## 論文 ビーム・アーチ機構に基づく引張軸力を受ける RC 部材のせん断耐力 評価

岩本 拓也\*1・中村 光\*2・山本 佳士\*3・三浦 泰人\*4

要旨: 引張軸力, せん断補強筋比をパラメータとした RC 柱の数値解析を行い, 引張軸力を受ける RC 部材 のせん断耐力評価を試みた。せん断補強筋を有さない供試体では, 引張軸力によりせん断耐力が低下し, せ ん断断補強筋を配置することで, 引張軸力によるせん断耐力の低下が抑制されることを示した。ビーム・ア ーチ機構の分離によるせん断耐力評価では, せん断補強筋の有無により, せん断抵抗メカニズムが異なるこ とを示した。引張軸力を考慮した合理的な設計手法確立のためには, 引張軸力の影響評価を, せん断補強筋 を有さない部材のみで行うのではなく, せん断補強筋を含めて行う必要性が示唆された。 キーワード: せん断耐力, 引張軸力, RC 柱, ビーム機構, アーチ機構

## 1. はじめに

RC 部材のせん断性状は,軸力の影響を受けることが 一般的に知られている。圧縮軸力は PC 部材や RC 柱等, 様々な部材に作用することから,数多くの研究が行われ ている。圧縮軸力が作用する場合には,せん断耐力は増 加し,その影響は設計式<sup>1)</sup>に反映されている。一方で引 張軸力に関しては,せん断耐力を低下させることが知ら れているものの<sup>2)</sup>,行われた研究は数少なく,引張軸力 が RC 部材のせん断性状に及ぼす影響は不明な点が多い。 したがって,土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>におい ては,せん断耐力に対する軸引張力の影響を,安全側に 考慮するように規定されている。このような背景のため, 引張軸力下における現在のせん断耐力算定式は,実際の せん断耐力に対して過大な安全率を与える可能性があり, 引張軸力のせん断耐力に対する適切な影響評価が望まれ ている。

そこで本研究では、軸力作用下でせん断破壊する RC 柱を対象に、3 次元剛体バネモデル(3D-RBSM)<sup>3)</sup>を用 いた数値解析を行い、解析での軸力の影響の再現性を確 認したのちに、せん断補強筋比の異なる供試体のせん断 耐力に対する引張軸力の影響を検討した。また、解析に より得られた応力分布を用いたビーム・アーチ機構の分 離や、トラス機構の算定を行い、引張軸力を受ける RC 部材のせん断耐力評価および考察を行った。

### 2.3D-RBSM の軸力の影響に対する適用性評価

#### 2.1 解析手法

本研究では、ボロノイ分割を用いたランダムな要素形 状を有する 3 次元 RBSM<sup>3</sup>によりコンクリートをモデル 化し、鉄筋ははり要素によりモデル化した。構成則等の

*1	名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)
*2	名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)
*3	名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博(工) (正会員)
*3	名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻助教 博(工) (正会員)

詳細は参考文献を参照されたい。3次元 RBSM は様々な 部材で適用性が示されており、ひび割れ進展挙動など、 コンクリートの不連続面の発生から破壊に至るまで精度 よく評価できることが確認されている<sup>4)</sup>。

## 2.2 解析対象

ここでは、軸力作用下での解析の妥当性を検証する ため、既往のせん断破壊する RC 柱の、軸力(圧縮、引 張)をパラメータとした載荷実験 5を対象とした。供試 体概要を図-1 に示す。また、解析対象一覧を表-1 に 示す。試験体の断面は 300mm × 300mm (有効高さ 260mm)で、スパン長は 1200mm、せん断スパン比は 2.31である。主筋には、試験体をせん断破壊させるため に、引張鉄筋比 0.19%、降伏強度が約 1000N/mm<sup>2</sup>の高強 度鉄筋が配置されている。せん断補強筋比は  $p_w=0.39$ %

(2D6, 55mm ピッチ), 軸力は, 圧縮軸力は約 152kN, 609kN (軸応力度: 1.7N/mm<sup>2</sup>, 6.7N/mm<sup>2</sup>), 引張軸力は 約-148kN, -368kN (軸応力度: -1.9N/mm<sup>2</sup>, -4.1N/mm<sup>2</sup>)



図-1 実験供試体概要(単位 mm)

表-1 解析対象一覧

試験体名	軸力 N(kN)	圧縮強度 $f_c(N/mm)$
S-2	152	38.07
S-3	609	36.24
S-4	-148	36.24
S-5	-368	38.07



