

流し込み成形外殻プレキャストコンクリート「プレカラムⅡ」の開発

増田 安彦 杉本 訓 祥
江戸 宏 彰

Development of Precast Concrete Shell Form "Pre-Column II "

Yasuhiko Masuda Kuniyoshi Sugimoto
Hiroaki Eto

Abstract

This report describes the characteristics of precast shell forms, called "Pre-Column II", made of high-performance concrete. It also discusses the results of shear flexural tests on R/C columns using Pre-Column II, in which sub-tie bars are directly connected to longitudinal bars in the core concrete.

Tests were carried out on 13 specimens and the results are outlined as follows. The flexural and shear strengths of the columns using Pre-Column II are similar to those of references^{1),2),3)}, which used Pre-Columns with sub-ties installed in the shell form. However, it appears that the sub-tie bars in the core concrete did not perform as reinforcement against bond splitting failure, and the proposed equations for bond splitting strength and split pattern^{1),2),3)} need to be improved.

概 要

本報告は高流動コンクリートを用い、流し込み成形によって製造する、外殻プレキャストコンクリート「プレカラムⅡ」の概要を述べるとともに、プレカラムⅡ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ために実施した、13体の柱試験体よりなる曲げせん断実験とその結果について述べたものである。

曲げせん断実験より、プレカラムⅡ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が、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の知見を得たので、これに応じた付着割裂強度式を提案した。

1. はじめに

筆者らは、遠心成形による外殻プレキャストコンクリート(以後、外殻PCaと称する)「プレカラム」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(副帯筋)を使用する場合は、専らこれをプレカラムに内蔵させて用いていた。

一方、新たに開発した流し込み成形外殻PCa「プレカラムⅡ」は、高流動コンクリートを型枠に流し込み成形するもので、後述するように柱の断面寸法や高さに対してよりフレキシブルに対応できるものであるが、製法上の特徴から中子筋を外殻部分に内蔵させることができない。

本報告では、プレカラムⅡの製造方法の概要および既実用化したプレカラム(遠心成形)およびバイコンカラム(振圧成形)との違いについて述べるとともに、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を、プレカラムⅡおよびバイコンカラム

を用いた柱について検討した。

2. プレカラムⅡの概要

流し込み成形とは、高流動コンクリートを帯筋を組み込んだ内型枠と外型枠の間に流し込み、成形する方法である。今回行った試作および実験は柱を横にして側面から打込む方法とし、コンクリート投入面にあたる上面はコテ均し仕上げとした。Fig. 1およびPhoto 1に製造状況と製品を示す。この製法の特徴として以下が挙げられる。

- 1) 特殊な製造装置が不要なので、必要に応じて養生設備を備えれば、一般のPC工場や工事現場で製造が可能である。
- 2) 締め固めが不要な高流動コンクリートを使用するため、打込みに必要な手間が大幅に省力化できる。
- 3) 型枠寸法を調整するだけで柱の寸法や形状に対して自由に対応できる。
- 4) 高流動コンクリートの打込み側圧に耐える強固な内型枠が内面全面に必要なので、中子筋をプレカラムⅡに内蔵

