

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：18001

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760457

研究課題名(和文) PC鋼棒により能動的横拘束を受けるRC柱のせん断伝達機構の解明

研究課題名(英文) Experimental Investigations on Shear Resistance Mechanism of RC Column Retrofitted by Using PC Bars

研究代表者

中田 幸造 (NAKADA, Kozo)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：80347129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：緊張PC鋼棒で能動拘束されたRC柱のせん断伝達機構を解明するため、主筋の付着がある試験体で主にトラス機構、主筋の付着を除去した試験体でアーチ機構の検証を行った。主筋の付着を除去した試験体の実験結果より、(1)軸力が高い場合、最大水平耐力の上昇には上限が見られた、(2)アーチ機構のせいは能動側圧や軸力の増加とともに大きくなること、などを明らかにした。また、付着がある主筋と付着のない主筋を混合配筋した試験体の結果より、付着劣化はアーチ機構の負担せん断力を増加させるが、それ以上にトラス機構の負担せん断力を減少させることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The major objectives of this study are to investigate the shear resistance mechanism and shear strength of RC columns retrofitted by PC bar prestressing. To investigate the shear resistance mechanism, two kinds of specimens are considered. One group consisted of retrofitted RC columns without a bond force between the concrete and the embedded longitudinal reinforcement to generate the arch mechanism. The other group consisted of retrofitted RC columns with the bond force of the rebars to check the truss mechanism. The main results are summarized: 1. In case of under high axial force, the increment of the shear strength of the arch mechanism shows upper limit; 2. The depth of the compression zone of the arch mechanism increases with increasing lateral confining pressure and axial force; 3. The shear force of the arch mechanism increases due to bond deterioration between concrete and rebar, on the other hand it causes deterioration of shear transfer of the truss mechanism.

研究分野：建築構造学

キーワード：プレストレス せん断強度 トラス機構 アーチ機構 PC鋼棒 拘束コンクリート

1. 研究開始当初の背景

せん断破壊が先行する RC 柱の外周に PC 鋼棒を取り付けて緊張力を導入し、RC 柱のせん断抵抗性能を増大させる靱性型耐震補強法 (PC 横補強法) は、(1) 能動的横拘束効果 (PC 鋼棒での締め付けによる RC 柱へのプレストレス付与効果)、(2) 受動的横拘束効果 (RC 柱が膨れて初めて得られる横拘束効果)、(3) せん断補強効果 (せん断伝達能力の向上効果) の 3 つを期待できる。受動および能動的横拘束効果については、研究代表者らが PC 横補強 RC 柱の中心圧縮実験を行い、能動および受動的横拘束効果を同時に考慮できる拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を定式化した。PC 横補強 RC 柱の応力-ひずみ関係の定式化により、能動拘束を受ける RC 柱の拘束コンクリート強度を推定でき、よって PC 横補強 RC 柱の曲げ強度も算定できる。ただし、高軸力下では RC 柱表面に緊張 PC 鋼棒による鋼板圧着が必要であり、能動拘束および鋼板による拘束機構を適切にモデル化すれば、高軸力下においても PC 横補強 RC 柱の曲げ強度を適切に評価できることも明らかにした。即ち、PC 横補強 RC 柱の破壊モード (曲げ破壊、せん断破壊、付着破壊) のうち、曲げ破壊は推定できる (付着破壊は他機関で研究を展開中)。本研究では、PC 横補強法の能動拘束がせん断強度に与える影響に着眼する。なお、研究代表者らは PC 横補強 RC 柱のせん断破壊実験を先行して行っており、せん断伝達機構 (トラス機構やアーチ機構) に能動拘束の影響があることを報告していた。