図-2 解析モデル

の4ケース、コンクリート圧縮強度は約36N/mm<sup>2</sup>である。 荷重載荷方法は、鉛直のアクチュエータにより軸力を与 え、建研式加力装置により、試験体に逆対象曲げせん断 力を作用させている。

## 2.3 解析モデル

解析モデルを図-2 に示す。コンクリート要素はボロ ノイ分割により、平均要素寸法を 20mm とした。コンク リートの材料定数は、実験のコンクリート圧縮強度をも とに、土木学会コンクリート標準示方書に基づいてヤン グ係数、引張破壊エネルギーを算定し、引張強度は、実 験における曲げひび割れ発生荷重と一致するようにキャ リブレーションを行い決定した。鉄筋は、主筋、せん断 補強筋共にはり要素でモデル化し、材料定数は実験値を 用いた。図-2 の部材左端のフーチングに配置した載荷 板要素を荷重制御することで軸力を与え、実験のせん断 力載荷点に配置した載荷板要素を変位制御し、解析を行 った。

#### 2.4 実験結果と解析結果の比較

図-3に、それぞれの供試体の実験、解析で得られた せん断カー変位関係を示す。図中点線が実験結果、実線 が解析結果を示し、線の色は各軸力を示す。実験におい ては、軸力が圧縮から引張になるにつれて剛性が低下す る傾向がみられた。せん断耐力は、軸力が圧縮から引張 になるにつれて減少する傾向があるものの、大きな耐力 低下は確認されなかった。解析では、実験と同様に、軸 力が圧縮から引張になるにつれて剛性とせん断耐力が低 下する傾向が認められる。圧縮軸力下では、斜めひび割 れ発生後の剛性とせん断耐力を大きく評価しているが、 引張軸力下では剛性、せん断耐力共に精度良く捉えられ ている。

図-4に、軸力N=609kN, 152kN, -368kNが作用する 供試体の,実験終了時におけるひび割れ図と,解析で得 られる実験終了時と同変位でのひび割れ図を示す。実験 では、部材端の斜めひび割れや、部材中央を中心とした 軸方向鉄筋に沿うひび割れが観察されている。解析にお いても同様のひび割れを再現している。また、軸力が異 なる供試体に対しては、実験では N=609kN が作用する 供試体では、斜めひび割れと材軸のなす角度が小さいの に対し、N=152kN, -368kN の供試体では、角度が大き



くなっている。また,引張軸力下では,材軸直角方向の ひび割れが確認された。解析では,軸力の変化に伴う斜 めひび割れの角度が変化する傾向や,引張軸力下での材 軸直角方向のひび割れが確認され,軸力の違いによるひ び割れ性状を適切に再現している。

以上より,解析は実験を妥当に評価しており,逆対象 曲げせん断力を受ける両端固定柱の,軸力作用下での解 析の妥当性が確認された。

## 3. せん断補強筋比の異なる供試体に対する引張軸力の 影響

ここでは、せん断補強筋比が異なる供試体の、せん断耐力に対する引張軸力の影響を検討するため、2章で行ったせん断補強筋比  $p_w=0.39\%$ の供試体に加え、 $p_w=0.0\%$ 、0.19%の供試体の解析を新たに行った。供試体諸元は2章で示した通りであり、コンクリート圧縮強度は $36N/mm^2$ で統一した。 $p_w$ は、せん断補強筋の配置間隔を



図-5 各せん断補強筋比におけるせん断カー変位関係

変えることで変更した。引張軸力は、N=-368kN,-148kN とし、軸力を作用させない N=0.0kN の解析も行った。

図-5 に各せん断補強筋比における,各軸力下でのせん断力-変位関係を示す。線の色は各軸力を示す。図-5(a)に示す, p<sub>w</sub>=0.0%の供試体では,引張軸力の増加に伴い,剛性,せん断耐力の低下が確認された。特に N=-368kNの供試体では,斜めひび割れ発生後の剛性の低下が顕著であり,せん断耐力は,N=0.0kNと比較すると78kN(49.7%)低下し,せん断補強筋を有さない供試体では,引張軸力がせん断耐力に大きな影響を及ぼすことが認められた。

図-5(b)に示す,  $p_w$ =0.19%の供試体においては,引張 軸力の増加に伴い,剛性,せん断耐力の低下が確認され, N=-368kNの供試体のせん断耐力は,N=0.0kNと比較す ると 67kN (26.2%)低下した。しかし,剛性,せん断耐 力の低下は  $p_w$ =0.0%の供試体ほど顕著ではなく,せん断 補強筋を配置することで引張軸力の影響が小さくなるこ とが認められた。図-5(c)に示す, $p_w$ =0.39%の供試体で は,引張軸力の増加に伴い,剛性の低下は確認されるも のの,せん断耐力の大きな低下は確認されなかった。 N=-368kNの供試体における,N=0.0kNと比較したせん 断耐力の低下は 18kN (6.8%)であり,せん断補強筋比 を大きくすることで,軸引張力の影響はより小さくなる ことが認められた。