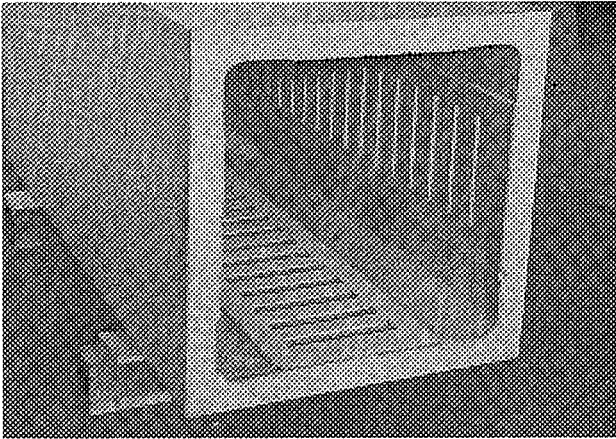


Photo 1 ① 断面とコッターの形状
Section and Shear-Cotter

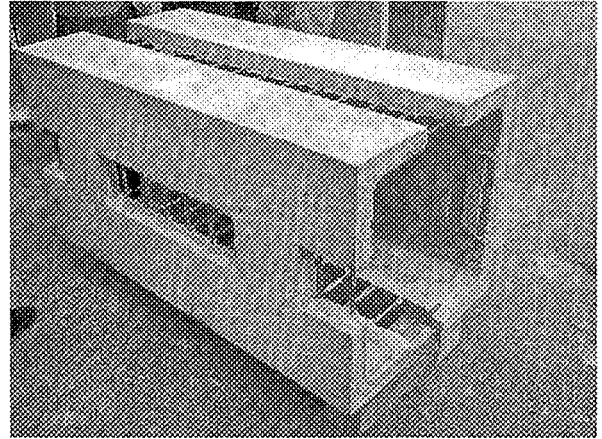


Photo 1 ② 耐震壁取付け用の開口が付いたプレカラムⅡ
Slit for Shear Wall

させることができない。

Table 1はプレカラムⅡと、外殻PCaとして既に実用化しているプレカラム、バイコンカラムの特徴を比較したものである。断面の形状の他に、プレカラムⅡの内面コッターの位置が他の外殻PCaと異なる点が特徴として挙げられる。

3. 曲げせん断実験

3. 1 実験概要

試験体の一覧をTable 2に、試験体の配筋例と各試験体の断面をFig. 2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Table 2に示すように計画した。特に、試験体60PF95, 60PV95, 60RC95には、Fig. 3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。Table 3に使用材料の性質を示す。

外殻PCaにはプレカラムⅡ(試験体記号PF)およびバイコンカラム(試験体記号PV)を使用した。両者の主な違いは、Fig. 4に示すように、内面のコッター位置が異なることにある。本曲げせん断実験の報告においては、後述する

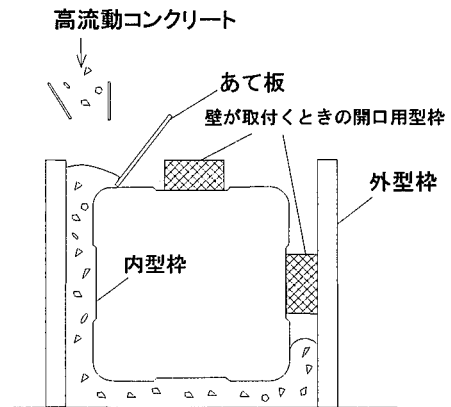


Fig. 1 流し込み成形方法
Molding Method of Pre-Column II

Table 1 プレカラムⅡ, プレカラム, バイコンカラムの比較
Difference of Pre-Column II From Other PCa-Shells

製品名	プレカラムⅡ	プレカラム	バイコンカラム
成形方法	流し込み成形	遠心成形	振圧成形
断面の形状	長方形	正方形を基本とする 円形 多角形	正方形を基本とする
コッターの位置	内面中央部	内面隅角部	内面隅角部
断面図			
中子筋の配筋	後打ちコンクリート部分に配筋する	外殻部分に内蔵, または後打ちコンクリート部分に配筋する	後打ちコンクリート部分に配筋する

Table 2 試験体の概要
Characteristics of Specimens

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	■-U7.1 @72 pw=0.55 (%)	■-D10 @237 pw=0.30	■-D10 @156 pw=0.45	■-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)

