論文　主筋付着の有無がＲＣ柱のせん断挙動に及ぼす影響

白石　一郎*1・宮脇　毅*2・高木　仁之*3

要旨：ＲＣ部材のせん断破壊挙動は，トラスアーチ理論によりかなりうまく説明できるとされているが，圧縮軸力から引張軸力に至る場合のトラスアーチ理論の妥当性については，引張軸力下の実験が数少ないため，十分には明らかとなっていない。本研究では，軸力（圧縮および引張），せん断補強筋比，主筋の付着の有無をパラメータとしたＲＣ柱の実験を実施し，そのせん断挙動について検討した。さらに，アーチ機構を再現するための２種類のモデル，すなわち，主筋付着なしの試験体と，主筋付着ありでせん断補強筋のない試験体のせん断挙動の違いについて解析的に考察している。

キーワード：ＲＣ柱，付着，せん断強度，せん断抵抗機構，トラス機構，アーチ機構

1.　はじめに

ＲＣ部材のトラスアーチ理論[1)]によれば，既往の実験結果のせん断破壊挙動をうまく説明でき，せん断強度も精度よく評価できるとされ，日本建築学会「靭性保証型指針[2)]」にも採用されている。しかしながら，軸力が圧縮から引張に至る場合のトラスアーチ理論の妥当性については，十分には明らかとなっていない。

本研究は，軸力（圧縮，引張），せん断補強筋比，主筋付着の有無をパラメータとしたＲＣ柱の実験を実施し，そのせん断抵抗機構，特にアーチ機構について考察したものである。アーチ機構に関する研究としては，せん断補強筋のない試験体により，アーチ機構を詳細に検討したものもあるが[3)]，引張軸力下の挙動についてはほとんど検討されていないのが現状である。

2.　実験概要

2.1　試験体計画

試験体は**図-1，表-1**に示すように，断面300×300(mm)，試験部の長さ 1200(mm)で実大の約1/2スケールで，試験体数は12体となっている。主筋には降伏点 1000(N/mm^2)級の高強度鉄筋をp_g=3.4% 配置し，試験体が曲げ降伏せずにせん断破壊するように計画した。せん断補強筋比は，pw=0.19%，0.39%，0.61%，軸力は，圧縮軸力では150kN，600kN（軸応力度：1.7N/mm^2，6.7N/mm^2），引張軸力では，約-170kN，-370kN（軸応力度：1.9N/mm^2，4.1N/mm^2），コンクリート強度は約36N/mm^2，60N/mm^{2}の２種類となっている。なお，試験体S-9～S-12は，主筋付着を除去し，トラス機構が形成されないように計画したものである。具体的には，グリスを塗布した主筋にビニールチューブを巻いたが，実験結果から，主筋のひずみ勾配がほとんどなく，付着を除去できたことを確認している（**図-8**参照）。

加力装置を**図-2**に示すが，水平および鉛直のアクチュエータにより，それぞれせん断力，軸力を与え，建研式加力装置により，試験体に逆対称曲げせん断力を作用させた。なお，圧縮軸力下での実験は，まず所定の圧縮軸力を載荷させた後に水平力を載荷した。引張軸力下での実

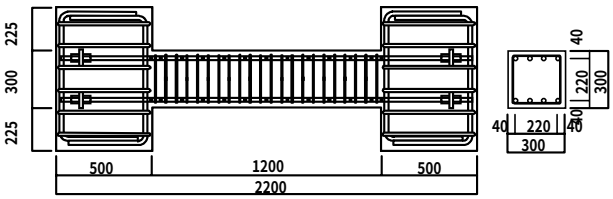


図-1　試験体形状，配筋（単位 mm）

＊１　日本工業大学教授　建築学科　工博（正会員）　＊２　明治大学大学院　理工学研究科建築学専攻
＊３　明治大学専任講師　建築学科　工修（正会員）

験は，水平力が 50kN 時に所定の軸力が作用するように比例載荷し，その後，軸力を一定に保持しながら，水平力を漸増させた。

2.2　使用材料

鉄筋の材料試験結果を**表-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** に示し，最終ひび割れ状況を，主筋付着ありの試験体Ｓ－2,3,5，主筋付着なしの試験体Ｓ-10,11,12 の６体を例として**図-3** に示す。主筋付着ありの試験体では，高圧縮軸力下の S-3 では，斜めひび割れと材軸方向のなす角が小さいのに対して，低圧縮軸力下や引張軸力下では，角度が大きくなっている。また，引張軸力下の試験体 S-5 では，水平ひび割れの発生もみられる。主筋付着なしの試験体では，端部のみにひび割れが発生し，作用軸力による顕著な差異はみられなかった。

