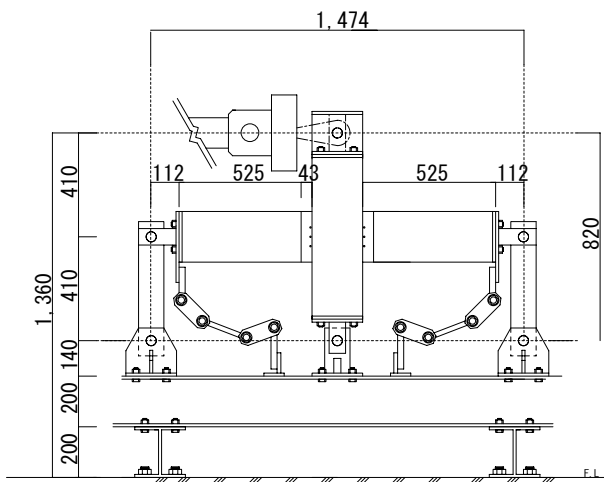


図-4 加力装置(西面)

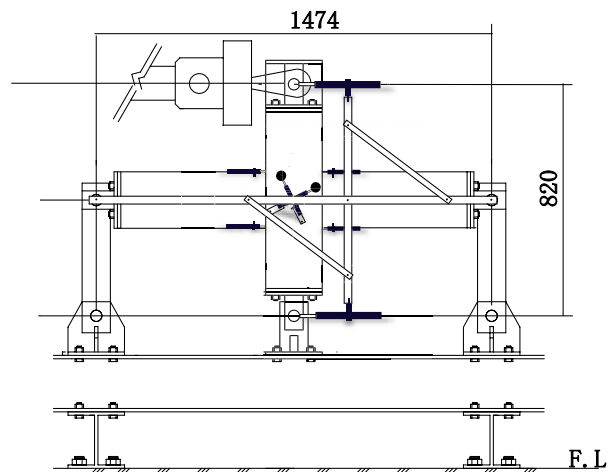


図-5 変形量測定装置(西面)



写真-1 PC外部横補強筋取り付け試験体(No.2)



写真-2 PCX形補強筋取り付け試験体(No.3)

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1に、本実験の試験体一覧、表-2に使用した材料の力学的性質を示す。試験体No.1はPC鋼棒で補強していない比較用の基準試験体であり、試験体No.2はPC外部横補強の試験体、試験体No.3はPCX形補強の試験体である。図-1に試験体No.1, No.2の形状を示す。試験体は、実物のほぼ1/3.5程度である。図-2に示すようにNo.2試験体について、PC鋼

棒を接合部回りに外帯筋状に配筋し緊張力を与えるため、接合部に近い梁腹部にPC鋼棒用の穴を37mmピッチごと3ヶ所設けた。既存の接合部では、硬化したコンクリートに穴をあけることになるが、その工法については他で検討することとし、ここではあらかじめ、外径9mmの鋼製の管を打設前に埋め込むことにより穴を作った。また、外帯筋定着用のコーナー部ブロックが大きいので、図-1に示す様に、梁端部で梁幅を116mmに狭めている。なお、穴の形状、