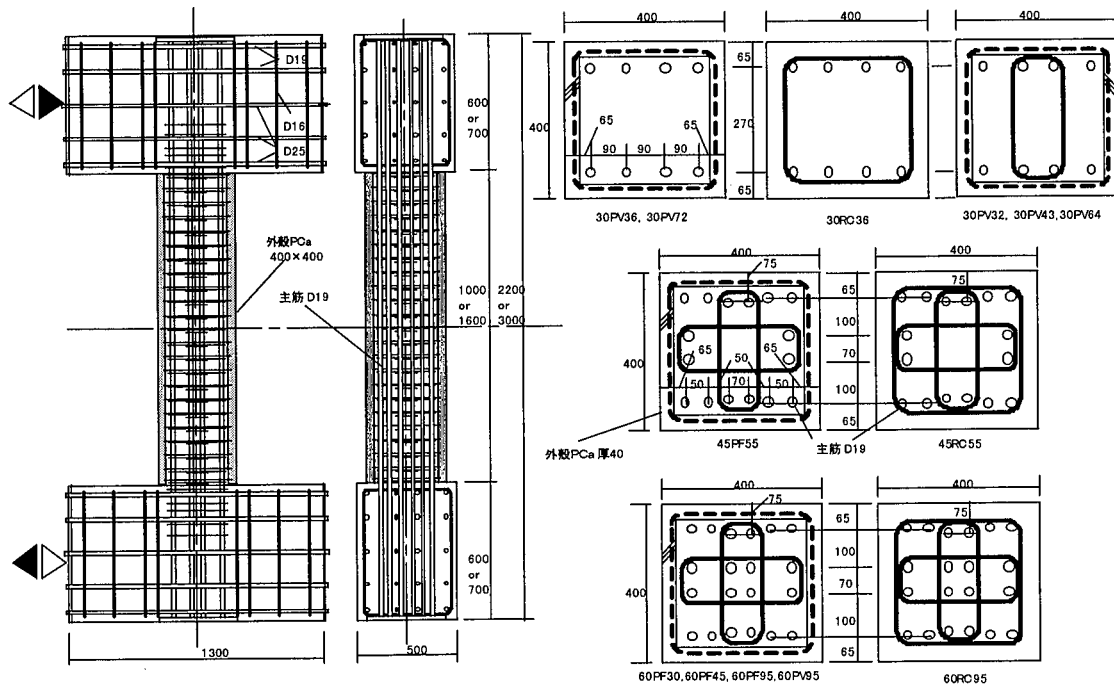


Fig. 2 断面および配筋図
Section and Reinforcement of Specimens

が、外殻PCaの種類が実験結果に大きな影響を及ぼしていないことから、両者を単に外殻PCaとまとめて呼ぶこととする。

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. 2 実験結果および考察

3. 2. 1 破壊性状 Table 4に結果の一覧を、Fig 5 ①~③に荷重-層間変形関係(Q-δ関係)を示す。Fig 5には断面解析によって求めた曲げ終局耐力計算値を、P-δ効

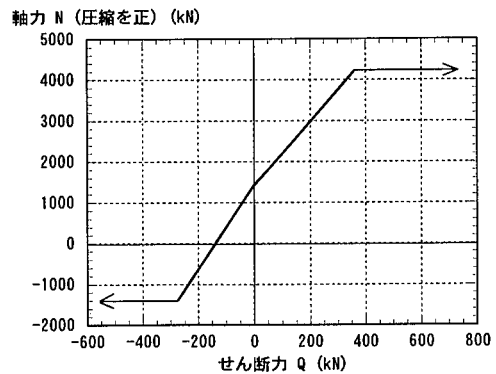


Fig. 3 軸力-せん断力関係
N-Q Relation

果を考慮して実線で記入している。

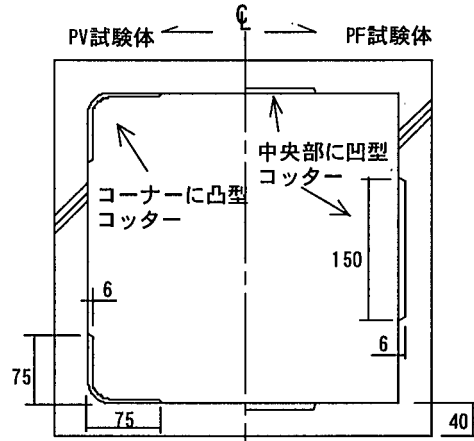
Fc30 シリーズでは、30PV64 が曲げ破壊、その他の試験体は曲げ降伏後に付着割裂破壊を生じた。付着割裂破壊を生じた試験体のうち、帯筋量が比較的多い試験体 30PV43 と 30PV72 は R=1/50 まで荷重が上昇しており、比較的曲げ破壊に近いといえる。

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。

3.2.2 ひずみ計測結果 Fig. 6 に主筋のひずみ計測値より算出した、付着応力度-層間変形関係 ($\tau_b - \delta$ 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 (D) 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、圧壊後においても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



共通：材軸方向のコッター幅50、ピッチ100(あき50) (mm)

