論文　ＲＣ柱のトラスアーチ理論におけるアーチ機構のせん断挙動

白石　一郎＊1・高木　仁之＊2

要旨：トラスアーチ理論により，RC 部材のせん断強度は精度よく評価できるとされているが，トラス機構とアーチ機構のモデル化については未解明の点も多い。このトラスアーチ理論は，強度のみならず変形性能についても評価できる可能性があり，より実状に近いせん断抵抗機構を把握することは重要である。本報では，トラスアーチ理論におけるアーチ機構に着目するが，このアーチ機構の再現モデルには，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２種類が考えられる。本報では，この２種類のアーチ機構再現試験体に対する曲げせん断実験を実施し，両者のせん断挙動の違いについて考察した。

キーワード：RC 柱，主筋付着，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におけるアーチ機構は，材の両端を直線で結ぶコンクリートストラットからなり，主筋は付着がなく一様ひずみ分布となっている（後掲の**図-9** 参照）。このアーチ機構のせん断挙動を実験的に検証した研究では，主筋の付着を除去した試験体が用いられている[1),2)]。しかし，本来 RC 部材のアーチ機構は，せん断補強筋を０としたせん断抵抗機構であり，主筋の付着は存在しているはずである。このように，アーチ機構の再現モデルには，主筋付着なしの試験体と主筋付着ありで p_w=0 の試験体の２種類が考えられるが，両者のせん断挙動の違いはほとんど議論されていない。

筆者らは，文献 1)で２種類のアーチ機構再現モデルについて FEM 解析に基づく考察を行い，両者のせん断挙動が大きく異なることを指摘した。本報では，この解析的検討を実証するために，２種類のアーチ機構再現試験体に対する曲げせん断実験を行い，RC 柱のアーチ機構のせん断挙動について検討した。

2.　実験概要

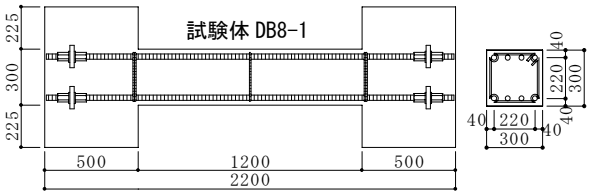
2.1　試験体計画

試験体は**表-1**，**図-1** のように断面 300×300(mm)，試験部長さ 1200(mm)で，実大の約 1/2 スケールである。**表-1** には，今回実施した試験体以外に，比較検討のため文献 1）の試験体の一部も示されているが，試験体形状は同一である。柱主筋には降伏点 1000(N/mm^2)級の高強度鉄筋を配置し，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。今回の試験体のせん断補強筋比は p_w=0.02%と，ほぼ 0 となっており，軸力としては，加力治具等の重量が 202kN であ

表－1　試験体一覧

試験体	主筋付着	コンクリート圧縮強度 Fc (N/mm^2)		主筋 本数	主筋 降伏強度	pw(%)	軸力 N (kN)
DB8-1	有	36	26.5	8-D22	991	0.02	202
DB4-1			32.2	4-D22			
RB8-1	無	60	49.1	8-φ23	1034		
S-9*	無	36	41.9	8-φ23	1034	0.19	-167
S-10*						0.39	151
S-11*		36	42.9				615
S-12*							-363

＊：文献1)の試験体



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 明治大学専任講師　建築学科　工修（正会員）

った。コンクリートの設計強度は 36N/mm^2，60N/mm^2 の２種類である。

表-1 中の試験体は，アーチ機構のみが形成されるように計画されたものである。すなわち，試験体 DB8-1，DB4-1 は，主筋付着はあるが，せん断補強筋をほとんど 0 として，トラス機構が形成されないようにしたものであり，試験体 RB8-1 および S-9～S-12[1)]は，主筋付着を除去することにより，トラス機構を形成させないように計画したものである。なお，主筋付着の除去には，主筋にグリスを塗布し，ビニールチューブを巻くことで対処した。