以上より, せん断補強筋の有無, またせん断補強筋比 によって, 引張軸力がせん断耐力に及ぼす影響は異なる ことが確認された。

## 4. ビーム・アーチ機構に基づくせん断耐力評価

3 章で行った数値解析の結果,引張軸力の影響はせん 断補強筋比により異なることが認められた。ここでは, 3 章での解析を基に,解析により得られる応力分布を用 いたビーム・アーチ機構の分離やトラス機構の算定を行 い,引張軸力下でのせん断耐力評価を試みた。



図-6 応力分布の材軸方向分布の概念図

# 4.1 ビーム・アーチ・トラス機構の分離方法(1) ビーム・アーチ機構

一般的に, RC 部材のせん断抵抗メカニズムとしては, ビーム機構とアーチ機構が存在する。ビーム・アーチ機 構は,実験ではコンクリートの応力の測定が困難であり, 明確に分離することができないが, RBSM を用いて局所 応力を適切に算定すれば,ビーム・アーチ機構の分離が 可能であることを,著者らは既往の研究で示した<sup>の</sup>。

材軸に作用する曲げモーメント M (式(1)) を材軸方向 の座標 x で微分することにより求まるせん断力 V(式(2)) から,ビーム機構  $V_b$  (式(3)) とアーチ機構  $V_a$  (式(4)) が以下のように求まる。

$$M = (T_s + C_s) \cdot \frac{j}{2} + C_c \cdot j_{Cc} + T_c \cdot j_{Tc}$$
(1)

$$V = \frac{dM}{dx} = V_b + V_a \tag{2}$$

$$V_b = \left(\frac{dT_s}{dx} + \frac{dC_s}{dx}\right) \cdot \frac{j}{2} + \frac{dC_c}{dx} \cdot j_{Cc} + \frac{dT_c}{dx} \cdot j_{Tc}$$
(3)

$$V_a = C_c \cdot \frac{dj_{Cc}}{dx} + T_c \cdot \frac{dj_{Tc}}{dx}$$
(4)

ここで、 $T_s$ :鉄筋張力、 $C_s$ :鉄筋圧縮力、 $C_c$ :コンクリート圧縮力、 $T_c$ :コンクリート引張力、j:圧縮鉄筋と 引張鉄筋との距離、 $j_{Cc}$ :コンクリート目張応力重心と 材軸との距離、 $j_{Tc}$ :コンクリート引張応力重心と材軸と の距離である。図-6 に、断面に作用する応力分布の材 軸方向分布の概念図を示す。この応力分布を基に、dx間隔で隣接する2つの断面間で上式を用いることでビー ム・アーチ機構の分離が可能である。本研究では dx=50mmとし、ビーム・アーチ機構の分離を行った。

(2) トラス機構

トラス機構が負担するせん断力 V<sub>s</sub>は,式(5)に示すト ラス理論に基づいて算出した。斜めひび割れ進展角度は 45度と仮定した。

$$V_s = \frac{A_w \cdot \sigma_w \cdot jd}{s} \tag{5}$$

ここで、 $A_w$ : せん断補強筋 1 組の断面積、 $\sigma_w$ : せん断補 強筋の応力、jd: モーメントアーム長 (j=1/1.15, d: 有 効高さ)、s: せん断補強筋間隔である。せん断補強筋の 応力は、算定位置断面のせん断補強筋の最大応力とし た。

