

論文 外殻プレキャストを用いた RC 柱の力学性状に関する研究

増田安彦*1・杉本訓祥*2・吉岡研三*3・江戸宏彰*1

要旨:本研究は、せん断補強筋を内蔵させた外殻プレキャストを柱主筋の上からかぶせ、内部にコアコンクリートを打込んで構築する柱部材を対象に、コアコンクリート内で中子筋を直接主筋に配筋した場合の力学性状を調べることを目的とし、13体の柱試験体よりなる曲げせん断実験を実施した。

主な結果に、外殻プレキャスト柱の曲げ・せん断耐力は、中子筋を外殻部分に内蔵させた既報^{1), 2), 3)}の場合と同等であること、付着割裂破壊時には中子筋の補強効果は余り期待できないこと、本構法に特有の割裂パターンに修正が必要なこと等が挙げられ、これに応じた付着割裂強度式を提案した。

キーワード:外殻プレキャスト, 柱, 付着割裂強度, 高強度材料, 曲げせん断実験

1. はじめに

鉄筋コンクリート柱(以後RC柱と言う)において、中子筋(副帯筋)を用いて隅角部以外の中間主筋および圧縮側コンクリートを拘束することは、主筋の座屈、付着割裂の防止、および曲げ変形能力の向上に有効であることは良く知られている。特に、阪神大震災以降、中子筋の重要性が再認識され、実設計においてますます多用されるに至っている。

一方、筆者らは、外殻プレキャスト(以後外殻PCaと言う)を使用したRC柱の力学的諸性状と各種耐力式について報告・提案してきたが^{1), 2), 3)}、中子筋を使用する場合は、専らこれを外殻PCaに内

蔵させて用いていた。本研究では、先に述べた理由から、中子筋の外殻PCa柱への使用性をさらに高めることを考慮して、コアコンクリート内の主筋に直接中子筋を配筋した柱部材の力学的諸性状を調べ、すでに提案した各種耐力式、特に付着割裂強度式の適用性について検討することを目的とした。

2. 実験概要

試験体の一覧を表-1に、試験体の配筋例と各試験体の断面を図-1に示す。試験体数は13体で、実験の主変数には、外殻PCaの使用の有無、外殻PCaの種類と強度、コアコンクリート強度、帯筋

表-1 試験体の概要

試験体	30PV32	30PV36	30RC36	30PV43	30PV64	30PV72	45PF55	45RC55	60PF30	60PF45	60PF95	60PV95	60RC95	
断面	b × D = 400 × 400 (mm)													
高さ	ho = 1000mm ho/D = 2.5						ho = 1600mm ho/D = 4.0							
主筋	8-D19 (SD345)						16-D19 (SD490)	20-D19 (SD685)	20-D19 (SD490)					
フープ筋	目-D6 @100 pw=0.32	□-D10 @100 pw=0.36 (%)	目-D6 @75 pw=0.43	目-D6 @50 pw=0.64	□-D10 @50 pw=0.72	罫-U7.1 @72 pw=0.55 (%)	罫-D10 @237 pw=0.30	罫-D10 @156 pw=0.45	罫-D10 @75 pw=0.95 (%)					
Fc(コア)	30 N/mm ²						45 N/mm ²			60 N/mm ²				
軸力	0.15FcbD N=706 kN						0.3FcbD N=2120kN			0.3FcbD N=2820kN		-0.5agσy ~ 0.45FcbD N=-1410~4230kN (圧縮正)		
外殻 PCa	振圧成形	在来工法	振圧成形				流込成形	在来工法	流込成形	流込成形	振圧成形	在来工法		

試験体記号 30PV36
 せん断補強筋比(0.36%)
 P:外殻 PCa, V:振圧成形, F:流込み成形, RC:在来工法
 コンクリート 強度(Fc=30N/mm²)

*1 (株)大林組 技術研究所 工博(正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 工修(正会員)

*3 第一工業大学 教授 工博(正会員)