主筋付着ありの試験体は，すべてせん断補強筋が降伏しており，また主筋が未降伏であったことからも，せん断破壊したものと判断した。

一方，主筋付着なしの試験体は，せん断補強筋のひずみがほとんどなく，主筋も未降伏であったことから，材端部の圧縮縁コンクリートの圧壊により終局に達したものとみられる。

3.2　せん断力―変位関係

軸力のみが異なる試験体で主筋付着ありと，なしの場合のせん断力―変位関係を**図-4** に示す。図より，主筋付着の有無に関わらず，軸力が圧縮から引張になるにつれて剛性が低下し，

表-1　試験体一覧

試験体名	付着	コンクリート圧縮強度 Fc (N/mm²)	せん断補強筋比 Pw (%)	主筋 本数	主筋 降伏強度 (N/mm²)	軸力 N(kN)	せん断スパン比
S-1	有	36 (38.07)	0.19	8－D22	991	-169	2
S-2			0.39			152	
S-3		36 (36.24)				609	
S-4						-148	
S-5		36 (38.07)				-368	
S-6			0.61			-356	
S-7		60 (63.49)	0.39			153	
S-8						-368	
S-9	無	36 (41.85)	0.19	8－D23	1034	-167	
S-10			0.39			151	
S-11		36 (42.91)				615	
S-12						-363	

（　）内は，実験時の圧縮強度

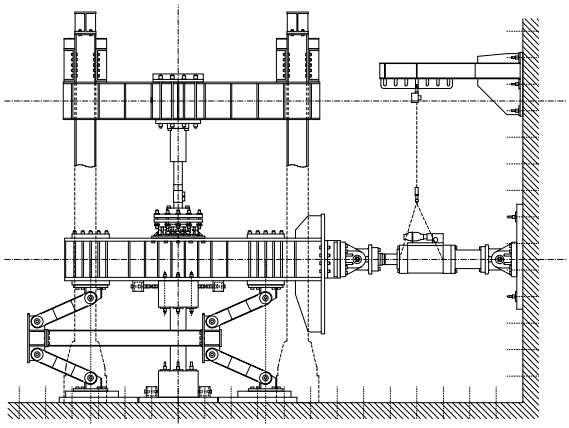
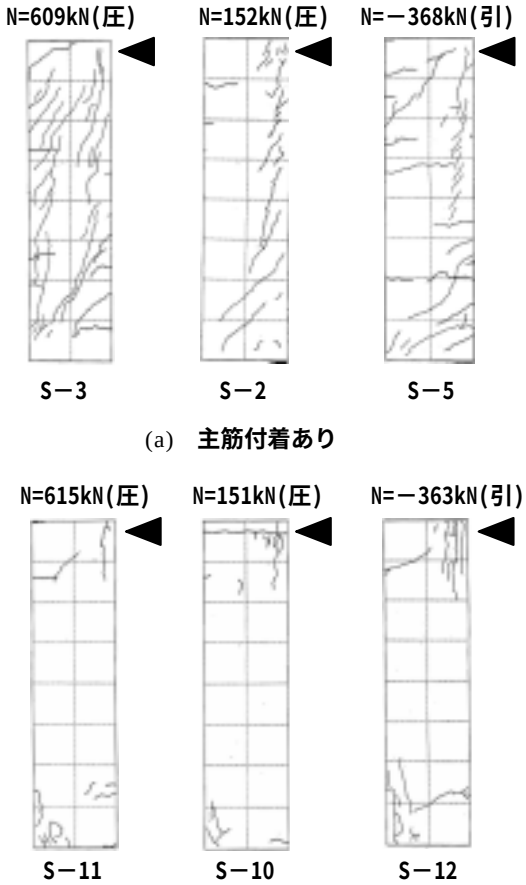