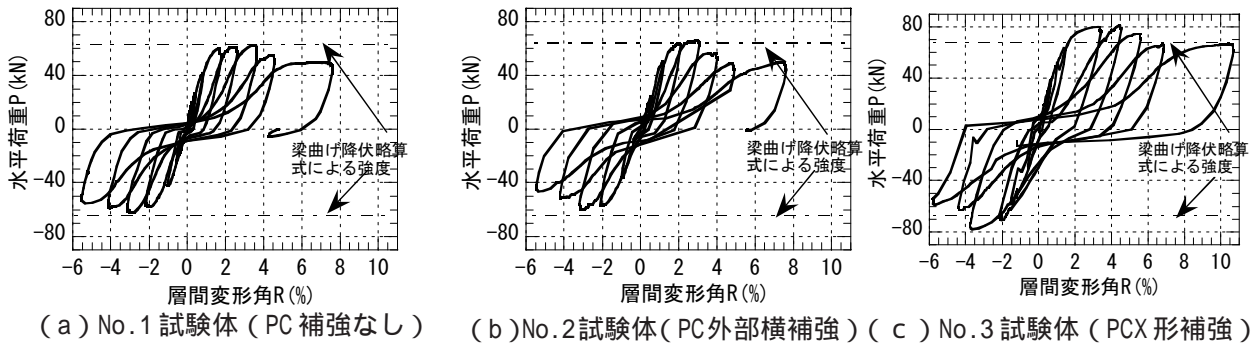


図-6 水平荷重と層間変形角の関係

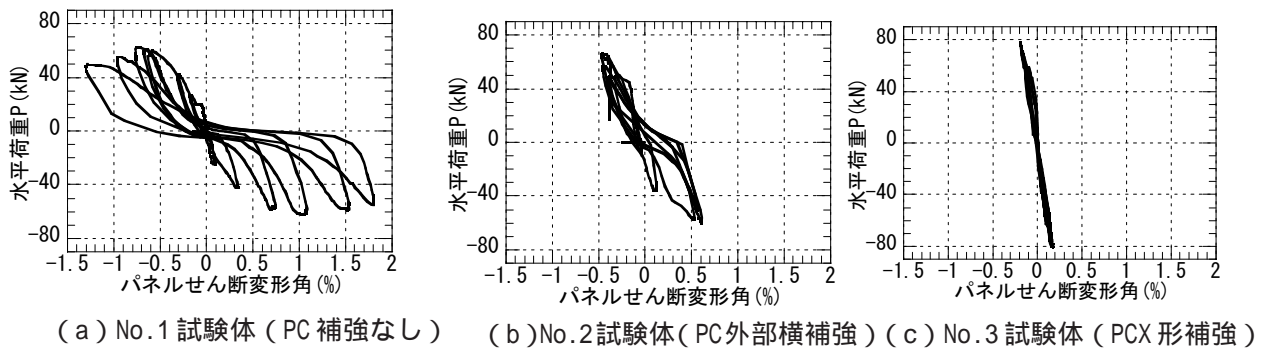


図-7 水平荷重とパネルせん断変形角の関係

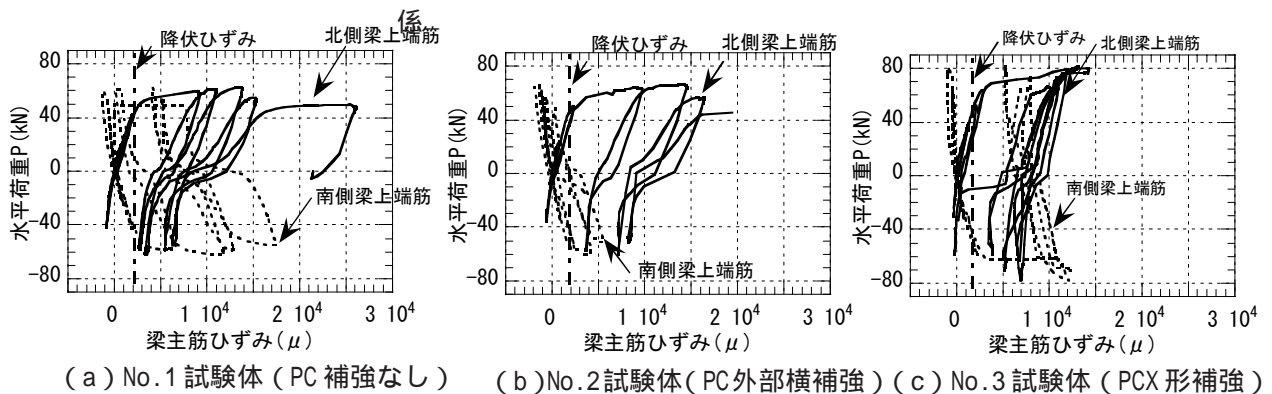


図-8 水平荷重と梁主筋ひずみの関係

梁端の形状は、No.1 も同じである。No.3 の配筋は他2体の試験体と同じである。梁幅が端部まで140mm のままであること、コンクリート強度がやや小さいことが異なる点である。PC 鋼棒は、図-3 に示すように、柱梁主筋の間を通して対角線方向に2本ずつ配置した。

