

論文 引張軸力を受ける RC 柱のせん断抵抗機構に関する研究

白石 一郎*1・若松 慎哉*2・滝沢 一孝*3・高木 仁之*4

要旨: 圧縮軸力を受ける鉄筋コンクリート柱については数多くの研究が行われ、そのせん断性状が明らかにされつつあるのに対し、引張軸力下の柱に関する研究は数少なく、未解明な点が多い。本報では、引張軸力下で逆対称曲げせん断加力を受ける鉄筋コンクリート柱の実験を実施し、その破壊性状、強度および変形性能について調査した。さらに、FEM解析や Collins の修正圧縮場理論による解析から、引張軸力を受ける鉄筋コンクリート柱のせん断抵抗機構やせん断強度について考察している

キーワード: RC柱, 引張軸力, せん断強度, せん断抵抗機構, FEM, 修正圧縮場理論

1. はじめに

高層構造物の下層側柱では、地震時に大きな変動軸力が作用するため、長期軸力と水平荷重時軸力の和が引張となることも多い。圧縮軸力が鉄筋コンクリート (RC) 柱のせん断性状に及ぼす影響については多くの研究により明らかにされつつあり、その成果として、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」(以下、「靱性保証指針」) には、トラスアーチ理論に基づくせん断強度式が採用されている。これに対して、引張軸力下における RC 柱のせん断性状に関する研究は数少なく^{1), 2)}、いまだ不明な点が多い。

そこで本研究では、引張軸力下で逆対称曲げせん断加力を受ける RC 柱の実験および解析を実施し、引張軸力がせん断強度やせん断抵抗機構に及ぼす影響について考察する。

2. 実験概要

2.1 試験体計画

引張軸力柱を対象とした文献 1), 2) の実験では、せん断破壊を曲げ破壊に先行させるために、せん断スパン比が 1.0 とやや太短い柱となっている。本研究では、試験体形状をより実状に近

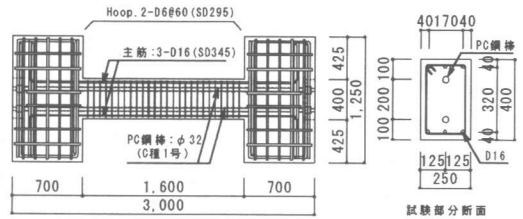


図 2.1 試験体形状および配筋 (単位 mm)

表 2.1 載荷軸力とプレストレス (圧縮を正)

試験体	載荷軸力 N (kN)	プレストレス Nps (kN)	複合軸力 N+Nps (kN)
No. 1	-500	200	-300
No. 2	-1000	200	-800
No. 3	0	600	600

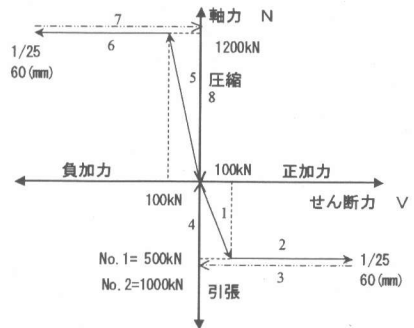


図 2.2 載荷履歴 (せん断力と軸力の関係)

*1 日本工業大学教授 建築学科 工博 (正会員)

*2 小田急不動産(株) 工修

*3 北野建設(株) 技術研究所

*4 明治大学講師 建築学科 工修 (正会員)

づけて、せん断スパン比を2.0とした。試験体形状および配筋を図2.1に示すが、試験体は、断面250×400 (mm)、柱長さ1600 (mm)で、実大の約1/2スケールとなっている。主筋は6-D16、せん断補強筋は2-D6@60 ($p_w=0.4\%$)であるが、試験体を曲げ破壊させずにせん断破壊させるために、主筋に加えてPC鋼棒2-32φを配筋した。