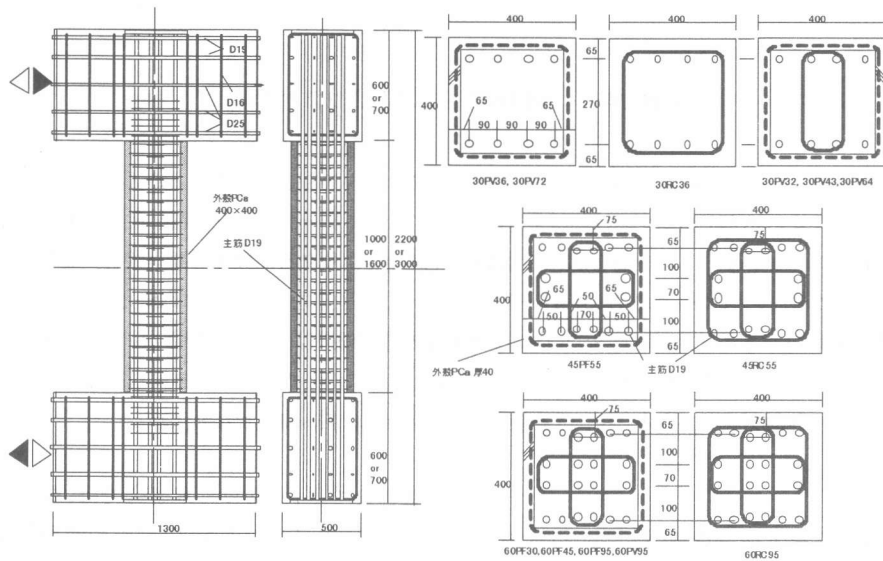


図-1 断面および配筋図

表-2 使用材料

鉄筋(単位:N/mm², 弾性係数は×10⁵N/mm²)

呼び径	降伏強度	弾性係数	引張強度	用途
D19 (SD395)	397	1.90	597	主筋 (Fc30 シリーズ)
D19 (SD490)	612	2.14	826	主筋 (Fc45 シリーズ 60PF95, 60RC95)
D19 (SD490)	679	2.03	874	主筋 (60PV95)
D19 (SD685)	703	2.10	918	主筋 (60PF30, 60PF45)
D10 (SD345)	375	1.84	520	フープ筋 (30PV36, 30RC36, 30PV72)
D10 (SD685)	769	2.13	976	フープ筋 (60PF95, 60RC95, 60PF30, 60PF45)
D10 (SD685)	823	2.16	1023	フープ筋 (60PV95)
D6 (SD345)	384	1.92	513	フープ筋 (30PV32, 30PV64, 30PV43)
U7.1 (SBPD1275)	1444	2.15	1493	フープ筋 (Fc45 シリーズ)

コンクリート

	試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
外 殻 P C a	30PV36	73.8	3.49
	30PV72	83.5	3.68
	30PV32, 30PV43, 30PV64	91.3	3.74
	45PF55, 60PF30, 60PF45, 60PF95 60PV95	78.7	3.50
コ ア	30PV32, 30PV36, 30RC36, 30PV43, 30PV64, 30PV72	31.8	2.33
	45PF55, 45RC55	40.1	2.70
	60PF30, 60PF45, 60PF95, 60PV95, 60RC95	50.4	2.79

量と中子筋の有無を採りあげ、コアコンクリートの計画強度 30, 45, 60 (N/mm²) に応じて、それぞれ Fc30 シリーズ, Fc45 シリーズ, Fc60 シリーズとした。主筋量および軸力は、各シリーズのコアコンクリート強度に応じて表-1 に示すように計画した。特に、試験体 60PF95,

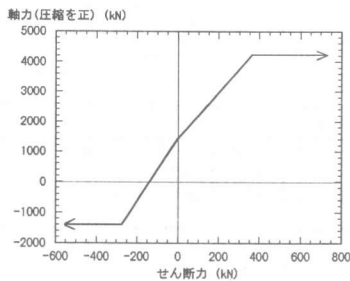


図-2 軸力-せん断力関係

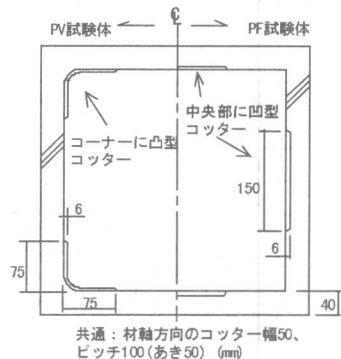


図-3 外殻PCaの概要

60PV95, 60RC95 には、図-2 に示す軸力-せん断力関係に従って圧縮-引張の変動軸力を与えた。表-2 に使用材料の性質を示す。

外殻PCa は以下の2種の方法で製造した。

- 1) ゼロスランプの超固練りコンクリートを用いた、振動加圧成形(試験体記号 PV)
- 2) 高流動コンクリートを用いた、流し込み成形(試験体記号 PF)