2. 研究の目的

能動拘束の影響は実験結果に現れたが、そのメカニズムが不明であった。せん断伝達はトラス機構とアーチ機構の和で説明され、PC 横補強法のトラス機構は図 1、アーチ機構は図 2 の力の釣合いを構成すると考えられる。図 1 の 3 成分のうち、せん断強度時に主筋の付着劣化が生じないようにしているため、PC 鋼棒の引張力とコンクリートの斜め圧縮力のどちらかが終局に達してトラス機構強度に至ると考えられる。高強度の緊張 PC 鋼棒を用いるので、せん断強度時に PC 鋼棒が降伏しないこと、さらに 2 つの成分のうち、どちらでトラス機構強度が決まるのか、ひび割れが生じてコンクリートの圧縮力は拘束コンクリートが関与しているのか、など課題が残されていた。拘束コンクリートの関与については、図 2 のアーチ機構においても同様に不明であり、軸力の寄与についても検証が必要である。本研究では、主にトラス機構の検証に主筋の付着がある通常の補強 RC 柱試験体を使用し、アーチ機構の検証には、RC 柱の柱頭柱脚をせん断力が斜めに伝わる単純なモデルとするために主筋の付着を除去した補強 RC 柱試験体を用いる。本研究での実験変数は、PC 鋼棒の配置間隔、PC 鋼棒の

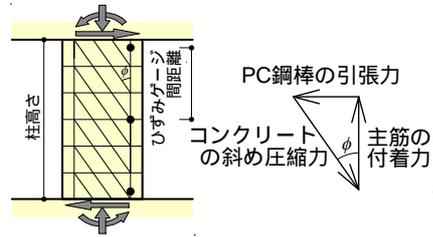


図 1 トラス機構の釣合い

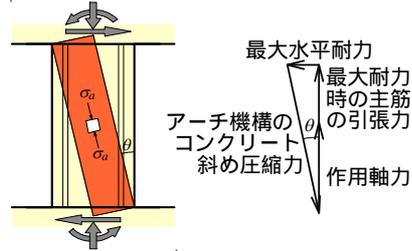
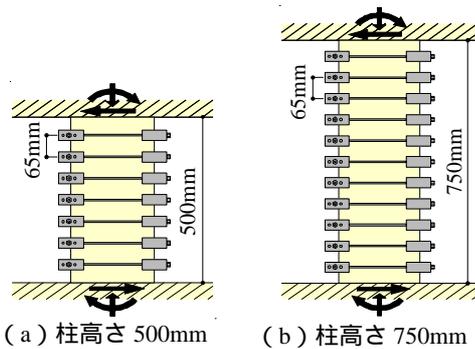


図 2 アーチ機構の釣合い

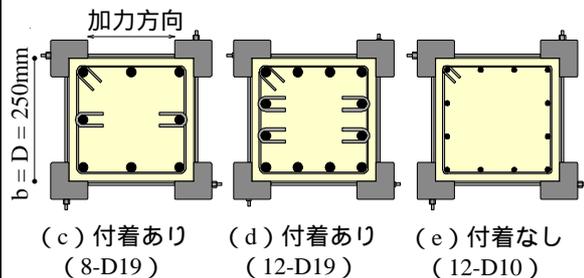
緊張ひずみ、主筋の付着の有無、RC 柱に導入する軸力であり、本研究では、(1) 能動拘束がトラス機構とアーチ機構に及ぼす影響を実験的に明らかにすること、(2) 能動拘束された RC 柱のせん断強度式をトラス・アーチ機構に基づき提案すること、を研究の目的とした。

3. 研究の方法

柱試験体の外形は、図 3 のように 1 辺が 250mm の正方形断面で柱の高さは 500mm と 750mm、せん断スパン比は 1.0 と 1.5 である。柱試験体に配筋する主筋は、高強度の D19 (SD490) が 8 本と 12 本の 2 種類であり (主筋比: 3.56% と 5.51%)、帯筋は 3.7φ@105 (帯筋比: 0.08%) で配筋した (全試験体共通)。高強度の D19 を用いることで、曲げ破壊時のせん断力が補強後のせん断破壊時せん断力より大きくなり、せん断破壊が先行する。



(a) 柱高さ 500mm (b) 柱高さ 750mm



(c) 付着あり (8-D19) (d) 付着あり (12-D19) (e) 付着なし (12-D10)

図 3 柱試験体

表 1 試験体一覧

Specimens	M/VD	$c\sigma_B$ (MPa)	η	ρ_s (mm)	ϵ_{pt} (μ)	Bond performance
R12S-P65MUh+	1.0	21.6	0.6	65	2508	Unbond
R12S-P65MB0			0.05		2415	Bond
R12S-P65MU0			0.05		2483	Unbond
R12M-P65MUh+	1.5	22.6	0.6		2514	Unbond
R12M-P65LU			0.2		606	
R12M-P65LUh			0.4		647	
R13S-P65MB12	1.0	24.3	0.2		2429	Bond
R13S-P65MB4c					2453	Partial bond
R13S-P65MB4i					2479	Partial bond
R13S-P65MU12					2445	Unbond
R14M-P65LB	1.5	15.8	0.2		663	Bond
R14M-P65LBh			0.4		668	
R14M-P65MB			0.2	2385		
R14M-P65MBh			0.4	2454		