図-2　加力装置

表-2　材料試験結果

鉄筋の種類	断面積 (mm²)	No.	降伏強度 (N/mm²)	ヤング率 (x10⁵N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	降伏歪度 x10⁻⁶
D6	31.67	①	453.0	1.83	570	2525
		②	443.0	1.75	559	2578
		③	442.0	1.78	563	2499
		平均	446.0	1.79	564	2497
D22	387.1	異形PC鋼棒	991	1.88	1134	－
D23	415.5	PC鋼棒	1034	1.88	1126	－



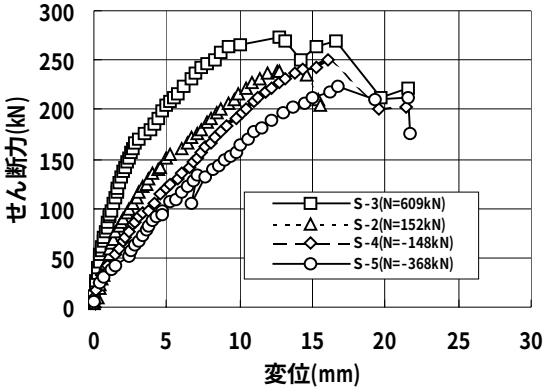
(a)　主筋付着あり

(b)　主筋付着なし

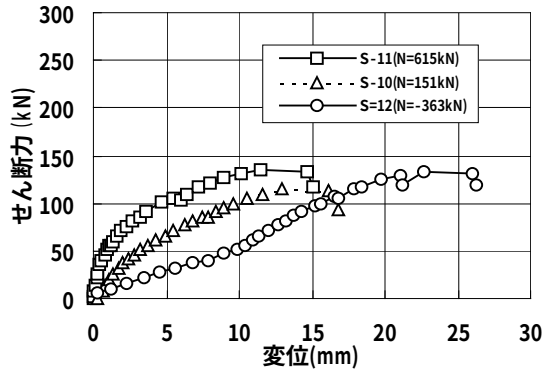
図-3　ひび割れ破壊状況

表-3　実験結果一覧

試験体名	付着	Pw(%)	軸力　N(kN)	Fc(N/mm^2)	項目	曲げ ひび割れ	せん断 ひび割れ	最大耐力
S-1	有	0.19	-167 (引張)	38.07	Qu(kN) δ (mm)	13 0.12	45 1.29	157 13.85
S-2		0.39	＋152 (圧縮)	38.07	Qu(kN) δ (mm)		115	240 12.67
S-3			＋609(圧縮)	36.24	Qu(kN) δ (mm)	110 1.32	171 2.86	272 10.00
S-4			-148 (引張)	36.24	Qu(kN) δ (mm)	15 0.18	81 2.63	250 16.09
S-5			-368 (引張)	38.07	Qu(kN) δ (mm)	23 0.39	60 2.83	222 16.79
S-6		0.61	-356 (引張)	38.07	Qu(kN) δ (mm)	21 0.48	50 2.77	258 20.14
S-7		0.39	＋153 (圧縮)	63.49	Qu(kN) δ (mm)	19 0.15	150 3.27	285 14.03
S-8			-368 (引張)	63.49	Qu(kN) δ (mm)	20 0.4	100 4.38	250 17.38
S-9	無	0.19	-167 (引張)	41.85	Qu(kN) δ (mm)	- -	- -	100 17.37
S-10		0.39	＋151 (圧縮)	41.85	Qu(kN) δ (mm)	- -	- -	117 12.97
S-11			＋615(圧縮)	42.91	Qu(kN) δ (mm)	- -	120 7.15	135 10.71
S-12			-363 (引張)	42.91	Qu(kN) δ (mm)	- -	— —	134 22.64



(a)　S-2～5　(主筋付着あり，pw=0.39%,fc36)



(b)　S-10～12　(主筋付着なし，pw=0.39%,fc36)