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。

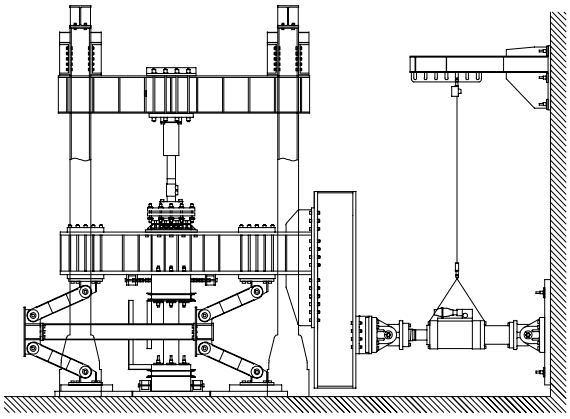


図-2　加力装置

表-2　材料試験結果

鉄筋の種類	断面積 (mm^2)	ヤング係数 (KN/mm^2)	降伏耐力 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
異形PC鋼棒　D22	387.1	188	991	1134
丸鋼PC鋼棒　φ23	415.5		1034	1126
せん断補強筋　D6	31.67	178	443	558

表-3　実験結果一覧

試験体	主筋付着	軸力 N(kN)	軸力比	項　目	終局強度 強度時変位
DB8-1	有	+202(圧縮)	0.08	Qu δu	146 (kN) 4.4 (mm)
DB4-1			0.07	Qu δu	155 (kN) 13.0 (mm)
RB8-1	無		0.05	Qu δu	213 (kN) 19.5 (mm)
S-9*	無	-167(引張)	-0.04	Qu δu	100 (kN) 17.4 (mm)
S-10*		+151(圧縮)	0.04	Qu δu	115 (kN) 13.0 (mm)
S-11*		+615(圧縮)	0.16	Qu δu	135 (kN) 11.5 (mm)
S-12*		-363(引張)	-0.09	Qu δu	134 (kN) 22.6 (mm)

＊：文献１）の試験体

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

表-3 に実験結果一覧を示し，**図-3** に終局強度時のひび割れ破壊状況を示す。主筋付着ありで，せん断補強筋がほとんどない DB8-1，DB4-1 では，試験体端部だけでなく，中央部分にも斜めひび割れの発生が見られる。これに対して，主筋付着のない試験体 RB8-1，S-10，S-11 では，試験体端部のみにひび割れや圧壊が発生しており，主筋付着ありの試験体と著しく異なっている。また，**図-3(a)**には，主筋の付着があり，せん断補強筋が 0.4%配筋されている試験体 S-3[1)]のひび割れ状況も示されているが，試験体 DB8-1，DB4-1 と類似している。このように，２つのア