試験体に作用させた軸力とプレストレスを表2.1に、荷重履歴を図2.2に示す。No.1試験体、No.2試験体では、正加力として、せん断力が100kN時に所定の引張軸力となるように軸力とせん断力を比例荷重し、その後は破壊まで一定引張軸力下でせん断力を増加させた。さらに引張軸力下でせん断破壊させた後、せん断力および引張軸力を除荷し、負加力として図2.2のように圧縮軸力下でせん断力を荷重させた。これは、地震時の繰り返し加力を想定したもので、引張軸力下で破壊したRC柱が、その後圧縮軸力下でどの程度の耐荷能力を有しているかを調べるためのものである。ただし、No.2試験体は、引張軸力下での破壊時にねじれ変形したために、負加力は実施できなかった。なお、本報では、軸力とプレストレスの和を複合軸力と呼ぶこととする。

図2.3に加力装置を示すが、左右2台のアクチュエータで上下を平行に維持しながら軸力を荷重し、水平方向のアクチュエータによって、逆対称曲げせん断加力を行った。

2.2 使用材料

試験体で使用した鋼材およびコンクリートの材料試験結果を表2.2に示す。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ破壊状況

実験結果一覧を表3.1に示し、試験体のひび割れ破壊状況を図3.1に示すが、No.1、No.2試験体では、引張軸力下でのひび割れ破壊状況である。図より、No.1、No.2試験体では、斜めひび割れとともに水平ひび割れが発生しており、

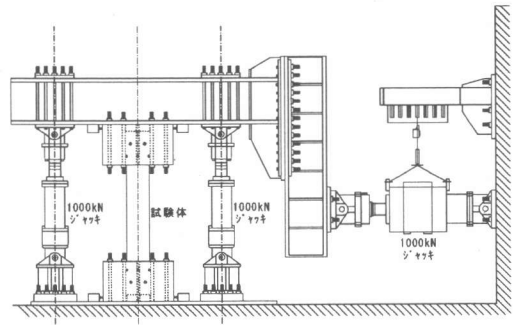


図2.3 加力装置

表2.2 材料試験結果

No.	コンクリート		種別	鋼材		ヤング率 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング率 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)		強度 (N/mm^2)		
				降伏	引張	
1	51.61	3.41	D6	328.5	530.2	1.80
2	48.64	3.43	D16	347.1	504.8	1.70
3	50.77	3.23	PC32φ	1213.4	1231	2.04

表3.1 実験結果一覧

No.	複合軸力	N+Nps	項目	曲げ ひび割れ	曲げせん断 ひび割れ	最大耐力
No.1	正加力 引張軸力	-300 [kN]	V [kN]	59.3*	190.2	293.1
			δ [mm]	2.08	16.49	60.49
	負加力 圧縮軸力	1400 [kN]	V [kN]	-197.6	-241.1	-341.1
			δ [mm]	-5.27	-2.57	-13.05
No.2	正加力 引張軸力	-800 [kN]	V [kN]	20.0*	99.3*	230.2
			δ [mm]	0.31	15.90	53.65
No.3	正加力 圧縮軸力	600 [kN]	V [kN]	46.8	192.2	317.9
			δ [mm]	0.38	4.06	26.54
	負加力 圧縮軸力	600 [kN]	V [kN]	-158.0	-202.7	-350.2
			δ [mm]	-1.63	-4.01	-18.47

注：*付きの数値は、所定の軸力に達する以前のひび割れを示す。

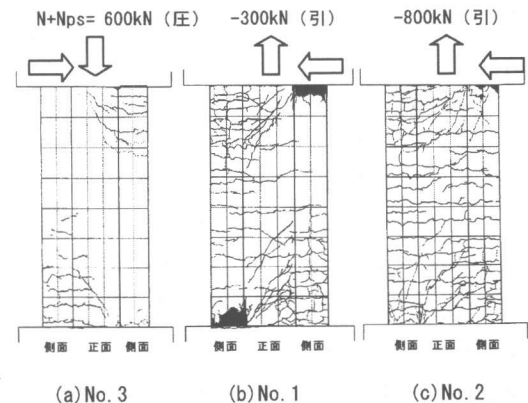


図3.1 ひび割れ破壊状況 (展開図)

