

遠心成形プレキャストコンクリート部材の開発（その3）

——「プレカラム」を用いた部材の終局強度について——

増田 安彦 吉岡 研三

Development of Precast Concrete Member Molded by Centrifugal Force (Part 3)

——Ultimate Strength of Column Member Using “Pre-Column” ——

Yasuhiko Masuda Kenzoh Yoshioka

Abstract

“Pre-Column” was developed for use as a cast-in-place column form to save labor in formwork and installation of reinforcement at the construction site and to save wood resources. The features of structural performances of half-precast concrete columns using “Pre-Column” are described in this paper.

Flexural shear experiments on half-precast concrete members were conducted using four parameters: main reinforcement ratio, lateral reinforcement ratio, shear-span ratio, and axial force. It appeared that the structural performances of the half-precast concrete members were not less than ordinary concrete members when failing in flexure, shear, or bond. Methods of estimating ultimate strengths corresponding to these failure modes are proposed.

概 要

柱部材の省力化施工を目的に開発した、薄肉中空のハーフプレキャスト柱部材「プレカラム」は、平成4年7月に日本建築センターの一般評定を取得し、今後多くの需要が予想される。本報告は、評定取得のために実施した実験の一部を紹介し、プレカラムを用いた部材特有の曲げ、せん断、付着割裂強度について検討した結果について述べたものである。

実験は、約1/2スケールの試験体9体の主筋量、帯筋量、せん断スパン比、軸力を変化させた、曲げせん断実験である。主な結果に、① プレカラムを使用することで曲げ、せん断耐力が上昇する。② 軸力が高いほど、一体打ち部材に比べ曲げ耐力が高い。③ 付着割裂破壊を生じた部材では、プレカラムを使用したほうが耐力、変形能力共に優れる。などが挙げられ、これらを考慮したせん断耐力、付着強度算定法を提案した。

1. はじめに

柱部材の省力化施工を推進するため開発した「プレカラム」（遠心成形中空プレキャスト型枠）は、柱の型枠工事およびフープ筋配筋工事が省略できる特長を持つ。既報^{1),2)}では、プレカラムの実用化を推進するため、その型枠としての性能を調べると同時に、プレカラムを使用した柱部材（以後プレカラム柱と略す。）の曲げおよびせん断耐力、変形能力、部材剛性、主筋の付着特性など力学的諸性状を調べ、それらが一体打ち部材と比べ同等以上であることを確認した。

本報は、約1/2スケールの試験体を用いて、軸力下の曲げせん断加力実験を行い、せん断破壊あるいは付着割裂破壊を生じた部材の破壊耐力評価方法、および主筋の付着割裂強度を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

表-1に試験体の概要を示す。試験体は9体で、うち5体がプレカラムを使用した試験体である。PC-FC1, PC-FC2, RC-FCの3体は政令による鉄筋コンクリート造部材の種別でFCに分類される高軸力部材を想定している（以後FC部材試験体と称する）。PC-SN1, PC-SN2, RC-SN1, RC-SN2試験体はせん断破壊を、PC-B, RC-B試験体は曲げ破壊を予想した試験体である（以後それぞれせん断破壊試験体、曲げ破壊試験体と称する）。プレカラムを用いた試験体のうちPC-FC2は、ワイヤーメッシュで補強し、かぶりコンクリートの一部として使用する「型枠プレカラム」を使用し、他の試験体にはフープ筋を内蔵させた「構造プレカラム」を使用した。

図-1に試験体の形状および配筋の一例を、図-2に断面を示す。試験体は通常の柱と同様に縦打ちとし、下

部スタップ打込み後プレカラムを建込み、上部スタップ配筋、型枠組み立て、試験区間および上部スタップのコンクリート打ちの順で試験体を製作した。

表-2 に使用した鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を示す。プレカラムのコンクリート強度は、遠心力締固めを行わず、プレカラムと同様の蒸気養生とした供試体の材令28日強度を採用している。

加力は建研式短柱試験機を用いた逆対称の曲げせん断加力で、正負交番繰返し载荷とした。FC 部材試験体は部材角 (柱内のり長さに対する層間変位の値) $R=1/400$, $1/200$ で各々 2 回ずつ、せん断破壊試験体は曲げひびわれ発生時に 1 回、せん断ひびわれ発生時に 2 回の繰返しを、曲げ破壊試験体は $R=1/200$, $1/100$, $1/50$ で各々 2 回の繰返し载荷とした。

3. 実験結果および考察

3.1 耐力性状

FC 部材試験体 3 体は、主筋の圧縮降伏後せん断破壊を生じた。せん断破壊試験体および曲げ破壊試験体は各々せん断破壊および主筋降伏後付着割裂破壊を生じた。

表-3 に実験結果の一覧を、図-3 に各試験体のせん断力-層間変位関係 ($Q-\delta$ 関係) を示す。表-3 における降伏および曲げ最大荷重の計算値は、前報²⁾で述べた部材断面を縦横に分割し、それぞれの要素にプレカラムあるいは後打ちコンクリートの材料特性値を入力するファイバー法による断面解析の結果を示している。