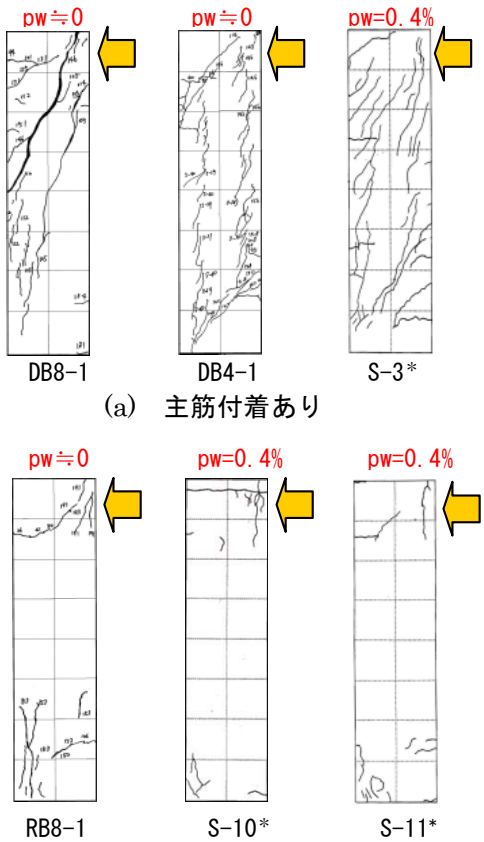


図-3　ひび割れ破壊状況　＊：文献 1）の試験体

ーチ機構再現モデルのひび割れ状況には大きな差異があり，主筋付着ありで p_w≒0 の試験体は，通常の RC 柱の破壊状況と類似しているという結果であった。

3.2　せん断力ー変位関係

図-4 に，実験結果のせん断力と変位の関係を示す。主筋量の異なる DB8-1 と DB4-1 を比較すると，主筋量の少ない DB4-1 の方が DB8-1 に比べて剛性低下は大きいものの，強度はほぼ同等であった。主筋付着の有無による影響をみると，主筋付着のある DB8-1 の方が，主筋付着のない RB8-1 に比べて，剛性が高くなる傾向はみられるが，終局強度については，両試験体のコンクリート強度に大きな差異があるため，一概には判断できない。

そこで，コンクリート強度の違いを基準化するために，せん断応力度をＡ法，Ｂ法の有効圧縮強度 $\nu_A fc$，$\nu_B fc$ で除した値と部材角の関係を**図-5** に示すが，主筋量の異なる試験体 DB4-1 は除外した。Ａ法の有効強度で除した**図-5(a)** では，試験体 DB8-1 と RB8-1 の強度差はほとんど無く，Ｂ法の有効強度で除した**図-5(b)** では，試験体 DB8-1 の終局強度が，RB8-1 よりも大きいという結果となっている。同図には，軸力や配筋が試験体RB8-1に近い試験体S-10の結果も示されているが，試験体 S-10 は，DB8-1 に比べて，剛性，強度ともに小さくなっている。

3.3　主筋のひずみ分布

主筋付着のある試験体 DB8-1 と主筋付着のない試験体 RB8-1 の，終局強度時の主筋ひずみ分布を**図-6(a)(b)** に示す。図より，試験体 DB8-1 では，せん断補強筋比がほとんど０であるにも関わらず，主筋ひずみに変化がみられる。この試験体 DB8-1 の主筋ひずみ分布は，主筋付着ありでせん断補強筋が配筋されている試験体 S-7[1] と比較すると，**図-6(c)** のように，ひずみ勾配は小さいものの同様なひずみ分布となっている。一方，主筋付着のない試験体 RB8-1 では，ほぼ一様なひずみ分布となっている。

以上のように，主筋付着ありで p_w=0 の試験体と，主筋付着なしの試験体のせん断破壊性状は大きく異なり，文献 1) での FEM 解析による検討結果と同様であった。

4.　アーチ機構に関する考察

終局強度指針や靭性保証指針におけるトラスアーチ理論には，いわゆるＡ法，Ｂ法の２種類があるように，そのモデル化に未解明な点も多い[3),4),5)]。トラスアーチ理論は，RC 部材のせん