表-3 実験結果一覧

試験体		30PV32	30PV36	30RC36	30PV43	30PV64	30PV72	45PF55	45RC55	60PF30	60PF45	60PF95	60PV95	60RC95			
降伏曲げモーメント (kN・m)	実験値	238	230	229	227	244	215	—	—	—	—	657	-199	741	-224	596	-180
	計算値	222	219	205	221	222	222	617	551	739	739	737	-217	812	-270	596	-211
	実/計	1.07	1.05	1.12	1.03	1.10	0.97	—	—	—	—	0.89	0.92	0.91	0.83	1.00	0.86
最大曲げモーメント (kN・m)	実験値	259	243	241	274	277	269	596	553	644	670	779	-328	803	-387	662	-290
	計算値	262	253	220	261	263	259	647	568	754	754	737	-355	812	417	597	-330
	せん断	562	533	443	593	653	654	750	696	623	713	1016	1077	971			
実/計	0.99	0.96	1.10	1.05	1.05	1.04	0.92	0.97	1.03	0.94	1.06	0.93	0.99	0.93	1.11	0.88	
破壊形式		Y→B	Y→B	Y→B	Y→B	F	Y→B	B	B	SB	B	F	F	F	F	F	F

最大モーメントの実/計の計算値は曲げ・せん断計算値のうち小さい方を使用

破壊形式 F: 曲げ破壊、S: せん断破壊、B: 付着割裂破壊、SB: せん断・付着複合破壊 (Y→: 曲げ降伏後の意)

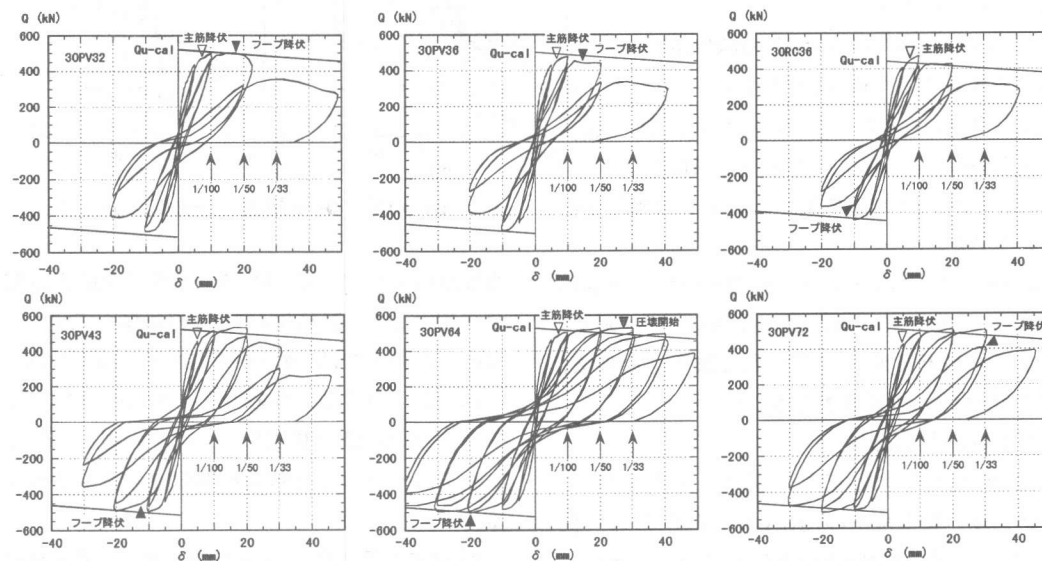


図-4(1) 荷重変形関係(Q-δ関係) Fc30 シリーズ

両者の主な違いは、図-3に示すように、内面のコッター位置が異なることにある。

荷重は逆対称荷重とし、部材角1/200, 1/100, 以後1/100の倍数で各2回ずつ繰り返す正負交番繰り返し荷重としたが、荷重中に脆性的な破壊を生じ、荷重が大きく低下した場合は、その時点で終了した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