ひずみゲージは、図-1 に示す位置のほか、No.2 試験体および No.3 試験体については全ての PC 鋼棒に貼付した。

2.2 加力方法と変形測定装置

図-4 に示す文献3) と同じ加力装置により、柱端部をローラー支持、柱脚部をピン支持として、柱頭に水平力を載荷した。また面外拘束のため、梁端に

面外拘束ジグを取り付けた。軸力は加えていない。

加力は、変位制御とし、柱部材角 R に関し、1 回ずつ、約 ± 0.5%、± 1.0%、± 2.0%、± 3.0%、± 4.0%、± 5.0% 程度まで変形させた後、+8% (南方向) まで加力した。

図-5 に変形量測定装置を示す。梁外端のピンからボルトを出して、そこに測定フレームを設置し、柱底部および頂部のピン中心位置の変位を測定し、その変位の差をその測定距離で除して層間変形角とした。また、梁端部の回転量を測定するため、梁の上下面から 36mm、柱面から 16mm 柱離れた梁側面にボルトを埋め込みそのボルトに変位計を固定し、梁

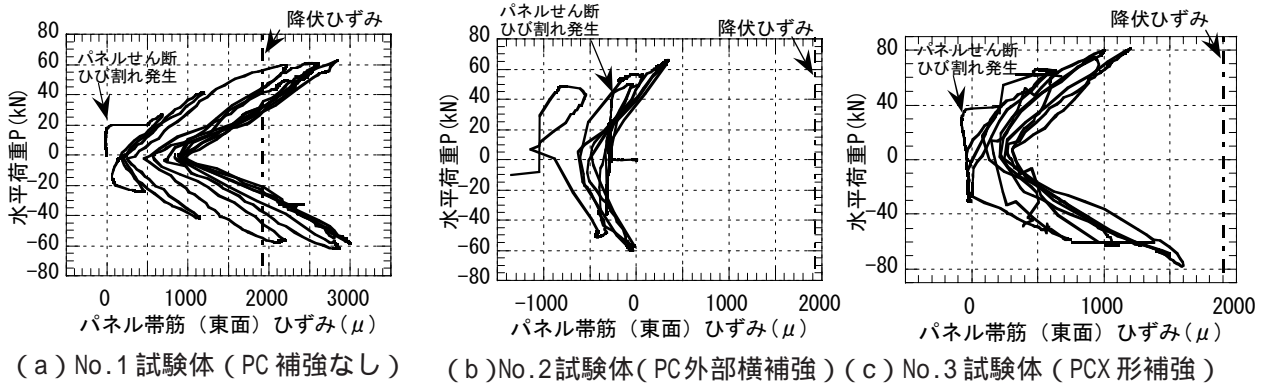


図-9 水平荷重とパネル帯筋ひずみの関係



写真-3 試験体の全体の破壊状況 (東面)



写真-4 試験体の接合部の破壊状況 (東面)

上下面レベルの柱面にあて変位を測定した。さらに接合部パネルのせん断変形は、No.1, No.2 試験体については、PC 鋼棒の存在により変位計をパネル対角方向に設置できなかったため 18 度回転させた位置に設置し、換算して求めた。No.3 試験体については、測定値に問題があったため X 形に配した PC 鋼棒のひずみより推定することとした。

写真-1, 写真-2 に、No.2 試験体, No.3 試験体について、試験装置の設置状況を示している。

3. 実験結果

図-6 から図-9, 写真-3 から写真-5 に全試験体の実験結果を示す。試験体 No.1 の実験では、梁に曲げひび割れが発生した後、水平荷重 20kN で接合

部パネルにせん断ひび割れが発生したことが目視により確認できた。パネルのせん断ひび割れ発生は、図-9(a) で帯筋ひずみが急増していることから裏付けられる。さらに、図-6(a) に示すように、層間変形角 $R=$ 約 2% で降伏強度に達し、主筋は降伏した。その後変形が進み、 $R=3\%$ を過ぎたあたりから梁端圧縮側コンクリートが圧縮破壊し、梁端破壊となった。その際、接合部のカバコンクリートが大きく損傷するなど、接合部の損傷も観察された。

試験体 No.2 の実験では、まず全ての PC 鋼棒に約 3000 μ (降伏ひずみの 60% 程度) の緊張ひずみを与えた。梁に曲げひび割れが発生した後、水平荷重 50kN で接合部パネルに、せん断ひび割れが発生したことが目視により確認できた。パネルのせん断ひび割れ