注) $M/(VD)$: せん断スパン比, $c\sigma_B$: コンクリート強度, η : 軸力比, ρ_s : PC 鋼棒の配置間隔, ϵ_{pt} : PC 鋼棒の初期緊張ひずみ

主にトラス機構の検証を行う場合は主筋の付着がある柱試験体を用いる。なお、図 3 のように、加力方向に対して外側の主筋にのみ U 字形の付着割裂防止筋を配筋した (D6-@52.5)。アーチ機構の検証を行う場合は、主筋の付着を除去した柱試験体を用いる。高強度 (12-D10, 主筋比 1.36%), かつ主筋の付着を除去した柱試験体を用いるのは、アーチ機構のコンクリート斜め圧縮束で最大耐力を決めるためである。柱主筋の付着の除去は主筋表面にビニールテープを巻き付け、グリースを塗布し、ビニールチューブで被覆することで行った。使用した PC 鋼棒の直径は 5.4mm である (規格降伏強度 1202MPa)。研究期間に使用した試験体の一覧を表 1 に示す。

4. 研究成果

本章では主な実験結果のみを示し、最後に本研究で得られた結論を述べる。

4.1 水平荷重 V - 部材角 R 関係

図 4 に実験で得られた水平荷重 V-部材角 R 関係を代表的な試験体について示す。図 4 (a),(b) に示す主筋の付着がなく軸力比 0.2 と 0.4 の P65LU, P65LUh 試験体は、最大水平耐力時に斜めひび割れを生じた。また、図 4 (d) に示す P65MU12 では最大水平耐力後に斜めひび割れが生じた。主筋の付着がない試験体では、加力の初期に断面の引張側に曲げひび割れが生じ、加力と共に断面の圧縮側のひび割れが増加し、柱頭・柱脚の圧縮端を結ぶような斜めひび割れが生じることに特徴がある。図 4 (c),(g),(h) に示す主筋の付着がある試験体では、加力初期に斜めひび割れが生じ、その後最大水平耐力に到達した後、斜めひび割れの増加と共に水平荷重が低下した。図 4 (e),(f) に示す付着がある主筋と付着がない主筋を混合配筋した試験体は、全主筋に付着がある試験体 (図 4 (c)) に比べてひび割れの数は少なかった。また、