表-3に結果の一覧を、図-4(1)~(3)に荷重-層間変形関係(Q-δ関係)を示す。図-4には断面

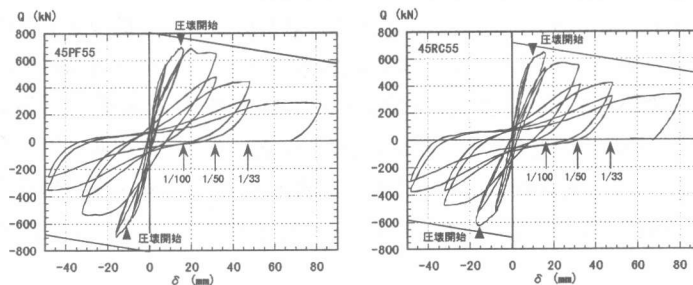


図-4(2) Q-δ関係 Fc45 シリーズ

解析によって求めた曲げ終局耐力計算値を、P-δ効果を考慮して記入している。

Fc30シリーズでは、30PV64が曲げ破壊、その他の試験体は曲げ降伏後に付着割裂破壊を生じた。付着割裂破壊を生じた試験体のうち、帯筋量が比較的多い試験体30PV43と30PV72はR=1/50

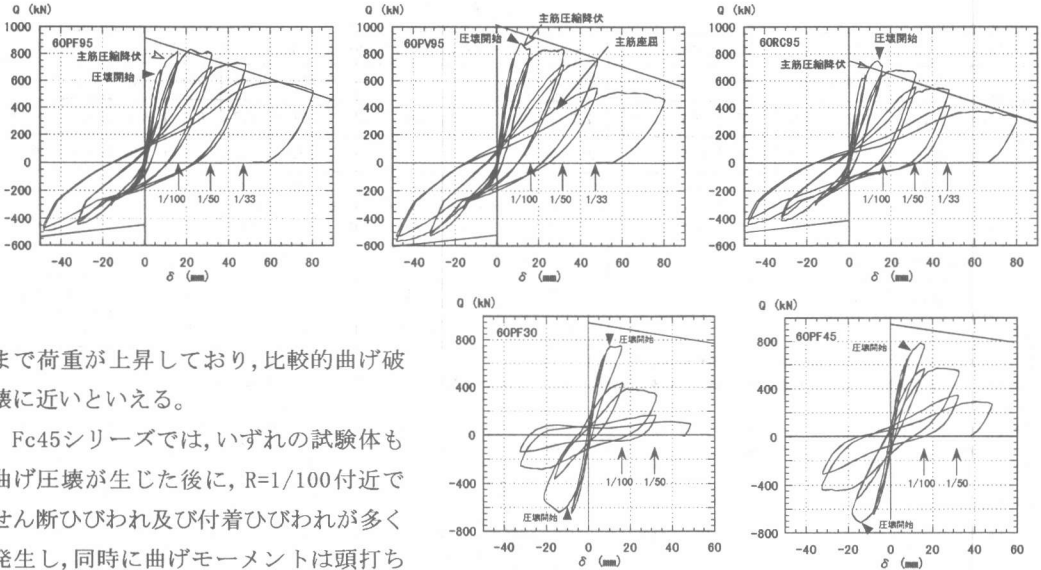


図-4(3) Q-δ関係 Fc60シリーズ

まで荷重が上昇しており、比較的曲げ破壊に近いといえる。

Fc45シリーズでは、いずれの試験体も曲げ圧壊が生じた後に、R=1/100付近でせん断ひびわれ及びび付着ひびわれが多く発生し、同時に曲げモーメントは頭打ちとなり、R=1/50程度で低下が始まる付着割裂破壊を生じた。

Fc60シリーズでは、変動軸力を受けた試験体60PF95, 60PV95, および60RC95は曲げ破壊、60PF30はせん断と付着割裂の複合的な破壊、60PF45は付着割裂破壊を生じた。

3.2 ひずみ計測結果

図-5に主筋のひずみ計測値より算出した、付着応力度-層間変形の関係(τ - δ 関係)の一例を示す。同図の縦軸 τ bは部材両端から柱せいに相当する高さを除いた中間部分の平均付着応力度を示し、図中の τ bu-calは後述する付着割裂強度計算値を示している。曲げ破壊試験体では、変形が進むとともに主筋の降伏域が拡大し、柱中間部分の付着応力度が徐々に増加する傾向が表れている。一方、付着割裂破壊を生じた試験体では、曲げ降伏あるいは最大耐力に前後して平均付着応