(3) ビーム・アーチ・トラス機構の分離結果の一例

図-3 にせん断力-変位関係を示す, せん断補強筋比 p<sub>w</sub>=0.39%, 引張軸力 N=-148kN の供試体を用いて, ビー ム・アーチ・トラス機構の分離結果の一例を示す。図ー 7 に変位が異なる場合のビーム・アーチ・トラス機構が 負担するせん断力の材軸方向分布と、応力分布図、ひび 割れ図を示す。図の左端は載荷側の端部、右端は支点側 の端部を示す。図中の赤線、青線で示すビーム・アーチ 機構が負担するせん断力は、断面位置によって大きさは 変化するが、黒線で示すビーム・アーチ機構の和から算 出された全せん断力は、破線で示す外力によるせん断力 と平均的に等しくなっている。斜めひび割れ発生前の変 位 2.0mm の時点ではビーム機構が全せん断スパンで主 にせん断力を負担し、アーチ機構が負担するせん断力は 小さいことが確認できる。斜めひび割れ発生後の変位 10.0mm の時点では,端部付近では斜めひび割れに沿っ た力の流れが確認され、アーチ機構が支配的となりビー ム機構は小さくなる一方、せん断スパン中央付近ではビ ーム機構が支配的である。また、斜めひび割れ発生領域 においてトラス機構が負担するせん断力の増加が確認さ れる。ピーク時の変位 15.5mm の時点では、端部付近で はアーチ機構が支配的であり、せん断スパン中央付近で はビーム機構が支配的である。変位 10.0mm 時点と比較 すると、軸方向鉄筋に沿うひび割れの発生領域の拡大に 伴い、ビーム機構が支配的な領域も拡大する様子が確認 される。トラス機構が負担するせん断力は、全せん断ス パン領域で大きくなり、斜めひび割れ発生領域ではせん 断補強筋が降伏し、一定値となることが確認された。

図-8 に、ビーム・アーチ・トラス機構が負担するせ ん断力-変位関係を示す。それぞれのせん断力は、図-7 で示した各変位におけるビーム・アーチ・トラス機構 の材軸方向分布を、斜めひび割れの発生領域である端部 から450mm(断面高さの1.5倍)の領域で平均化するこ とで算出した。平均化領域の設定は、ビーム・アーチ機 構は部材軸方向でその割合が大きく変化するが、せん断 耐力にはせん断ひび割れ位置でのメカニズムが支配的に なると考えて行った。なお、端部付近ではコンクリート 圧縮力や鉄筋張力等の変化が大きいため、平均化の際に は端部から 50mm 以内の値は含めなかった。斜めひび割 れ発生前は、ビーム機構が支配的であり、アーチ・トラ ス機構はせん断力を負担していない。斜めひび割れ発生 後は、アーチ・トラス機構が負担するせん断力が増加し、 ビーム機構も勾配が緩やかになるものの増加することが 確認される。ピーク時では、トラス機構の負担するせん 断力が一定値となり、ビーム機構の負担するせん断力が 低下することでポストピークを迎えることが分かる。ア ーチ機構が負担するせん断力は、ピーク後にほぼ一定値 となることが確認された。





図-11 pw=0.39% 各せん断抵抗メカニズムの負担するせん断力

## 4.2 ビーム・アーチ・トラス機構の分離結果

図-9 に、p<sub>w</sub>=0.0%の供試体における,各軸力下での 各せん断抵抗メカニズムが負担するせん断力-変位関係 を示す。実線は各せん断抵抗メカニズムが負担するせん 断力,破線は外力によるせん断力を示し,線の色は各軸 力を示す。ビーム機構の負担するせん断力は,各軸力下 において斜めひび割れ発生以降低下する。軸力 N=0.0kN, -148kN の供試体では,再び増加する挙動を示すが,こ れは軸方向鉄筋に沿うひび割れが端部付近まで進展した ためと考えられれる。ピーク時では,引張軸力の増加に 伴いビーム機構の負担するせん断力が減少することが認 められた。また,外力がピークを迎えるとともにビーム 機構もピークを迎えることが分かる。アーチ機構の負担 するせん断力は,斜めひび割れ発生以降,軸力 N=0.0kN, -148kNの供試体では急激に増加し、N=-368kNの供試体 では緩やかに増加した。N=-368kNの供試体では、軸力 作用時に材軸直角方向に初期ひび割れが発生し、斜めひ び割れが初期ひび割れに沿うように発生し、ひび割れ進 展角度が大きくなったため、アーチ機構の増加が緩やか になったと考えられる。ピーク時では、軸力の増加に伴 いアーチ機構の負担するせん断力が減少することが認め られた。

図-10 に、*p*<sub>w</sub>=0.19%の供試体における,各軸力下で の各せん断抵抗メカニズムが負担するせん断力-変位関 係を示す。ビーム機構の負担するせん断力は,斜めひび 割れ発生時点では引張軸力の影響がみられるが,ピーク 時では引張軸力の大きさに関わらず,同程度となること が確認された。せん断補強筋によるトラス機構も同様に, 引張軸力の大きさに関わらず同程度のせん断力を負担し ていることから、せん断補強筋が配置されたことにより、 引張軸力によるビーム機構の低下が抑制されたと考えら える。アーチ機構の負担するせん断力は、p<sub>w</sub>=0.0%供試 体と同様に、引張軸力の増加に伴い低下することが確認 された。