引張軸力下のひび割れの特徴がみられる。また No. 1 試験体は、柱頭・柱脚の圧縮側コンクリートが剥落し広く圧壊している。No. 2 試験体でも、No. 1 試験体ほどではないが柱頭側面が圧壊している。No. 1 と No. 2 試験体を比較すると、引張軸力の大きな No. 2 試験体の方が、より多くのひび割れが発生している。一方、複合軸力が圧縮の No. 3 試験体では、水平ひび割れの発生はなく破壊に至った。

いずれの試験体も、最大耐力時に主筋は降伏していたが、P C 鋼棒は未降伏であり、せん断破壊したものと判断した。

3.2 せん断力-変位関係

No. 1, No. 2, No. 3 試験体のせん断力-変位関係を図 3.2 に示す。せん断力が 50 kN 位までは、各試験体の剛性はほぼ等しく、その後は引張軸力の大きな試験体ほど、剛性低下が大きくなっている。また、最大耐力時の変形は、圧縮軸力下の No. 3 試験体に比べて、引張軸力下の No. 1, No. 2 試験体のほうが大きくなっている。

引張軸力下で破壊させた後、圧縮軸力下で曲げせん断加力を行った No. 1 試験体の結果によれば、正加力時と同等のせん断強度を有していることがわかる。この結果は多数回繰返し载荷のものではないが、引張軸力下で破壊した RC 柱は、その後の圧縮軸力下において大きく劣化する危険性は小さいという結果であった。

3.3 せん断強度

図 3.3 にせん断強度と複合軸力との関係を示すが、圧縮軸力から引張軸力に移行するほど、せん断強度が低下していることがわかる。図中には、靱性保証指針のせん断強度式（以下、靱性保証型式）と全補強式の計算結果も示されている。45° トラス機構に相当する全補強式の値が過小評価となっているのに対し、靱性保証型式の結果は、実験結果とよく対応している。

ただし、靱性保証型式では、引張軸力下においてアーチ機構は消滅し、トラス機構のみを考慮することにより、引張軸力の影響を考慮しているものの、軸力の大きさの影響については

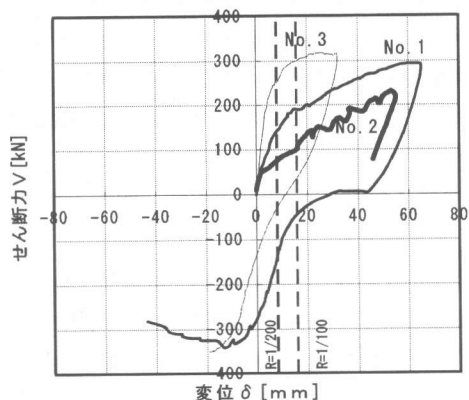


図 3.2 せん断力-変位関係

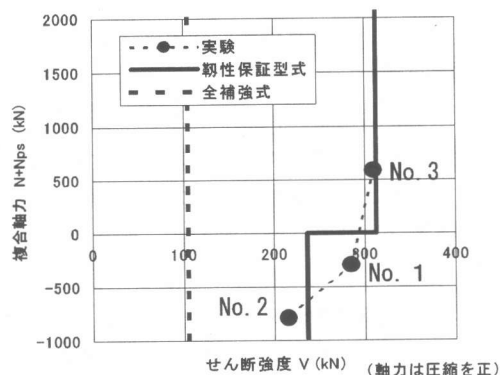


図 3.3 せん断強度と複合軸力の関係

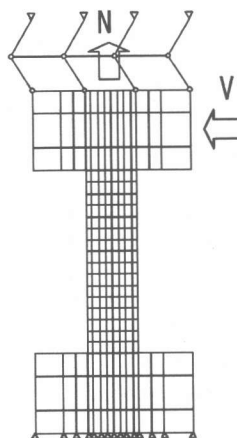


図 4.1 FEM解析モデル

考慮されていない。これに対して、No. 1 と No. 2 試験体の実験結果を比較すると、引張軸力の大きさによりせん断強度が大きく変化している。

4. せん断抵抗機構に関する解析的検討

本章では、引張軸力が作用する柱のせん断抵抗機構やせん断強度について、トラスアーチ理論を前提として、FEM解析や修正圧縮場理論により解析的に考察する。

4.1 解析法の概要

1) FEM解析

解析モデルを図 4.1 に示すが、コンクリートは 4 節点平面応力要素、主筋および P C 鋼棒は線材にモデル化した。実験では、終局時に主筋は降伏し、P C 鋼棒は未降伏であったが、解析では、より明瞭なせん断破壊を再現するために、主筋および P C 鋼棒を降伏させないように弾性材料とした。なお解析法の詳細は、文献 3) を参照されたい。