力度が低下している。図-6は主筋付着応力分布の一例として、試験体45PF55の結果を示す。せん断力が最大で、圧壊が開始したR=1/100においては、図-5の平均付着応力度は τ bu-calに達していないが、図-6によると、ひずみ測定区間によっては τ bu-calを超える部分もある事が分かる。

図-7に帯筋のひずみ分布例を示す。付着割裂破壊を生じた一体打ち試験体45RC55の場合、中子筋のひずみは外周筋とほぼ同様であるが、同様に付着割裂破壊を生じた外殻PCa試験体45PF55の帯筋ひずみ分布では、最大耐力とほぼ同時に、外周筋と中子筋に差が生じ始め、R=1/50では大きく差が生じている。これは後述するように、割裂モードが異なるためと推定される。

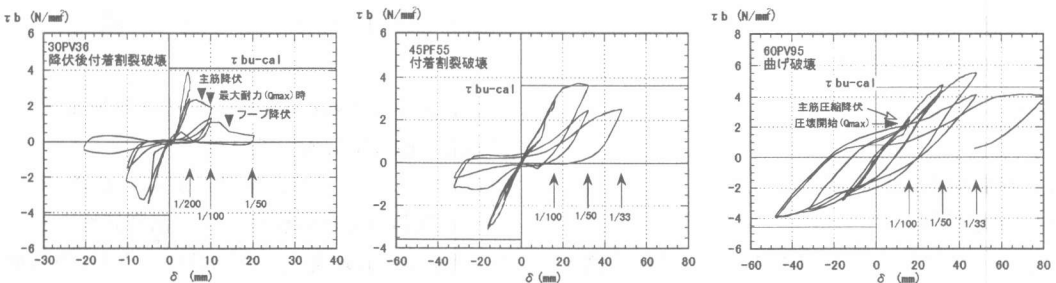


図-5 τ-δ関係

3.3 外殻PCa柱の曲げおよびせん断耐力

表-3に示した曲げ降伏及び曲げ終局モーメントは、文献¹⁾に示す方法で、外殻部分の強度を考慮するファイバーモデルによる断面解析によった。曲げ耐力の計算値は実験値とよく一致していることが分かる。

せん断耐力も同様に、文献¹⁾による方法に従ったが、高強度せん断補強筋の強度を文献^{2),3)}を参考として、 $25\sigma_B$ (σ_B :コアコンクリート強度) かつ 900N/mm^2 以下と低減して計算した。本式の適用性を検討できるのは、試験体60PF30のみであるが、実/計=1.03と良く一致している。

3.4 付着割裂強度

筆者らは、外殻プレキャストを用いた柱には、主筋が横一列に割裂する通常の全割裂モードと、図-8に示すような、外殻とコアコンクリートの界面付着破壊を伴う割裂モード(以後コア内コーナー割裂と呼ぶ)が存在し、それぞれに対応する強度算定式を提案してきた(図-8中の式^{2),3)}。

3.2節で述べたが、付着割裂破壊を生じた試験体の外周筋と中子筋のひずみが異なる現象は、同図のようなコア内割裂が生じているためと考えられる。従って、中子筋をコアコンクリート内部に配筋した場合には、コア内コーナー割裂時の付

着割裂強度の算定に、中子筋および、中子筋が拘束する主筋の存在を無視するのが妥当と考えられる。一方、図-8に示す従来式では、コア内部での斜め割裂面が、帯筋の引張力作用方向に対して45度であるため、式(2)と式(5)で求める力の作用方向が一致しないことが課題であった。この点と付着割裂破壊試験体の破壊状況を考慮して、図-9で示すように割裂パターンを改めた。すなわち、主筋位置より断面外側に向かっては全割裂