図-4　軸力の影響

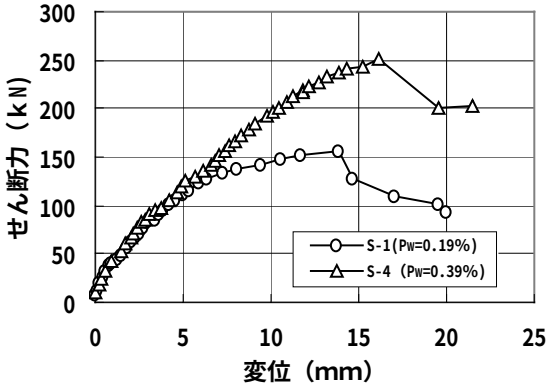


図-5　せん断補強筋の影響

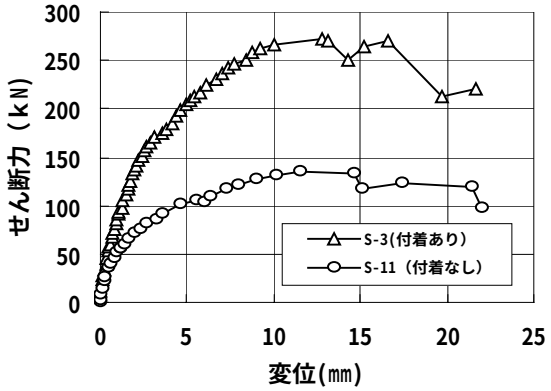


図-6　付着の有無の影響

終局強度時の変位が大きくなる傾向がみられる。**図-4(b)**の主筋付着なしの試験体は，トラス機構のないアーチ機構のみの抵抗機構と考えられる。既往の研究では，引張軸力下においては，いわゆるアーチ機構的な抵抗機構は形成されづらいといわれているが[4),5)]，本実験によれば，軸力比0.1程度の引張軸力下のS-12は，圧縮軸力下の S-11 と同等の耐力を有していた。

せん断補強筋比のみが異なる例として，試験体 S-1 と S-4 の比較を**図-5** に示す。図より，せん断補強筋量の増加により強度が増加し，終局強度時の変形も増大している。この傾向は試験体S-5とS-6の比較においても同様であった。

主筋付着の有無のみが異なる場合の例として，圧縮軸力N　600kNの試験体S-3とS-11の比較を**図-6** に示す。図より，主筋付着のない場合には，付着のある場合に比べて，初期剛性に違いはないが，早期に剛性低下し，せん断強度も小

さくなっている。他の試験体も同様であった。

3.3　せん断強度への諸因子の影響

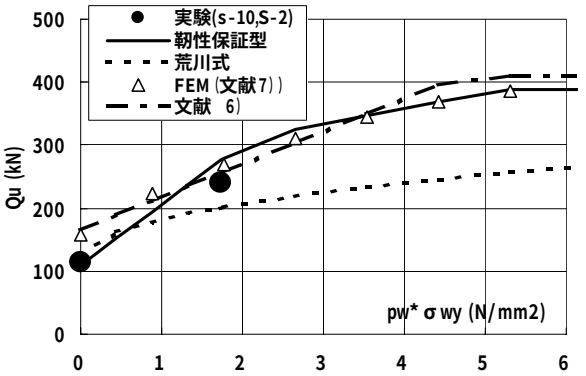
図-7 にせん断強度とせん断補強量の比較を示す。図中には，荒川式（mean 式），靭性保証指針式，B 法を修正した文献６）のせん断強度式，および，ＦＥＭ[7)]の計算結果も示されている。なお，主筋付着なしの試験体については，pw*σwy=0 の点にプロットした。これは，終局強度時の付着なしの試験体の鉄筋ひずみ分布は，**図-8** に示すように，主筋ひずみに勾配がなく，せん断補強筋のひずみもほとんど無いため，せん断補強筋の効果が全くなかったと判断したためである。**図-7** より圧縮軸力下の柱では，すべての計算結果が，実験結果とよく対応しているのに対し，引張軸力下の柱では，せん断補強量の小さい範囲で，靭性保証指針式の値はやや小さめの傾向となっている。これは，靭性保証指針式では，引張軸力下ではアーチ機構の負担分を０としているためと考えられる。また荒川式の結果は，圧縮および引張軸力下において，実験結果と比べて安全側でよく対応している。

図-9 に，せん断強度と軸力の関係を示すが，主筋付着ありの試験体では，靭性保証指針式およびＦＥＭの計算結果は，実験結果の傾向とよく対応している。荒川式は，やや過小評価であるものの，軸力によるせん断強度への影響については，実験と同様の傾向となっている。