(a) No.1 試験体 (PC 補強なし) (b) No.2 試験体 (PC 外部横補強) (c) No.3 試験体 (PC X 形補強)

写真 -5 試験体の接合部内部の破壊状況

表 -3 水平強度に関する解析結果一覧

試験体番号	試験体名	接合部せん断ひび割れ時水平力 (q_{cc}^{*1})		接合部破壊時水平力 (q_{cu}^{*1})				
		計算値 ^{*2}	実験値	計算値 ^{*3}	計算値 ^{*4}	計算値 ^{*5}	計算値 ^{*6}	実験値
No.1	2005-IJ1	0.0205	0.0164	0.0504	0.0608	0.0478	0.0510	0.0503
No.2	2005-IJ2	-	0.0410	0.0504	0.0608	0.0478	0.0510	0.0543
No.3	2005-IJ3	-	0.0450	0.0584	0.0722	0.0529	0.0597	0.0730

*1 水平力を柱面積 ($b_c D_c$) とコンクリート強度 f_c で除したものとす。

*2 文献5)の2.5式による。

*3 梁主筋定着破壊時の強度・文献4)の(4)式,(6)式による。

*4 梁主筋塑性降伏時の強度・文献4)の(3)式,(6)式による。

*5 靱性保障型計算値による強度・文献6)の8.3.1式による。ただし、安全率1/0.85は除く。

*6 梁曲げ降伏略算式 ($=0.9a_1 \gamma_d$) による。

発生は、図-9(b)で、プレストレス力により帯筋ひずみが圧縮された後、水平荷重50kN弱のところではひずみが大きくプラス側に変化していることから確認できる。このように、せん断ひび割れ強度が2倍以上に上昇しており、緊張PC鋼棒の補強効果が確認できる。図-6(b)に示すように、Rが約2%で降伏強度に達した。その後、接合部パネル部分の損傷はほとんど見られなかったが、R=3%を過ぎたあたりから梁端部のコンクリートが圧縮破壊し、強度が減少した。なお、外周のPC鋼棒は水平力が大きくなると500 μ 引張ひずみが増大したが、加力終了後まで変動は少なかった。

試験体 No.3 の実験では、まず全てのPC鋼棒に約3500 μ (降伏ひずみの60%程度)の緊張ひずみを与えた。梁に曲げひび割れが発生した後、水平荷重50kNで接合部パネルに、せん断ひび割れを発生させた。図-9(c)では、プレストレス力により帯筋が圧縮された後、水平荷重40kN程度のところでひずみが大きくプラス側に変化していることから、ここでせん断ひび割れが発生したものと推察される。このように、No.2と同様に、せん断ひび割れ強度が2倍程度に上昇しており、X形PC鋼棒の補強効果が確認できる。せん断ひび割れ強度がNo.2より少し小さいこ

とは、図-9(b)と図-9(c)の比較から、No.2の帯筋の方がより大きい圧縮ひずみとなっており、コンクリートをより強力に拘束しているためと考えられる。図-6(c)に示すように、Rが約2%で降伏強度に達した。その後、接合部パネル部分の損傷はほとんど見られなかったが、No.2と同様にR=3%を過ぎたあたりから梁端部のコンクリートが圧縮破壊し、強度が減少した。なお、X形に配したPC鋼棒のひずみは水平力により変動し、繰り返し加力ごとに少しずつ引張ひずみが減少し最終的には1000 μ 程度引張ひずみが減少した。

図-6の3体の水平荷重と層間変形角の関係から、No.1、No.2の水平耐力はほとんど変わらないが、No.3は、25%程度大きくなっていることがわかる。このNo.3の強度は、梁危険断面が梁端より40mm外側になっていること、梁幅が140mmであることを考慮してもなお20%程度大きい。これは、接合部隅角部の鋼板によりカバーコンクリートが強力に拘束されていることによってコンクリート強度が増大したことおよびそのことにより、梁塑性ヒンジ位置が梁ハッチ終端よりさらに外側になったためではないかと考えている。また、No.1に比べ、No.2、No.3の強度低下が大きいのは、変形が梁端部に集中し、大き