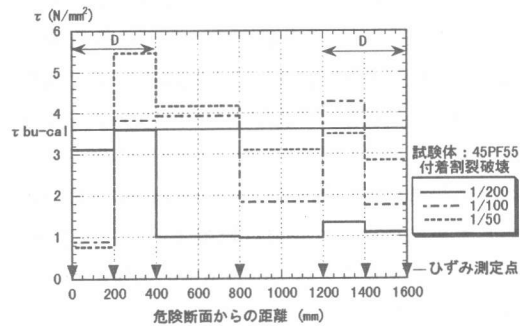


図-6 主筋付着応力分布の一例

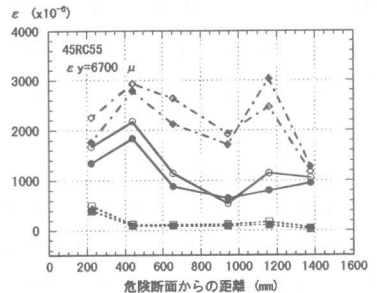
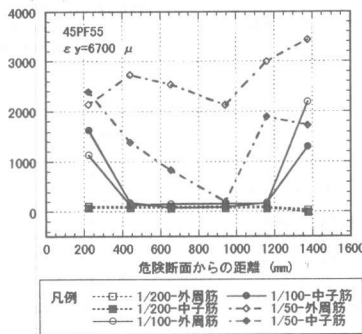
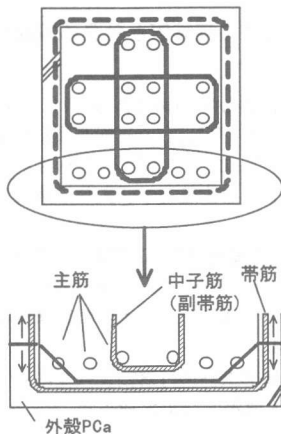


図-7 せん断補強筋歪分布



$$\tau_{bu} = \alpha (\tau_{co} + \tau_{st}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_{co} = 0.313 \{ (0.4b_{is} + t_s/b) \sqrt{\sigma_{BS}} + (0.4b_{ic} + 0.5b_0/b) \sqrt{\sigma_{BC}} \} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau_{co} \text{ は } b_{is} \text{ 及び } b_{ic} \text{ に次のAまたはBを用いた時のいずれか小さい方の値とする。}$$

$$A: b_{ic} = (2\sqrt{2}dc' - db)/db, \quad b_{is} = t_s/db \quad (\text{コーナー割裂}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$B: b_{ic} = (b_0 - \sum db) / \sum db, \quad b_{is} = 2t_s / \sum db \quad (\text{全割裂}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau_{st} = 0.313 \{ (20/Nt + 5Nu/Nt + 20Ns/Nt) pw \sqrt{\sigma_{BC}} / db \} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 τ_{bu} :付着割裂強度(N/mm²)
 τ_{co} 、 τ_{st} :コンクリートおよびせん断補強筋の負担する強度(N/mm²)
 α :強度低減係数=0.76
 b_{ic} 、 b_{is} :コアおよび外殻コンクリートの割裂に対応した係数
 σ_{BC} 、 σ_{BS} :コアおよび外殻コンクリート強度(N/mm²)
 b :柱幅(mm)、 db :主筋径(mm)、 t_s :外殻PCaの厚さ(mm)、 pw :せん断補強筋比
 b_0 :断面幅から外殻PCaの厚さを引いた値 $b_0 = b - 2t_s$
 dc' :隅角部主筋中心から外殻PCa内表面までの距離(mm)
 Nt :全主筋本数
 Nu :一列の主筋のうち直接せん断補強筋がかかっていないもの本数 ($Nu = Nt - Ns$)
 Ns :一列の主筋のうち直接中子筋がかかっていないもの本数。

図-8 文献^{1),2),3)}で示す割裂モードと付着割裂強度式

同様に断面せいと直角方向の割裂を、内側にはVノッチ状の割裂が生じるものとし、藤井・森田による研究⁴⁾を参考に、付着割裂強度式を改めることとした(図-9中の式)。この方法によると、一列に並ぶ主筋数が多い試験体 45PF55, 60PF30, 60PF45 の場合には、複数の割裂パターンが考えられ、それらのうち最も低い値を採用する。すなわち、同図で全割裂(oabcc'b'a'o'), 隅角主筋aのみの割裂(oadd'a'o'), 隅角主筋aと中間主筋bを含む割裂(oabee'b'a'o')の3パターンが考えられる。また、本実験ではコッター位置が異なる2種の外殻PCaを用いたが、両者の間で破壊性状や付着割裂強度の実験値に明確な差が生じなかったことから、外殻PCaとコアコンクリートとの界面付着破壊における付着強度は、本実験で採用した程度のコッターでは無視することとした。コッターの大きさや界面付着強度の関係については今後の課題と言える。