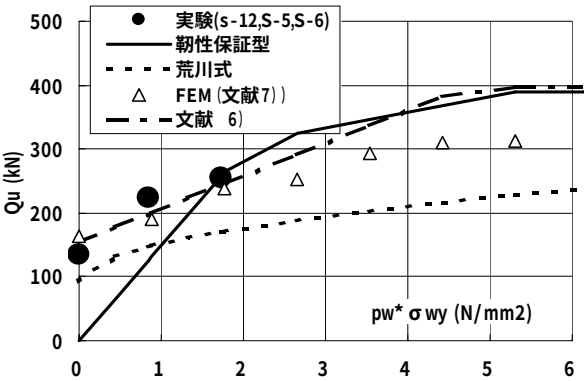
主筋付着なしの試験体では，圧縮軸力下においては靭性保証指針式およびＦＥＭは，実験結果とおよそ対応しているが，引張軸力下では，実験に比べてやや小さめの評価となっている。特に靭性保証指針式は，引張軸力下ではアーチ機構の負担せん断力を０としているため，差異が大きくなっている。一方，荒川式の結果は，実験結果とおおよそ対応している。

4.　アーチ機構に関する解析的考察

終局強度指針や靭性保証指針のせん断強度式には，A法，B法の２式が示されているように，トラス機構とアーチ機構のモデル化については，



(a)　N　150kN（圧縮）



(b)　N　-370kN（引張）

図-7　せん断強度とせん断補強量の関係

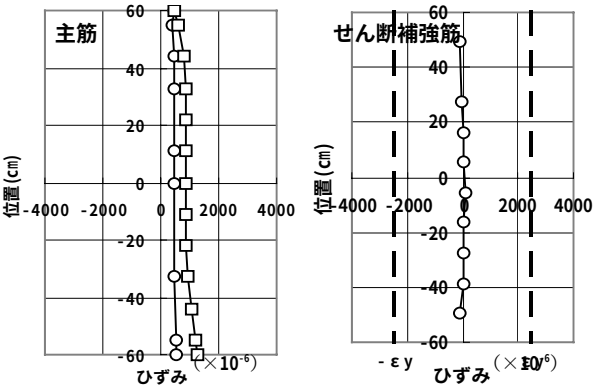


図-8 鉄筋ひずみ分布（S-10）

必ずしも統一された結論が得られているわけではない。アーチ機構に着目すると，その再現試験体としては，次の２つのモデルが考えられる。

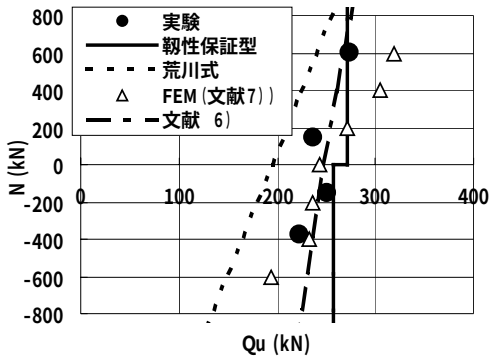
(a)　主筋付着なしの試験体

(b)　主筋付着ありで，pw=0 の試験体

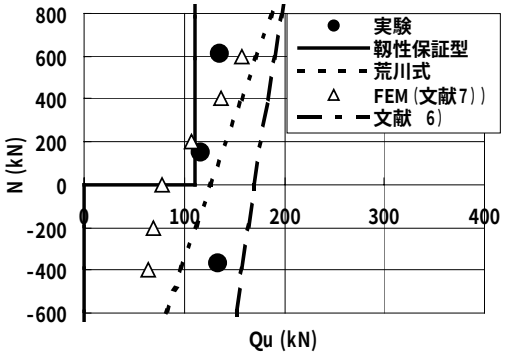
ここでは，これらのアーチ機構再現モデルの違いについて解析的に考察するが，解析結果の信頼性向上のため，異なる２種類のＦＥＭ解析プログラムにより解析を行った。図中での，FEM1 は文献 7)，FEM2 は文献 8）に示した解析プログラムの結果である。両解析の要素分割は同一で