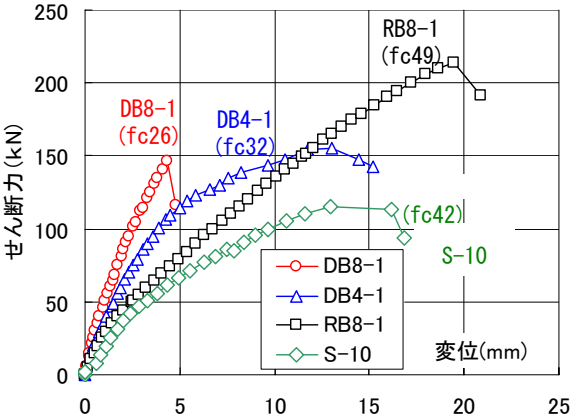
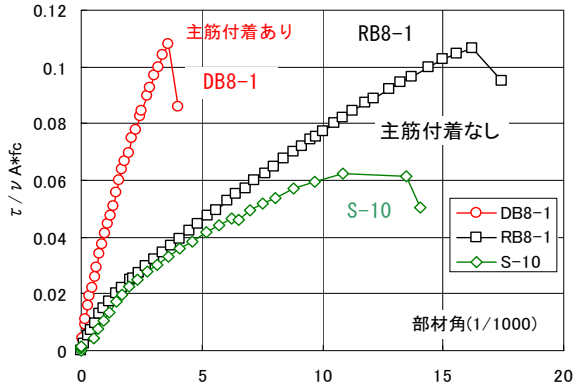
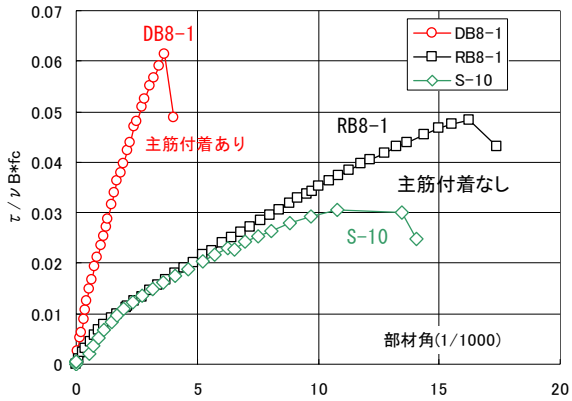


図-4　せん断力ー変位関係



(a)　（τ／ν_A＊ f $_c$）ー部材角関係



(b)　（τ／ν_B＊f_c）ー部材角関係

図-5　τ／ｆｃーー部材角関係

断強度のみならず，変形性能についても評価できる可能性があり，より実状に近いせん断抵抗機構を考察することは重要である。

本章では，実験や解析の結果からアーチ機構のせん断破壊挙動について考察する。

4.1　コンクリート有効係数

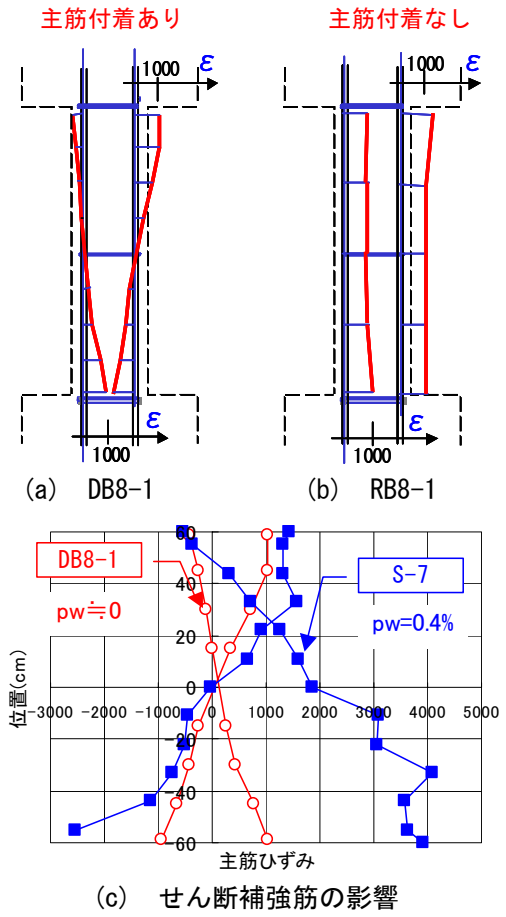
終局強度指針や靭性保証指針では，アーチ機構のストラット形状は基本的に同一となっており，このアーチストラットに基づき，実験結果の終局強度から逆算したコンクリート有効係数を**図-7** に示す。図より，主筋付着なしの試験体の有効係数は 0.43～0.79 で，A法の有効係数と近似している。また，主筋付着ありで p_w≒0 の試験体では 0.87～1.0 と，主筋付着ありの場合に比べて大きく，B法の値に近くなっている。