Fig. 4 実験に使用した外殻PCaの形状
Characteristics of PCa-Shell

Table 3 使用材料
Material Properties

鉄筋(単位:N/mm², 弾性係数は×10⁵N/mm²)

Re-bars

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
Concrete

	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	78.7	3.50
	60PV95	91.9	4.14
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

Table 4 実験結果一覧
Test Results

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	S B	B	F	F	F	F	F	F

最大曲げモーメントの実/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、S B: せん断・付着複合破壊 (Y→: 曲げ降伏後の意)

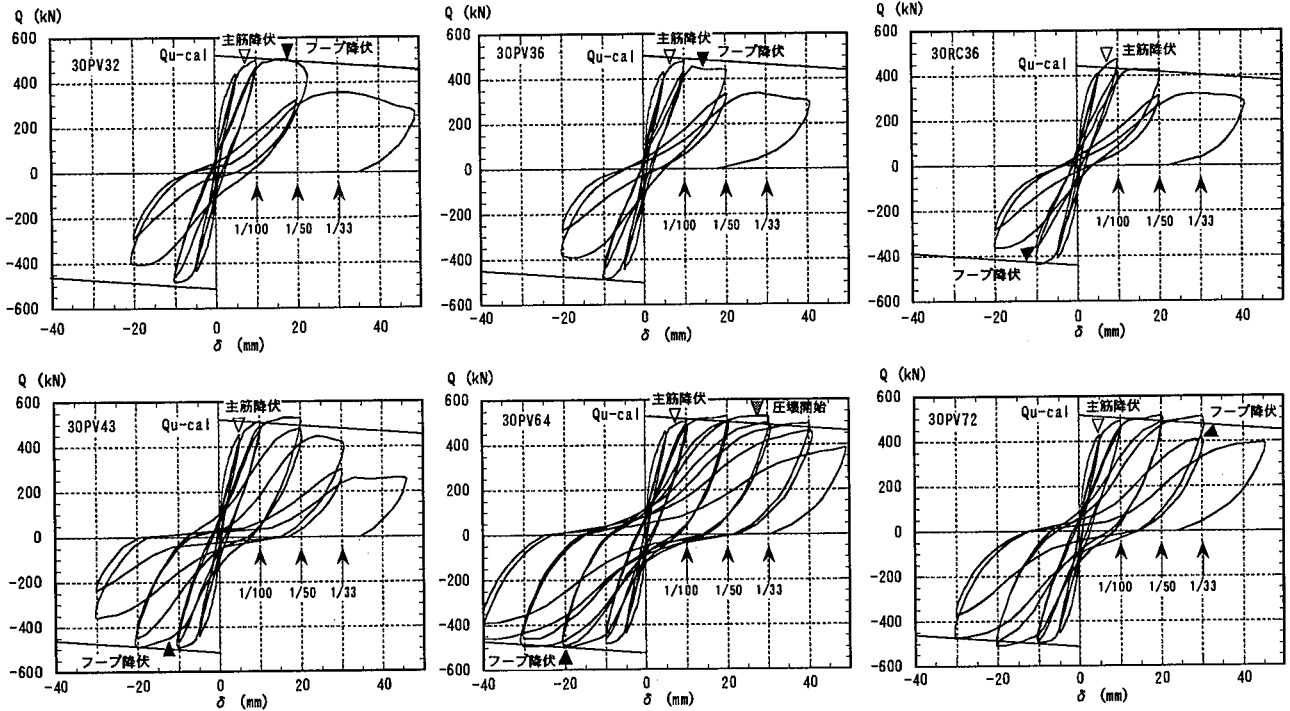


Fig. 5 ① 荷重-変形関係(Q-δ関係) Fc30シリーズ
Load-Deformation Curve of Fc30 Series

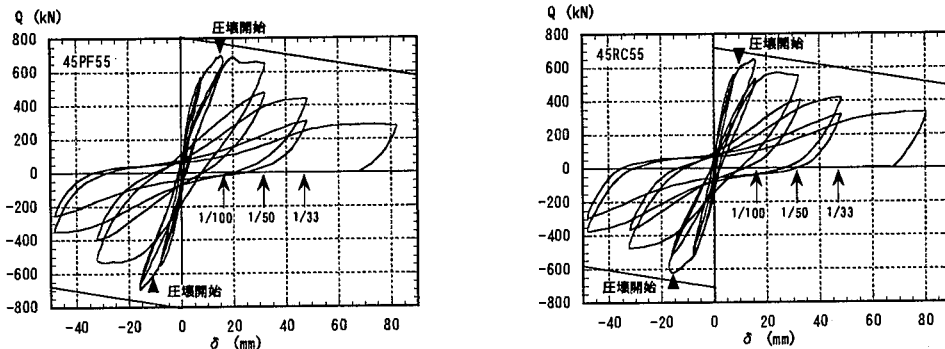


Fig. 5 ② 荷重-変形関係(Q-δ関係) Fc45シリーズ
Load-Deformation Curve of Fc45 Series

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おり、付着応力度が最大となる時の変形と最大耐力時変形が必ずしも一致していない。Fig. 7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、Fig. 6の平均付着応力度は τ_{bu-cal} に達していないが、Fig. 7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ことが分かる。すなわち、ひびわれ発生状況により付着応力度にかなりばらつきが生じるとともに、最大耐力付近で部分的に付着が失われていることが推定できる。

Fig. 8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ことを示唆している。

3.2.3 外殻PCa柱の曲げおよびせん断耐力 Table 4に示した曲げ降伏及び曲げ終局モーメントは、文献²⁾に示す方法で、外殻コンクリート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。同表において、曲げ破壊試験体の最大曲げモーメント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²⁾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