（図-12 参照）で，コンクリートは４節点平面要素，主筋は線材要素，せん断補強筋には積層要素を用いた。なお，解析法の詳細は 文献 7)，8）を参照されたい。

図-10，11 に，解析結果の荷重-変位関係，軸力とせん断強度の関係を示すが，両解析結果ともに，主筋付着ありで pw=0 の場合は，主筋付着なしの場合に比べて，剛性，耐力ともに大きくなっている。**図-12** に終局強度時のひび割れ・変形性状と主ひずみ図を示すが，主筋付着なしの場合には，端部のみにひび割れおよび変形が集中しているのに対し，主筋付着ありの場合には，ひび割れや変形が全域で生じ，通常のＲＣ柱のせん断破壊状況と類似している。また，**図-13，14** には，終局時のせん断応力分布と主応力分布を示すが， 主筋付着ありの方が，せん断応力および主圧縮応力の大きな領域が広くなっている。これは，主筋付着ありの場合では，せん断補強筋がなくても，軸直交方向に対するかぶりコンクリートの曲げ抵抗等により，トラス機構的な抵抗機構が可能であることを示唆して



(a) **付着あり**（S-2,3,4,5）



（b） **付着なし**（S-10,11,12）

図-9　軸力とせん断強度の関係

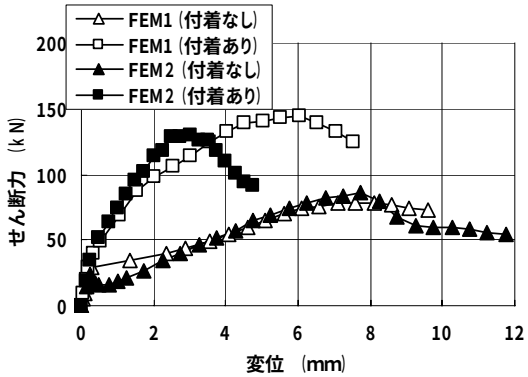


図-10　荷重-変位関係（N=0)

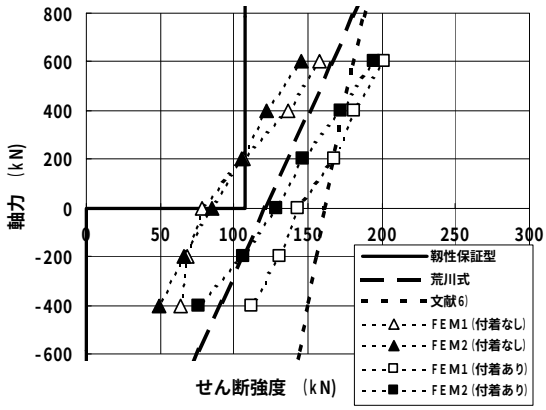
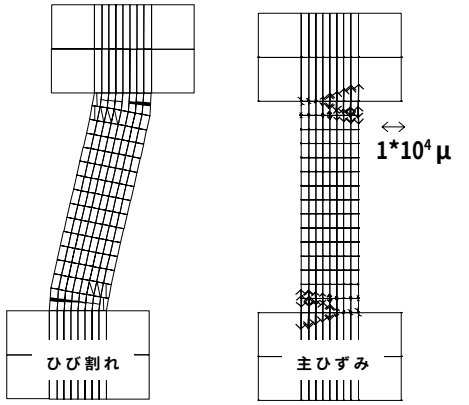
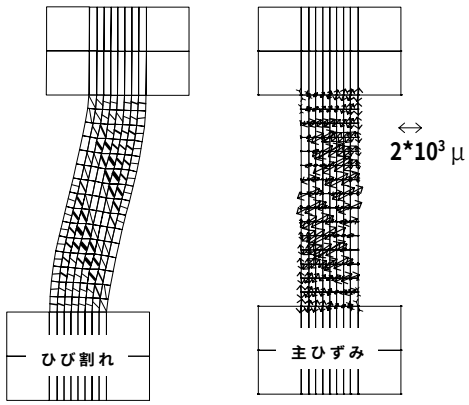