な材端回転角が生じたためと考えている。また、No.2、No.3のエネルギー吸収能力が改善されていないが、これは梁主筋の付着強度がそれほど改善されていないためと考えられる。

図-7には、3体の試験体について水平荷重と接合部パネル部のせん断変形角の関係を示す。ただし、No.3の結果については、パネル部分にセットした変位計による値が不良であったため、X形に配したPC鋼棒のひずみから推定した。これらと比較すると、PC鋼棒により接合部の変形が有効に拘束されていることがわかる。

図-8には、3体の試験体について水平荷重と梁主筋ひずみの関係を示す。最大耐力時には、3体の試験体とも梁主筋は降伏していることがわかる。柱主筋は降伏していないことを確認している。

図-9には、3体の試験体について水平荷重とパネル帯筋ひずみの関係を示す。No.1試験体では降伏し、No.2試験体、No.3試験体では弾性のままである。また、No.2試験体のひずみの方がNo.3試験体より小さいことがわかる。

写真-3、写真-4には、3体の試験体について実験終了後の状況を示している。No.1試験体は接合部も大きく損傷しているが、No.2、No.3試験体では僅かなひび割れのみであった。写真-5には接合部パネル部分を切断した写真を示す。これらは、接合部につながる柱、梁を切り落とし、残った接合部を面内で2等分したものの断面である。接合部No.1試験体は梁端部破壊であったが、接合部中央近辺にも圧縮破壊した痕跡が認められた。しかし、No.2、No.3試験体では極めて細いせん断ひび割れが観察されるほかは全く損傷が認められなかった。

4. 実験値と解析値の比較

表-3に実験値と解析値の比較を示す。No.1の接合部パネルのせん断ひびわれ強度は、実験値がやや小さいがほぼ予測できている。最大水平荷重については、No.1、No.2は曲げ略算値でほぼ推定できるが、No.3はそれより22%大きくなっていることがわかる。これは、梁端部コンクリートが強力に拘束されているためと考えている。

5. 結論

PC鋼棒により接合部コンクリートにプレストレスを与えることによりコンクリートを能動的に拘束し、接合部の損傷を低減する工法に関する予備的な実験を行い以下の結論を得た。

- (1) 緊張PC鋼棒によりRC造柱はり十字形接合部を横補強すると、せん断初ひび割れ強度を上昇させることができるほか、接合部パネルの損傷をほとんどなくすることができる。その結果、せん断変形量も著しく低減させることができる。また、X形に配した緊張PC鋼棒によっても同様な効果がある。
- (2) 緊張PC外部横補強や緊張PCX形補強により接合部のせん断変形を拘束すると梁端部に損傷および変形が集中する。
- (3) 梁主筋の付着劣化防止についてはさらに検討が必要である。

今後は、さらに多くの試験体により性状を明らかにしたいと考えている。

謝辞

本実験は、2005年度、有明高専柴田尚平、納身明寿、山本拓哉、吉開暢之の各氏の卒業研究の一環として行ったものである。実験にあたっては、有明高専技術職員松原征男氏、田中三雄氏の助力を得た。また、国土交通省より建設技術研究開発費補助金(研究代表者山川哲雄)の援助を受けた。

参考文献

- 1) 上原修一、江崎文也：RC造柱梁十字形接合部の補強方法に関する基礎的研究、日本建築学会九州支部研究報告、第44号・1、2005、pp297-300
- 2) 山川哲雄、鴨川茂義、倉重正義：PC鋼棒にプレストレスを導入して外帯筋状に耐震補強したRC柱の性能と設計、日本建築学会構造系論文集、第537号、2000.11、pp107-113
- 3) 上原修一、西田朋美、江崎文也：RC造柱梁十字形接合部の破壊機構に関する研究、日本建築学会九州支部研究報告、第43号・1、2004、pp577-580
- 4) 西田朋美、上原修一：めり込み機構に基づくRC造柱梁十字形接合部の強度評価法に関する研究、コンクリート工学
2版年次大会論文集、Vol.25、No.2、2003、pp505-510
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料、はり・柱接合部(1)、pp116-120、1991.9
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、第8章、pp241-277.1999.8月30日第2版