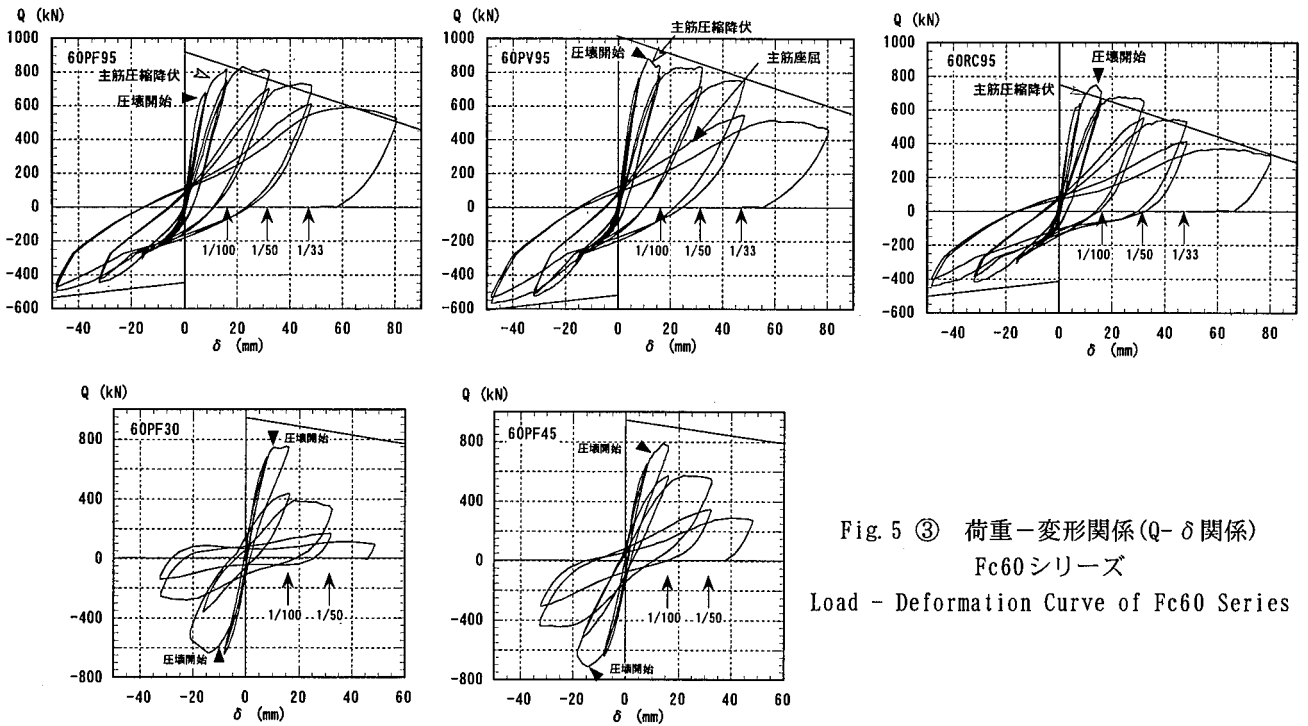


Fig. 5 ③ 荷重-変形関係(Q-δ関係)
Fc60シリーズ
Load - Deformation Curve of Fc60 Series

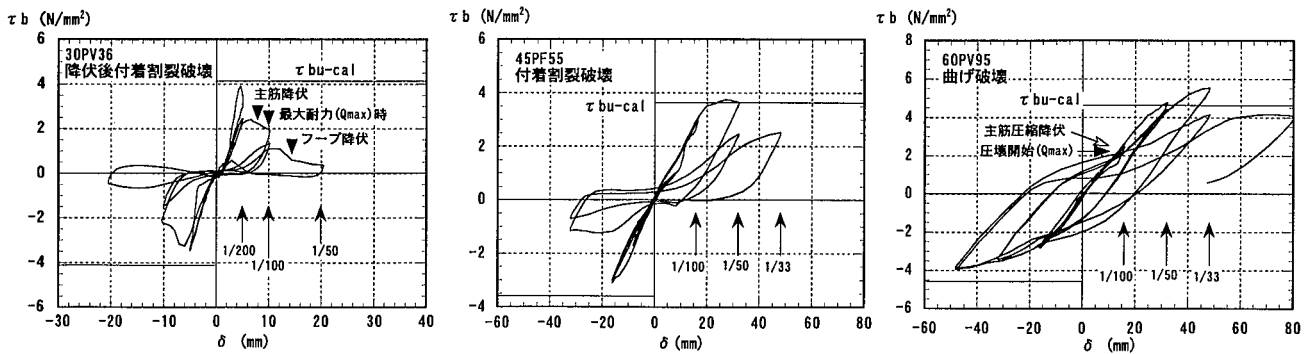


Fig. 6 付着応力と層間変形の関係(τb-δ関係)
Bond Stress - Deformation Curve

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。

3.3 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的全割裂モードに加えて、Fig. 9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(Fig. 9中の式)^{2),3)}。3.2.2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、同図のような割裂線が中子筋を横切らないコア内割裂が生じているためと考えられる。したがって、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。

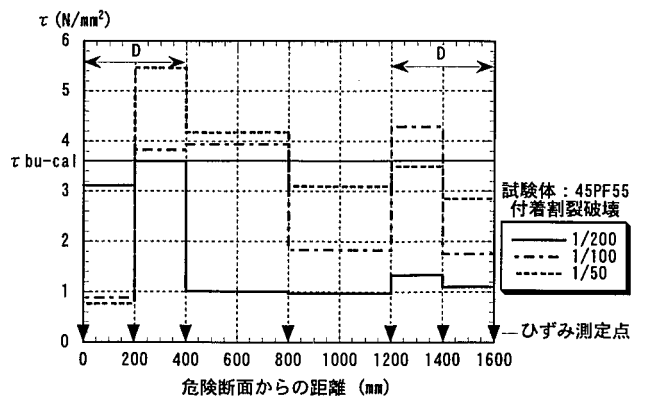


Fig. 7 主筋付着応力分布の一例
Distribution of Bond Stress

一方、Fig. 9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、Fig. 10で示すように割裂パターンを改めて考えることとする。すなわち、主筋位置より断面外側に向かっては全割裂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⁹⁾を参考に、付着割裂強度式をFig. 10中の式のように改めることとした(ただし、Fig. 9と変わるのは式(6)のみで、他の式は同じ)。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こととなる。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(プレカラムⅡ, バイコンカラム)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割裂強度の計算においては、本実験で採用した程度のコッターは無視することとした。

コッターの大きさと界面付着強度の関係については今後の課題と言える。

Fig. 11は修正前の式(1)~(5)あるいは修正後の式(1')~(6)による計算値(τ_{bu-cal})と、Fig. 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。一列に並ぶ主筋数が多いFc45, Fc60シリーズで修正前後の計算値の変動が大きくなっており、修正後の新式はFcにかかわらず実験値と計算値は良く一致している。