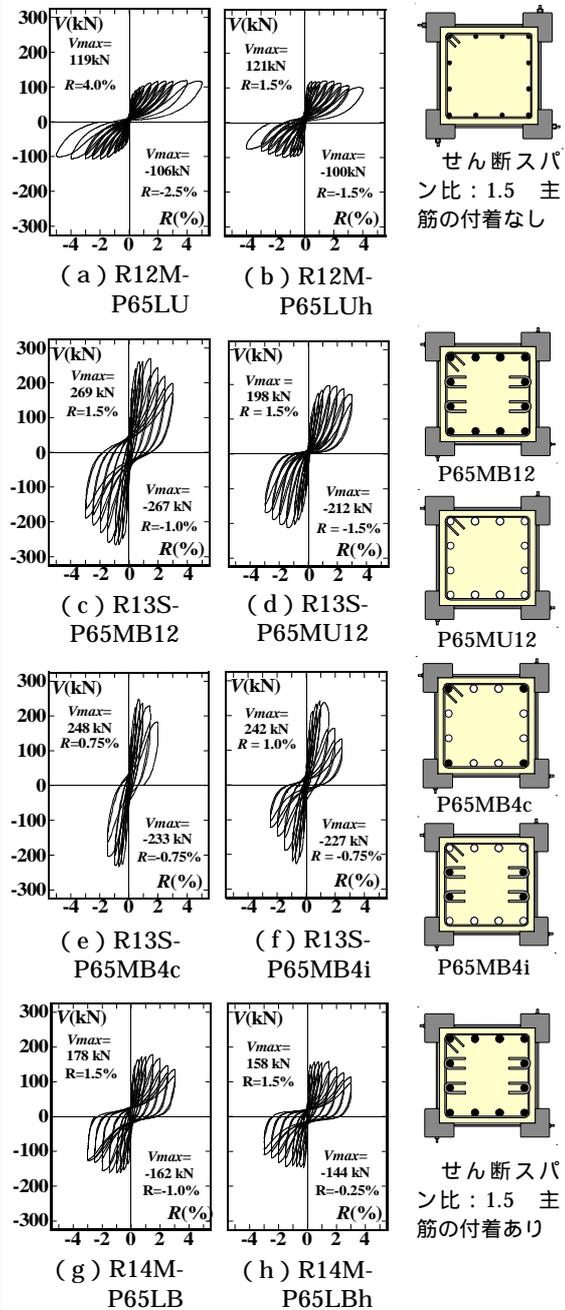


図 4 水平荷重 V - 部材角 R 関係

最大水平耐力はやや小さくなった。主筋の付着がある試験体の最大水平耐力は、トラス機構の発生により、一般に主筋の付着がない試験体に比べて大きくなる。

4.2 主筋の付着がない試験体の最大水平耐力

図 5 は主筋の付着がない試験体の最大水平耐力と能動側圧、軸力との関係である。図 5 には表 1 の試験体に加えて、過去に行った実験結果も示した。図 5 (a) より、能動側圧が大きくなると最大水平耐力も大きくなる。図 5 (b) では、せん断スパン比 1.0 と 1.5 の試験体について、能動側圧が小さな P65LU シリーズと中程度の P65MU シリーズを軸力比で整理した。せん断スパン比 1.0 の P65LU と P65MU シリーズでは、軸力が大きくなると最大水平耐力も大きくなる。ただ、○で囲む試

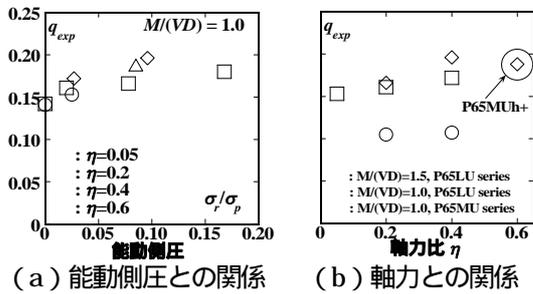


図5 主筋の付着がない試験体の最大水平耐力

験体のみは最大水平耐力の増加に頭打ちの傾向が認められる。軸力の最大水平耐力に与える影響には上限があることを示唆している。せん断スパン比 1.5 については、右上がりの傾向がほとんどない。

4.3 アーチ機構の角度と圧縮域のせい

図2に示す力の釣合いによりアーチ機構の角度を求めた結果が図6である。図6より、能動側圧が大きくなるとアーチ機構の角度は小さくなる。能動側圧が大きくなると拘束されたコンクリートの圧縮強度が増加し、その結果、斜め圧縮束の抵抗力も増加することからアーチ機構の角度が小さくなると考えられる。軸力との関係より、せん断スパン比 1.0 の場合、軸力が大きくなるとアーチ機構角度が小さくなる。一方で、せん断スパン比 1.5 の場合は軸力によるアーチ機構の角度の変化は見られない。柱が長くなるとアーチ機構の角度は小さくなるため、柱長さが長い場合は軸力の影響が表れにくいものと考えられる。次にアーチ機構圧縮域のせいの比 k を求めた(図7)。算定式は省略する。図7より、能動側圧と軸力が大きくなると k も大きくなる。また、せん断スパン比が大きくなると k も大きくなるが、○で示す P65MU シリーズのみは右上がりでない。