解析での加力方法は、プレストレスを導入せずに軸力のみを載荷している。軸力は、実験と同様にせん断力が 100kN 時に所定軸力となるようにせん断力に比例させて載荷し、その後は軸力を一定として、せん断力のみを増加させた。

2) 修正圧縮場理論

Collins の修正圧縮場理論⁴⁾ (以下、MCFT) により、せん断抵抗機構に対する軸力の影響を考察する。コンクリートの圧縮応力 σ_2 と圧縮ひずみ ϵ_2 の関係を式(1)のように仮定し、釣合条件、ひずみの適合条件を満足させながら、主応力と主ひずみの角度が一致するものとして計算した。

$$\sigma_2 = v f_c' \left(2 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_0} \right)^2 \right) \quad \text{---- (1)}$$

ここで、 $v = \frac{1}{0.8 + 170\epsilon_1} \leq 1.0$: コンクリート有効係数

ϵ_1, ϵ_2 : 主ひずみ, f_c' : コンクリート圧縮強度,

ϵ_0 : 圧縮強度時のひずみ

ただし、加力方法は実験と異なり、一定軸力下でせん断力を漸増させて解析を実施した。

4.2 解析結果

1) せん断力-変位関係

FEM解析結果のせん断力と変位の関係を図 4.2 に示す。図より、圧縮軸力から引張軸力

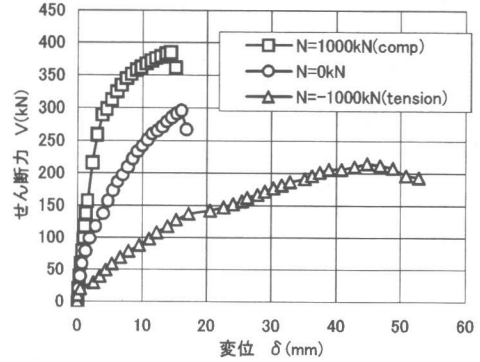
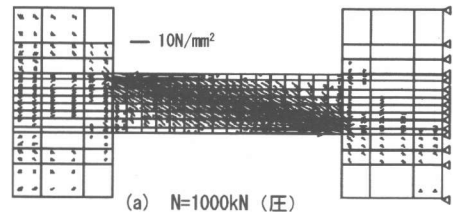
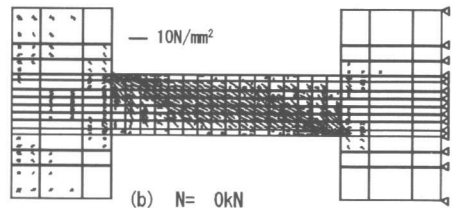


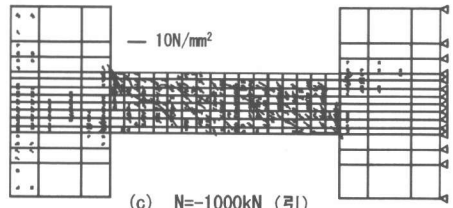
図 4.2 せん断力-変位関係



(a) N=1000kN (圧)



(b) N= 0kN



(c) N=-1000kN (引)

図 4.3 主圧縮応力分布

に移行するにつれて剛性低下が大きくなり、せん断強度も低下する傾向がみられる。逆にせん断強度時の変形は、引張軸力下では急激に増大している。N=-1000kN の解析での強度時の部材角は約 3/100 で、No.2 試験体 (N+Nps=-800kN) の実験結果と同程度の値となっている。