この割裂パターンは多数の主筋が一列に並び、うち数本が中子筋で拘束されるような場合には、通常のRC部材にも応用できると考えられるが、今後の検討課題とした。

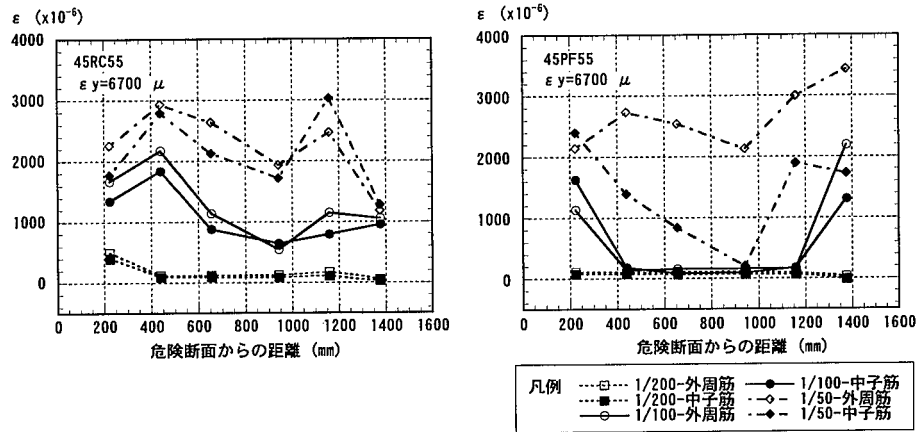


Fig. 8 せん断補強筋歪分布

Distribution of Tensile Strain on Shear Reinforcement Bar

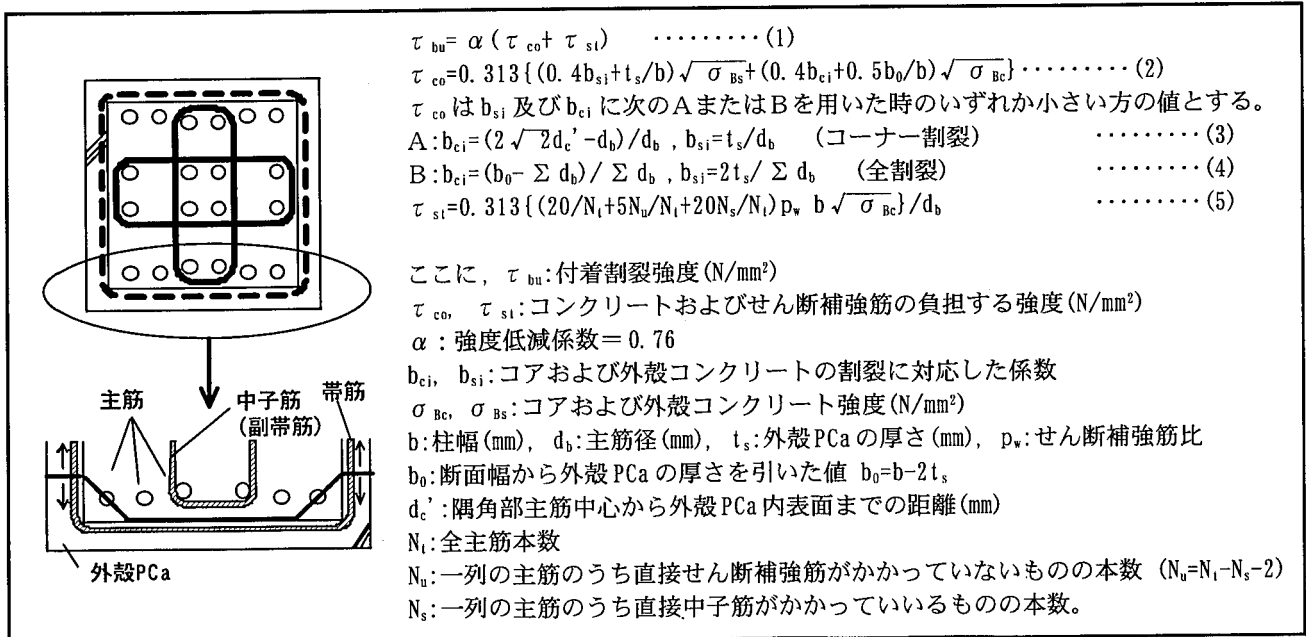


Fig. 9 文献^{1), 2), 3)}で示す割裂モードと付着割裂強度式

Bond Split Mode and Equation for Bond Split Stress (Former Proposed)