図-11 に、*p*<sub>w</sub>=0.39%の供試体における、各軸力下での各せん断抵抗メカニズムが負担するせん断力-変位関係を示す。ビーム・トラス機構は、*p*<sub>w</sub>=0.19%と同様に、軸力の大きさに関わらず同程度のせん断力を負担することが確認される。アーチ機構は、*p*<sub>w</sub>=0.0%、*p*<sub>w</sub>=0.19%と比較すると軸力によるせん断力の低下が抑制されており、せん断補強筋比を大きくすることでアーチ機構の低下も抑制されることが確認できる。

以上より, せん断補強筋を有さない供試体では, 引張 軸力はビーム・アーチ機構双方に影響を及ぼすため, せ ん断耐力は大きく低下する。一方で, せん断補強筋を有 する供試体では, ビーム機構の低下が抑制され, またせ ん断補強筋比を大きくすることで, アーチ機構の低下も 抑制されることにより, 引張軸力下でのせん断耐力の低 下が抑制されることが示された。

## 4.3 引張軸力の影響を考慮したせん断耐力評価に対する 一考察

土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、棒部材のせん断耐力に対する軸力の影響を、以下のように規定している。

$V_{\rm v} = \beta_n \cdot V_{cd} + V_{sd}$	(6)
---	-----

ここで、V,:棒部材の設計せん断耐力、V,:せん断補強 筋以外が受け持つせん断耐力, Vs: 棒部材の設計せん断 耐力であり、β,は軸力の影響を表す係数である。これに よると、軸力はせん断補強筋を有さない部材のせん断耐 力に影響を及ぼし、 せん断補強筋が配置された部材にお いても、軸力の影響は同様とみなされている。本研究の 解析結果によると、せん断補強筋を有さない供試体では、 引張軸力によりせん断耐力の低下が確認された。しかし, せん断補強筋を有する供試体では、ビーム機構、アーチ 機構が負担するせん断力の低下が抑制され、引張軸力の 影響が小さくなることが明らかとなり、引張軸力下での せん断抵抗メカニズムは, せん断補強筋の有無により異 なると考えられる。これらより、せん断補強筋を有さな い部材のみで引張軸力の影響を評価することは、実際の せん断耐力を過小評価する可能性がある。引張軸力の影 響を考慮した合理的な設計手法の確立のためには、引張 軸力の影響をせん断補強筋を含めて評価する必要性が示 唆された。

本研究では、3次元 RBSM を用いて引張軸力,せん断 補強筋比をパラメータとした RC 柱の数値解析を行い, 引張軸力を受ける RC 部材のせん断耐力評価を行った。 得られた知見を以下に示す。

- (1) せん断補強筋比が異なる供試体の、せん断耐力に対する引張軸力の影響の検討では、せん断補強筋を有さない供試体では、引張軸力がせん断耐力に大きな影響を及ぼすのに対し、せん断補強筋を配置することで、引張軸力下でのせん断耐力の低下が抑制されることを示した。
- (2) ビーム・アーチ・トラス機構の分離による引張軸力下でのせん断耐力評価では、せん断補強筋を有さない供試体では、引張軸力はビーム・アーチ機構双方に影響を及ぼすためせん断耐力が低下する一方、せん断補強筋を配置することでビーム機構、またせん断補強筋比を大きくすることでアーチ機構の低下が抑制され、せん断耐力の低下が抑制されることを示した。
- (3) (2)より、引張軸力下でのせん断抵抗メカニズムは、 せん断補強筋の有無により異なるため、合理的な設 計手法確立のためには、引張軸力の影響評価をせん 断補強筋を有さない部材のみで行うのではなく、せん断補強筋を含めて行う必要があると考えらえる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編], pp.182-183, 2012
- 田村 隆弘,重松 恒美,原 隆,丸山 久一: 軸方向引張力を受ける RC 梁のせん断耐力算定式に 関する一考察,木学会論文集,No.520/V-28, pp.225-234,1995.8
- 山本 佳士,中村 光,黒田 一郎,古屋 信 明:3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試 体の圧縮破壊解析,土木学会論文集, Vol.64, No.4, pp.612-630, 2008
- Y.H. Gedik, H.Nakamura, Y. Yamamoto, N.Ueda and M.Kunieda : Effect of Stirrups on the Ahear Failure Mechanism of Deep Beams, *Jounal of Advanced Concrete Technology*, JCI, Vol.10, pp.14-30, 2012
- 5) 白石 一郎, 宮脇 毅, 高木 仁之:主筋付着の 有無が RC柱のせん断挙動に及ぼす影響, コンクリ ート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.871-876, 2002
- 6) 岩本 拓也,中村 光,山本 佳士,三浦 泰
  人:RC はりのせん断抵抗メカニズムの検討方法に
  関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.553-558, 2015

## 5. まとめ