2) せん断抵抗機構

FEM解析結果による終局強度時の主圧縮応力分布を図 4.3 に示す。圧縮軸力下の図 (a)

では、両端部を直接結ぶような、いわゆるアーチ機構的な力の流れがみられるのに対し、引張軸力下の図(c)では、両端部を直接結ぶような力の流れはほとんどみられず、圧縮応力と材軸とのなす角度も、図(a)に比べて大きくなっている。このような力の流れは、トラスアーチ理論において、せん断補強筋が介在して圧縮ストラットが部材全域に分布する、いわゆるトラス機構的な力の流れと判断される。以上の傾向は、引張軸力下のRC柱の研究である文献2)での指摘と一致している。

3) せん断強度

図4.4に、実験および計算結果のせん断強度と軸力の関係を示すが、FEM解析および修正圧縮場理論(MCFT)の結果は、実験と同様に軸力が引張側に移行するにつれてせん断強度が減少する傾向となっている。しかし、MCFTの計算結果は、引張軸力下での強度低下が実験に比べて小さめとなっている。

4) 帯筋のひずみ

図4.5には、終局強度時の帯筋ひずみと軸力の関係を示す。実験結果として、ひずみ計測値の最大値と平均値を示しているが、帯筋ひずみは、両端部から230mm内側の部分にほぼ均等間隔に貼付した7点のひずみゲージにより計測された値である。また、FEM解析の帯筋ひずみは、図4.6に示す評価領域の平均値である。

図より、FEM解析結果は実験結果のひずみの平均値よりはやや大きめであるものの、ほぼ実験結果と対応している。これに対して、MCFTの結果は、ひずみの平均値であるにもかかわらず、実験結果に比べてかなり大きめのひずみとなっている。

5) 圧縮ストラット角度

本項では、FEM解析とMCFTによる計算結果の圧縮ストラット角度について比較検討する。MCFTは、ストラット角度が可変なトラス機構に基づきせん断力とせん断変形の評価するものであり、RC柱に対しては、曲げモーメントの影響の小さい柱中央部分の挙動と

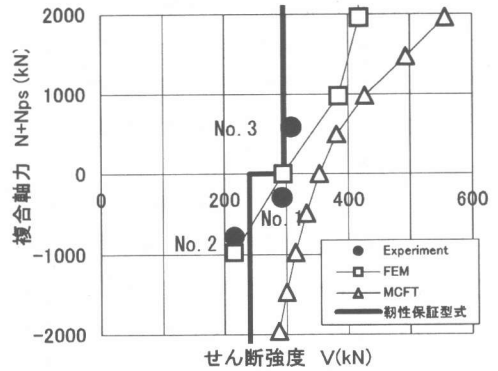


図4.4 せん断強度と軸力の関係

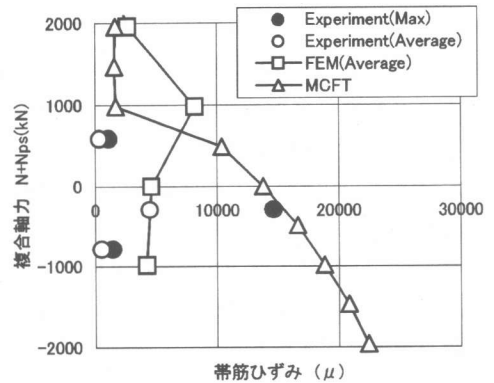


図4.5 帯筋ひずみと軸力の関係

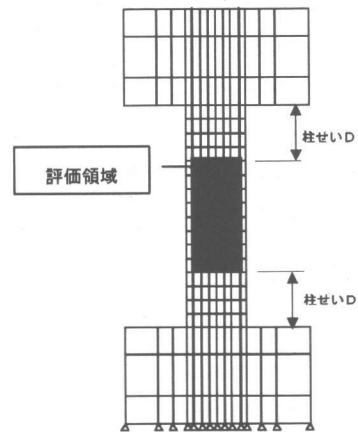


図4.6 解析結果の評価領域

比較すべきものと考えられる。よって、FEM解析でも、図4.6の評価領域での圧縮ストラット角度について検討することとしたが、ストラ

ット角度は、主圧縮応力の角度を、応力の大きさによる重み付けで平均した値として評価した。これは、圧縮応力の大小に関わらず単純平均するよりは、力の流れの全体像を評価できると考えたためである。