$\tau_{bu} = \alpha (\tau_{co} + \tau_{si}) \dots\dots\dots (1')$
 $\tau_{co} = 0.313 \{ (0.4b_{si} + t_s/b) \sqrt{\sigma_{Bs}} + (0.4b_{ci} + 0.5b_0/b) \sqrt{\sigma_{Bc}} \} \dots\dots\dots (2')$
 τ_{co} は b_{si} 及び b_{ci} 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: $b_{ci} = \{ (1 + \sqrt{3})d_c' + (n-1)d_s - nd_b \} / nd_b$, $b_{si} = t_s / nd_b$ (コア内割裂) $\dots\dots\dots (6)$
 B: $b_{ci} = (b_0 - \Sigma d_b) / \Sigma d_b$, $b_{si} = 2t_s / \Sigma d_b$ (全割裂) $\dots\dots\dots (4')$
 $\tau_{si} = 0.313 \{ (20/N_i + 5N_u/N_i + 20N_s/N_i) p_{hr} b \sqrt{\sigma_{Bc}} \} / d_b \dots\dots\dots (5')$
 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
 (右図で隅角部主筋 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)
 d_s: 隣り合う主筋の中心間隔 (mm)
 p_hr: 想定する割裂パターンが横切る帯筋の足数に相当するせん断補強筋比。
 全割裂の場合 p_w、中子筋がコア配筋で、隅角部主筋のみの割裂の場合 p_w' (外周筋のみによるせん断補強筋比) となる。
 また、界面附着破壊部分を通る足数も含める (従って、帯筋内蔵のプレカラムでは全てのパターンで p_w となる)
 その他の記号は Fig. 9 に同じ

Fig. 10 割裂パターンと付着割裂強度式

Bond Spilitting Mode and Equation for Bond Spilitting Stress (New Proposed)

4. まとめ

本報告では、外殻プレキャストコンクリート「プレカラムⅡ」の概要を述べ、既に実用化されているプレカラム、バイコンカラムとの違いについて説明するとともに、中子筋(副帯筋)をコアコンクリート内に配筋した外殻PCa柱部材の曲げせん断実験について報告した。実験より得られた主な結果を以下に示す。

- 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附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。

謝辞

第一工業大学工学部建築学科の吉岡研三教授には実験を行うにあたり貴重なご意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。

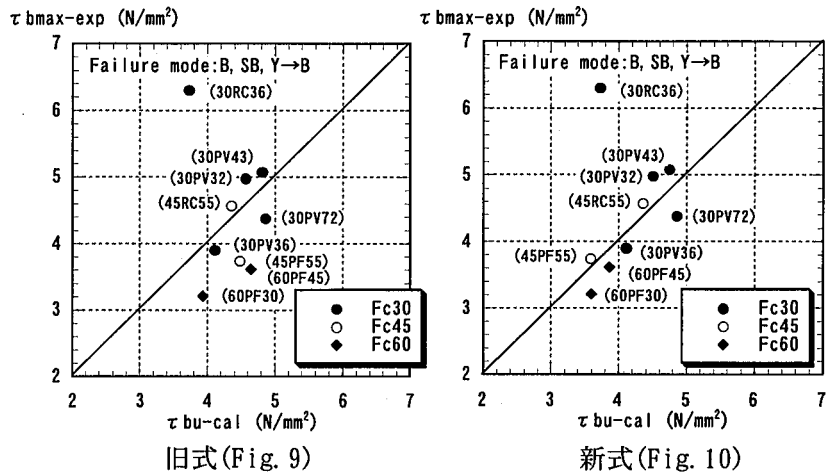


Fig. 11 付着割裂強度の実験値と計算値の比較

Comparison of Bond Spilting Strength

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, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 458, pp. 109-118, (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, pp. 133-138, (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, pp. 389-394, (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, pp. 45-53, (1983. 2)