終局強度（τ_u/f_c）に関する実験と計算の比較を**図-8** に示すが，主筋付着なしの試験体では，A法に近いものの，引張軸力下では過小評価となっている。一方，主筋付着ありで p_w≒0 の試験体では，B法に近くなっている。また，実験式である荒川式では，p_w=0 としたいわゆるコンクリート負担分として計算したが，計算結果はすべての試験体に対して大略対応している。

4.2　コンクリートストラット角度

主筋付着なしの試験体では，**図-6**(b)のように，ほぼ一様なひずみ分布となっている。そこで，主筋付着なしの試験体に対して，**図-9** のように，一定幅のストラットを仮定した上で，終局時に試験体に作用したせん断力，軸力，および，主筋ひずみから計算した主筋の引張力から，水平および鉛直方向の力の釣合より，ストラット角度 θ を計算した結果が**図-10** である。ここで，主筋のひずみは，測定点によりやや差異があったため，平均値を用いた。

図より，圧縮軸力下（軸力比 0.16）の試験体 S-11 では，指針のストラットと類似しているのに対し，軸力が引張側に移行すると，ストラットと材軸のなす角度が大きくなっている。引張軸力下の終局強度が，圧縮軸力下に比べてあまり低下していない[1] ことの一因として，このス



(c)　せん断補強筋の影響

図-6　主筋ひずみ分布

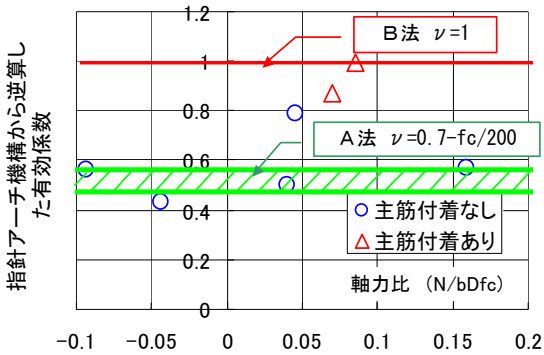
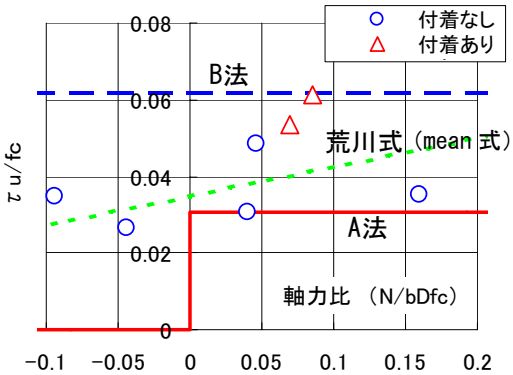


図-7　指針アーチ機構から逆算した有効係数



注）計算には，コンクリート強度の平均値を採用

図-8　終局強度の比較

トラット角度の変化が考えられる。図中には，実験結果から計算した有効係数の値も示されているが，**図-7** の値よりも大きくなっている。

一方，主筋付着ありで p_w=0 のモデルに対して，軸力を変化させた FEM 解析結果の主応力分布を**図-11** に示す。ここで，コンクリートは四辺形要素，鉄筋は線要素でモデル化したが，詳細は文献 5)を参照されたい。図より，軸力の大きい方が主圧縮応力の幅が広く，**図-10** と同様の傾向となっており，通常の RC 柱部材に対する文献 6) の指摘とも符合している。

4.3　ＲＣ柱部材のアーチ機構

主筋付着なしのアーチモデルと，主筋付着ありで p_w=0 のアーチモデルに対する，FEM 解析の終局強度時のひび割れ破壊状況，主応力分布を**図-12,13** に示すが，図には比較のために，せん断補強筋が配置されている通常の RC 柱の解析結果も示されている。図より，２つのアーチ機構再現モデルのひび割れや変形状態は大きく異なっている。両アーチモデルの主応力分布での差異はあまり明瞭ではないが，主筋付着なしモデルでは，部材中央にひび割れがないため，主筋付着ありモデルに比べて，中央部分で主応力の幅が広くなっている。主筋付着ありで p_w=0 のアーチモデルと通常の RC 柱では，ひび割れ状況は類似しているが，変形状態では差異がある。これは，せん断補強筋によるコンクリートへの拘束効果やトラス機構の形成によるもので，**図-13(b),(c)** に示す主応力分布での違いと対応している。