図-11　軸力とせん断強度の関係



(a)　主筋付着なし



（b）　主筋付着あり，pw=0

図-12　変形性状と主ひずみ分布（FEM2，N=0）

いる。このことは，**図-15** に示す主筋付着ありの場合の，主筋ひずみ分布とも符合している。

以上のように，主筋付着なしと主筋付着ありで pw=0 の場合は,共にトラス機構を除いたアーチ機構のみを再現していると考えられるが，せん断性状は大きく異なる。実際のＲＣ柱のアーチ機構としては,主筋付着ありで pw=0 の場合に近いと考えられるが，主筋付着なしの場合は，上下端の危険断面におけるストラット幅が，主筋付着ありの場合に比べて小さく，アーチ機構のせん断強度を安全側に評価するモデル化と考えることができる。

５．まとめ

本報で得られた結論を以下に示す。

１）主筋付着ありの試験体では，軸力が圧縮軸力から引張軸力に移行するほど，早期に剛性低下し,せん断強度も小さくなった。これは，既往の実験結果と同様な傾向である。

２）引張軸力下ではアーチ機構は形成されづらいといわれているが，軸力比 0.1 程度の引張軸力を受ける主筋付着なしの柱では，圧縮軸力下と同等の強度を有していた。

３）アーチ機構の再現としては，主筋付着なしと,主筋付着ありで pw=0 の試験体が考えられるが，両者のせん断性状は大きく異なる。トラスアーチ理論におけるアーチ機構は，主筋付着ありで pw=0 の試験体に近いと思われるが，主筋付着なしの試験体は，アーチ機構強度の安全側の値を与えるものと考えられる。

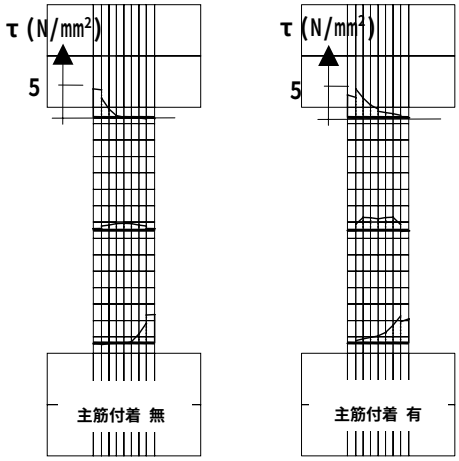
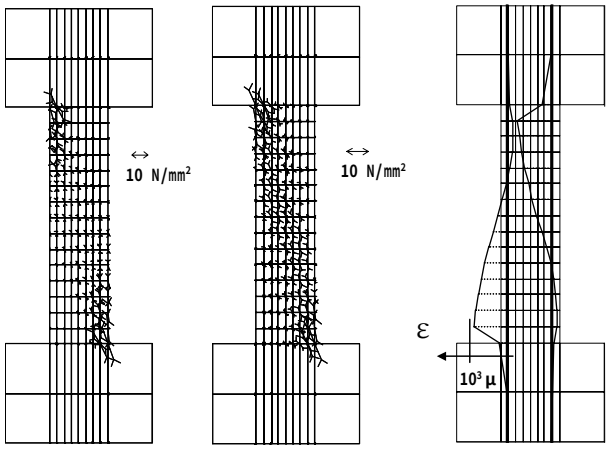


図-13　せん断応力度分布（FEM2,N=0）



(a)主筋付着なし　(b)主筋付着あり

図-14　主応力図（FEM2，N=0）　図-15　主筋ひずみ

参考文献

1）南　宏一：せん断力を受ける鉄筋コンクリート部材の極限解析について，RC 構造のせん断に関するコロキウム論文集，JCI，pp.1-16，1982.

2）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，1999.

3）瀧口克己，西村康志郎：せん断補強筋のない RC 柱部材の斜め圧縮伝達能力，日本建築学会構造系論文集，第 534 号，pp.113-119，2000 年 8 月

4）吉田格英，北山和宏ほか：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

5）白石一郎，高木仁之ほか：引張軸力を受ける RC 柱のせん断抵抗機構に関する研究，JCI 年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.1045-1050，2001

6)白石一郎，高木仁之，狩野芳一：鉄筋コンクリート柱のせん断強度への軸力の影響，JCI 年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.689-694，1996

7)白石一郎，高木仁之，J.Jirsa：ＲＣ造部材のトラスアーチ理論におけるトラス機構角度に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，pp.115-122，2001.10

8)　SBETE : SBETA Computer program for nonlinear finite element of reinforced concrete structure in plane stress state, Program documentation, Cervenka Consulting Pragure,1997