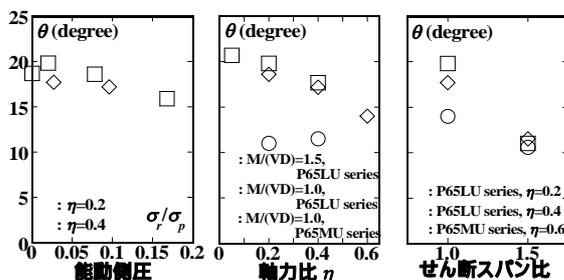


図6 アーチ機構の角度

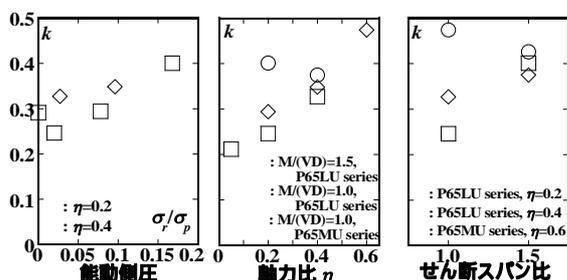


図7 アーチ機構のせい

4.4 混合配筋試験体のトラス・アーチ機構せん断伝達機構の変化を検証するため、付着がある主筋と付着がない主筋を混合配筋した試験体のせん断破壊実験を4体行った(図4(c)~(f))。これらの試験体のトラス機構の角度を求め、トラス機構負担せん断力とアーチ機構負担せん断力を求めた結果を図8に示す。算定式は発表論文を参照されたい。トラス機構の角度は P65MB12 が 45.6 度、P65MB4c と P65MB4i は 57.6 度、61.3 度となり、P65MB4c と P65MB4i でトラス機構角度が 45 度を越えたのは付着劣化が原因の一つと考えられる。図8(a)より、P65MB4c と P65MB4i は付着が劣化することでアーチ機構負担分が 30kN 増えているが、P65MB12 に比べてトラス機構負担分がそれ以上に減少しているため(約 50kN 減少)、最大水平耐力に約 20kN の差が生じたとわかる。一方、P65MU12 の最大水平耐力はこれらの試験体の上限のアーチ機構負担せん断力である。このことからトラス機構の存在によりアーチ機構の負担せん断力は変化していると思われる。

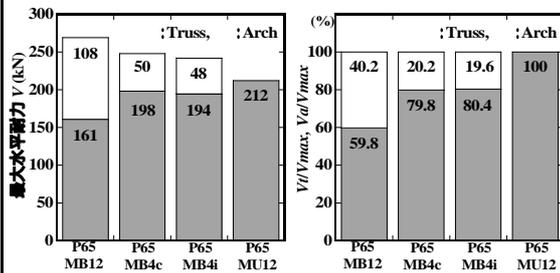


図8 トラス機構とアーチ機構負担分

4.5 まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 軸力が高い場合、主筋の付着がない試験体の最大水平耐力の上昇には上限が見られた。

(2) せん断スパン比が 1.5 の場合、軸力による最大水平耐力の差が見られず、また、アーチ機構の角度にも差がなかった。

(3) せん断スパン比が 1.0 の場合、アーチ機構のせいは能動側圧や軸力の増加とともに大きくなった。

(4) 付着がある主筋と付着のない主筋を混合配筋した試験体の結果より、付着劣化はアーチ機構の負担せん断力を増加させるが、それ以上にトラス機構の負担せん断力を減少させることがわかった。

本報告書を執筆している現在、これまで集積したせん断破壊実験結果に基づき、主筋の付着がある試験体のトラス機構の角度や負担せん断力、ならびにアーチ機構の角度などについて検証中である。なお、主筋の付着がある試験体のアーチ機構の検証結果は、主筋の付着がない試験体の実験結果と比較検討する予定である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

中田幸造, 森下陽一: PC 鋼棒で横補強した RC 柱のせん断破壊実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014 年 9 月 12 日, 神戸大学

幸地優明, 中田幸造, 森下陽一: PC 鋼棒で能動拘束した RC 柱のせん断破壊実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013 年 8 月 30 日, 北海道大学

Kozo NAKADA, Yoichi MORISHITA, Sanae UEHARA, Tetsuo YAMAKAWA: Shear Resistance Mechanism of RC Column Retrofitted by using PC Bars, IABSE spring conference, 2013 年 5 月 6 日, ロッテルダム, オランダ

中田幸造, 森下陽一, 前田興輝: PC 鋼棒で横補強した RC 柱のアーチ機構に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 2013 年 3 月 3 日, 大分大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中田 幸造 (NAKADA KOZO)

琉球大学・工学部環境建設工学科・准教授
研究者番号: 80347129