次に，２つのアーチ機構再現モデルの強度差を考察するために，**図-6** の主筋ひずみ分布からトラス的な機構の負担せん断力の評価を試みた。すなわち，主筋付着ありの試験体では，かぶりコンクリートや主筋の曲げ剛性等によりトラス機構と類似したせん断抵抗機構が形成されると仮定し，$Q_T = \Delta T \cdot j / h$ よりトラス的な機構の負担せん断力を評価した。ここで，h，j は RC 柱の内法高さ，主筋応力中心間距離であり，ΔT は柱上下端での主筋の力の差である。試験体

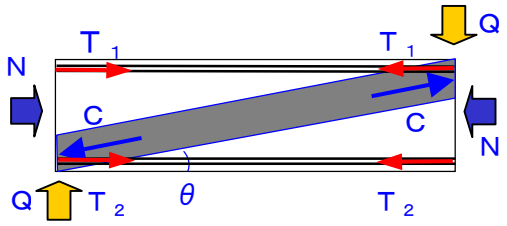


図-9　アーチ機構

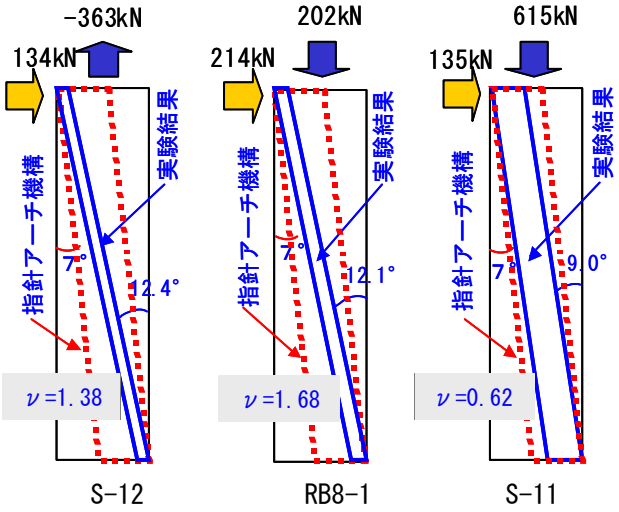
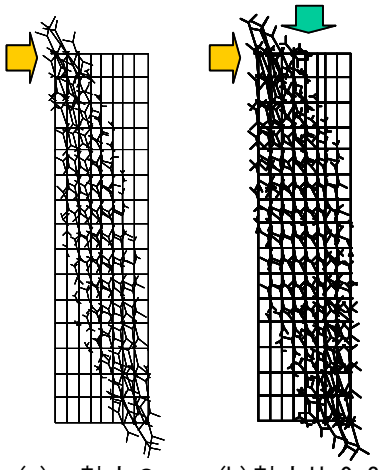


図-10　実験結果のストラット角度



(a)　軸力０　　(b)軸力比 0.3

図-11　主筋付着あり pw=0 モデルの主応力分布

DB8-1，DB4-1 の終局強度から，前述の Q_T を差し引いたせん断力を，アーチ機構のせん断強度とした結果を**図-14** に示す。図より，上記のように評価した DB8-1，DB4-1 のアーチ機構強度は，主筋付着なし試験体とほぼ同等で，Ａ法のせん断強度に近くなっている。

以上のように，２つのアーチ機構再現モデルのせん断挙動は大きく異なる結果であった。RC 部材に対するアーチ機構は，せん断補強筋比を０としたせん断抵抗機構であり，主筋付着あり