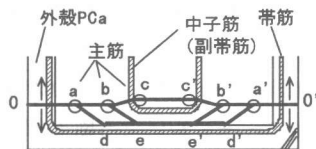
図-10は式(6)による計算値(τ_{bu-cal})と、図-5で求めた、曲げ破壊を除く試験体の τ_b の最大値($\tau_{bmax-exp}$)とを比較したものである。両者は F_c に拘らず概ね良く一致していると言える。

4. まとめ

- 1) 外殻PCaを用い、中子筋をコア部分の主筋に直接配筋した鉄筋コンクリート柱の曲げ及びせん断耐力性状は、外殻コンクリートがコアコンクリートより高強度であることから、一体打ち柱部材よりも優れ、外殻PCaの強度を考慮した既往の耐力算定法で精度良く求めることができる。
- 2) 外殻PCaを用いる柱の付着割裂破壊時には、外殻PCaとコアコンクリートの界面付着破壊を伴う特有の割裂パターンが生じる場合がある。
- 3) 中子筋をコア内に直接配筋した場合の外殻PCa柱の付着割裂強度を、一列に並ぶ主筋本数に応じた割裂パターンを考慮して求める方法を提案し、実験結果との適応性が良いことを示した。

参考文献

1) 増田安彦・吉岡研三: 外殻に薄肉プレキャスト管を使用した鉄筋コンクリート柱の耐力性状に関する研究, 日本



$$\tau_{bu} = \alpha (\tau_{co} + \tau_{st}) \quad \dots \dots \dots (6)$$

A: コーナー割裂
 $\tau_{co} = 0.313 \{ (0.4b_{is} + t_s/b) \sqrt{\sigma_{BS}} + (0.4b_{ic} + 0.5b_0/b) \sqrt{\sigma_{BC}}$
 $b_{is} = t_s / n_{db}$
 $b_{ic} = \{ (1 + \sqrt{3}) d_c' + (n-1) ds - n_{db} \} / n_{db}$
 $\tau_{st} = 0.313 \{ (10 + 5(n-1)) / n \cdot p_w' b \sqrt{\sigma_{BC}} \} / db$

B: 全割裂
 $\tau_{co} = 0.313 \{ (0.4b_{is} + t_s/b) \sqrt{\sigma_{BS}} + (0.4b_{ic} + 0.5b_0/b) \sqrt{\sigma_{BC}}$
 $b_{is} = 2t_s / \Sigma db$
 $b_{ic} = (b_0 - \Sigma db) / \Sigma db$
 $\tau_{st} = 0.313 \{ (20 + 5N_u + 20N_s) / N_t \cdot p_w' b \sqrt{\sigma_{BC}} \} / db$

考えられる割裂パターン全てについて τ_{bu} を求め、最小値を採用する。
 ここに、
 n: コア内コーナー割裂を検討時、コーナー部で割裂線が横切る主筋本数
 (図で隅角部主筋aのみの場合n=1, 隅角部主筋aと中間筋bを含む場合n=2)
 ds: 隣り合う主筋の中心間隔(mm)
 p_w': 外周筋のみによるせん断補強筋比
 その他の記号は図-8に同じ

図-9 割裂パターンと付着割裂強度式

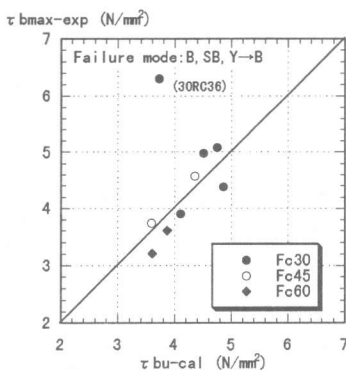


図-10 付着割裂強度の実験値と計算値の比較

建築学会構造系論文報告集, No. 458, pp109-118, 1994. 4
 2) 増田安彦・吉岡智和・柳瀬高仁ほか: 高強度せん断補強筋を用いたハーフプレキャスト柱の耐力・変形性状に関する研究(その1~その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp133-138, 1997. 9
 3) 野口隆・蔵田富雄・増田安彦ほか: 高強度せん断補強筋を用いたハーフプレキャスト柱の耐力・変形性状に関する研究(その4~その6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp389-394, 1998. 9
 4) 藤井栄・森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究-第2報-, 日本建築学会論文報告集, No. 324, pp45-53, 1983. 2