終局時の圧縮ストラットと材軸のなす角度 ϕ と軸力の関係を図 4.7 に示す。図より、圧縮軸力下では、FEM と MCFT による解析結果はおよそ対応しており、その角度はアーチ機構角度と A 法トラス機構角度の間にあることがわかる。

一方、引張軸力下では両解析結果は大きく異なり、FEM 解析では B 法トラス機構の角度 45° に近くなっているのに対し、MCFT 解析では、A 法トラス機構の最小角度 26.6° に近くなっている。しかし、実験での斜ひび割れ角度はほぼ 45° であり、引張軸力下では斜めひび割れ間のせん断伝達はあまり大きくないと予想され、圧縮ストラット角度 ϕ が MCFT の結果のように小さくなるのが現実的かどうかについては、さらに検討すべきである。

5. まとめ

本報で得られた結果をまとめて以下に示す。

- 1) RC 柱のせん断抵抗機構は、圧縮軸力下ではアーチ的な機構が顕著であるのに対し、引張軸力下ではアーチ的な機構よりは、トラス的な機構が卓越してくると判断される。このような傾向は、文献 1), 2) での指摘と同様であった。
- 2) 靱性保証型指針のせん断強度式の結果は、実験結果とよく一致していた。しかし、引張軸力の大きさの違いにより、せん断強度が大きく変化した実験の傾向とは必ずしも対応しなかった。
- 3) RC 柱中央部分における圧縮ストラットの角度は、圧縮軸力下では、FEM 解析および修正圧縮場理論ともに、アーチ機構角度と A 法トラス機構角度の中間の角度であった。一方、引張軸力下での圧縮ストラット角度は、

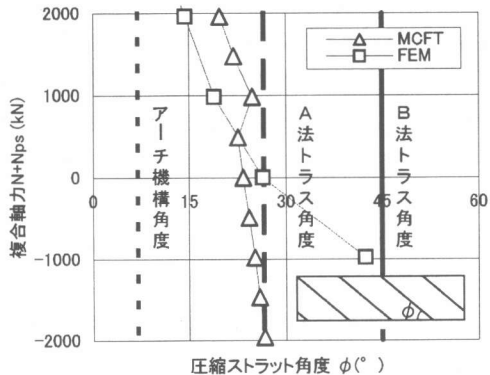


図 4.7 圧縮ストラット角度と軸力の関係

FEM 解析では、B 法トラス機構角度に近く、MCFT では、A 法トラス機構の角度に近いという結果であった。しかし、修正圧縮場理論では、引張軸力下のせん断強度や帯筋ひずみの実験結果とやや異なり、また圧縮ストラット角度も、実験結果の斜めひび割れ角度と相違していた。したがって、引張軸力下での修正圧縮場理論のせん断抵抗機構が現実的なものかどうかについては、さらに検討が必要である。

【参考文献】

- 1) 吉田, 北山, 西川: 引張軸力を受ける鉄筋コンクリート柱のせん断強度に関する研究, JCI 年次論文報告集, Vol. 18, No. 2, pp. 875-880, 1996
- 2) 横地, 北山, 小山, 豊田: 変動軸力が鉄筋コンクリート柱のせん断性状に与える影響, JCI 年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 475-480, 1998
- 3) 白石, 林, 桑原, 堀井: 大口径 PHC 杭の破壊機構と終局強度に関する一考察, コンクリート工学論文集, 第 8 巻, 第 1 号, pp. 85-93, 1997. 1
- 4) M. P. Collins: The Shear Strength of Reinforced Concrete Structure, JCI Annual Convention 1995

【謝辞】

本研究は、平成 12 年度文部省科学研究費補助金 (基盤研究 (A) (2)) 課題番号 (12305036) (研究代表者 狩野芳一) によりました。