で p_w=0 の再現モデルが適切と考えられる。

5．まとめ

本報で得られた結果を以下に示す。

1）主筋付着なしの試験体と，主筋付着ありで p_w=0 の試験体では，ひび割れ破壊状況や主筋のひずみ分布が大きく異なり，後者は，通常の RC 柱と類似していた。また，主筋付着ありの試験体は，主筋付着なしの試験体に比べて，剛性や終局強度（τ_u/f_c）が大きかった。

2）終局強度指針のアーチ機構に基づき，実験の終局強度から逆算した有効係数は，主筋付着なしの場合にはＡ法に近く，主筋付着ありで p_w=0 の場合にはＢ法に近かった。

3）主筋付着ありで p_w=0 の試験体の終局強度から，主筋ひずみ分布より評価したトラス的な機構のせん断力を差し引いた値は，主筋付着なしのせん断強度とほぼ同等であった。

以上，本報では２種類のアーチ機構再現モデルの相違について検討したが，本来，RC 部材のアーチ機構は p_w=0 としたせん断抵抗機構であり，強度のみならず変形性能の評価も考慮すれば，その再現モデルとしては，主筋付着ありで p_w=0 の試験体が適切と判断される。

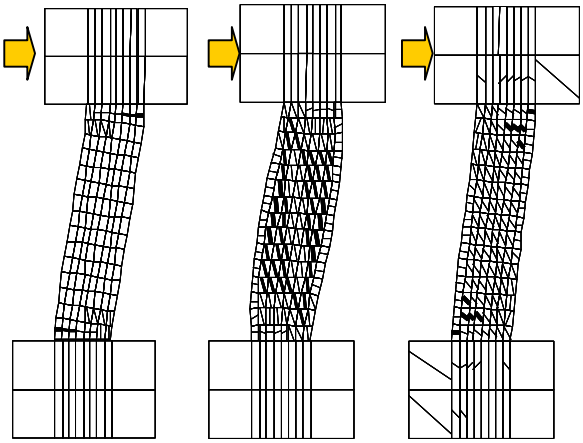


図-12　終局時のひび割れ破壊状況

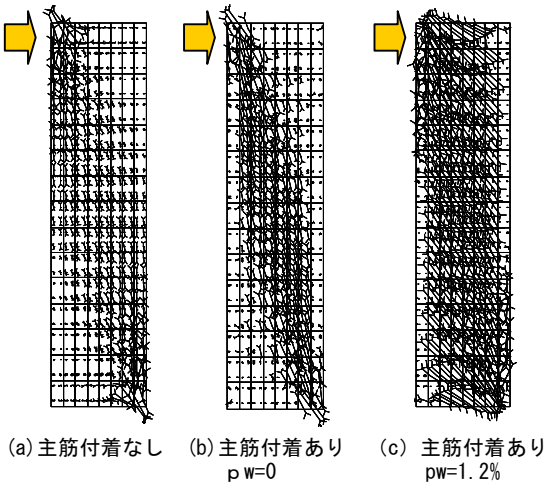


図-13　終局時の主応力分布

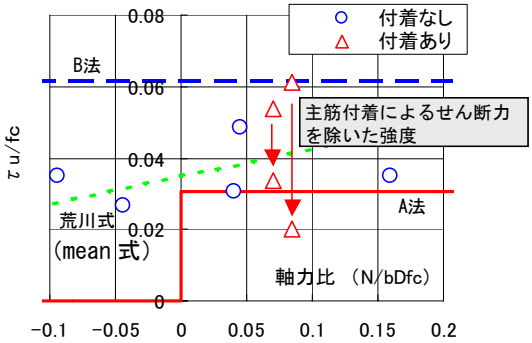


図-14　終局強度の比較

参考文献

1) 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，JCI 年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.871-876，2002.6

2) 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.113-119，2000.8

3) 村上　聖：鉄筋コンクリート梁の終局せん断強度算定式に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，第 533 号，pp.143-150，2000.7

4) 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

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

6) 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