まず、FC 部材試験体 3 体を比較すると、プレカラムを用いた試験体が $R=1/200$ の繰返し後に破壊したのに対して、一体打ち試験体 RC-FC は $R=1/400$ で繰返した後、 $1/200$ の変位で繰返しを行う前に破壊している。主筋位置が同じ PC-FC1 と RC-FC の荷重を比較すると、プレカラムを用いた場合、降伏時で約 1.4 倍、最大耐力時で約 1.2 倍程度一体打ち試験体よりも高くなっている。図-4 は FC 部材試験体を対象に行った断面解析結果で、降伏モーメント-軸力関係を示す。同図によれば軸力が高いほどプレカラムを用いた場合と一体打ち試験体の降伏モーメントに差が生じることが分かる。

せん断破壊試験体もプレカラムを用いた試験体の方が耐力および変形量に優れ、軸力比の違いにかかわらず約 10% せん断耐力が高かった。

曲げ破壊試験体のうち PC-B 試験体は、約 $R=1/150$ で主筋降伏後、 $R=1/50$ で最大荷重となり付着割裂破壊を生じた。RC-B 試験体では同様に約 $R=1/150$ で主筋が降伏したが、それとほぼ同時に付着割裂破壊を生じた。

3.2 ひずみ計測結果

図-5 はせん断破壊試験体のフープ筋ひずみ分布を示したものである。プレカラムを用いた試験体はフープ筋が完全に降伏してせん断破壊を生じているが、一体打ち試験体はフープ筋が完全に降伏する前にせん断破壊に至っている。これはフープ筋の降伏に先んじてトラスあるいはアーチを形成するコンクリートが破壊したためと考

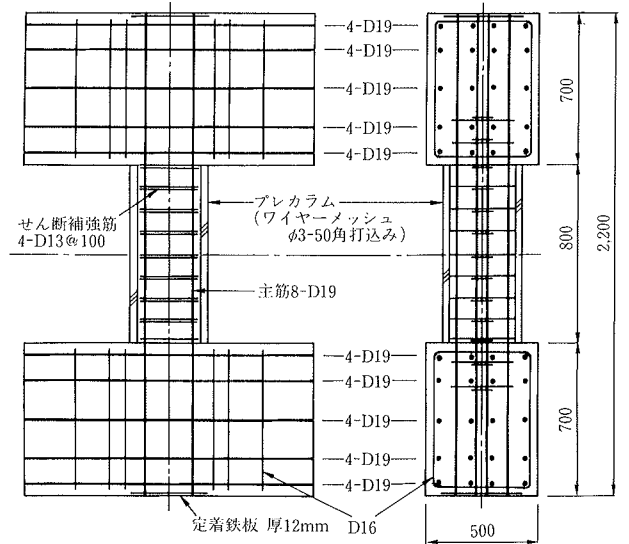


図-1 試験体概要

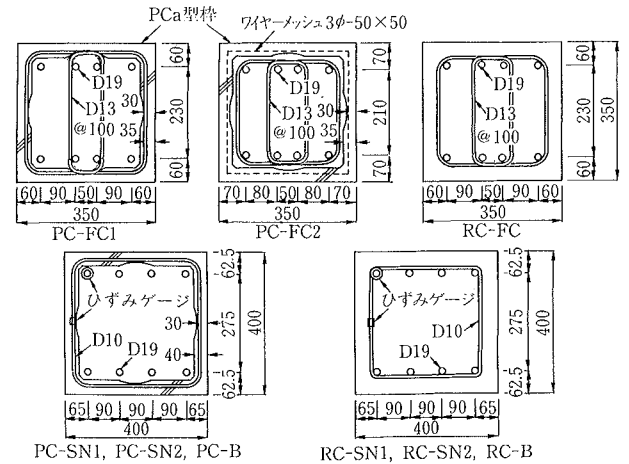


図-2 試験体断面

表-1 実験概要

試験体	b×D×ho (mm)	主筋 (pg%)	フープ筋 (pw%)	軸力 (*FcBD)	プレカラム
PC-FC1	350×350 ×800	8-D19 (1.87)	4-D13 @100 (1.45)	0.55	構造
PC-FC2				0.55	型枠
RC-FC				0.55	一体打ち
PC-SN1	400×400 ×600	8-D19 (1.4)	2-D10 @120 (0.30)	0.125	構造
RC-SN1				0.125	一体打ち
PC-SN2				0.25	構造
RC-SN2	400×400 ×1,000			0.25	一体打ち
PC-B				0.125	構造
RC-B				0.125	一体打ち

表-2 材料試験結果

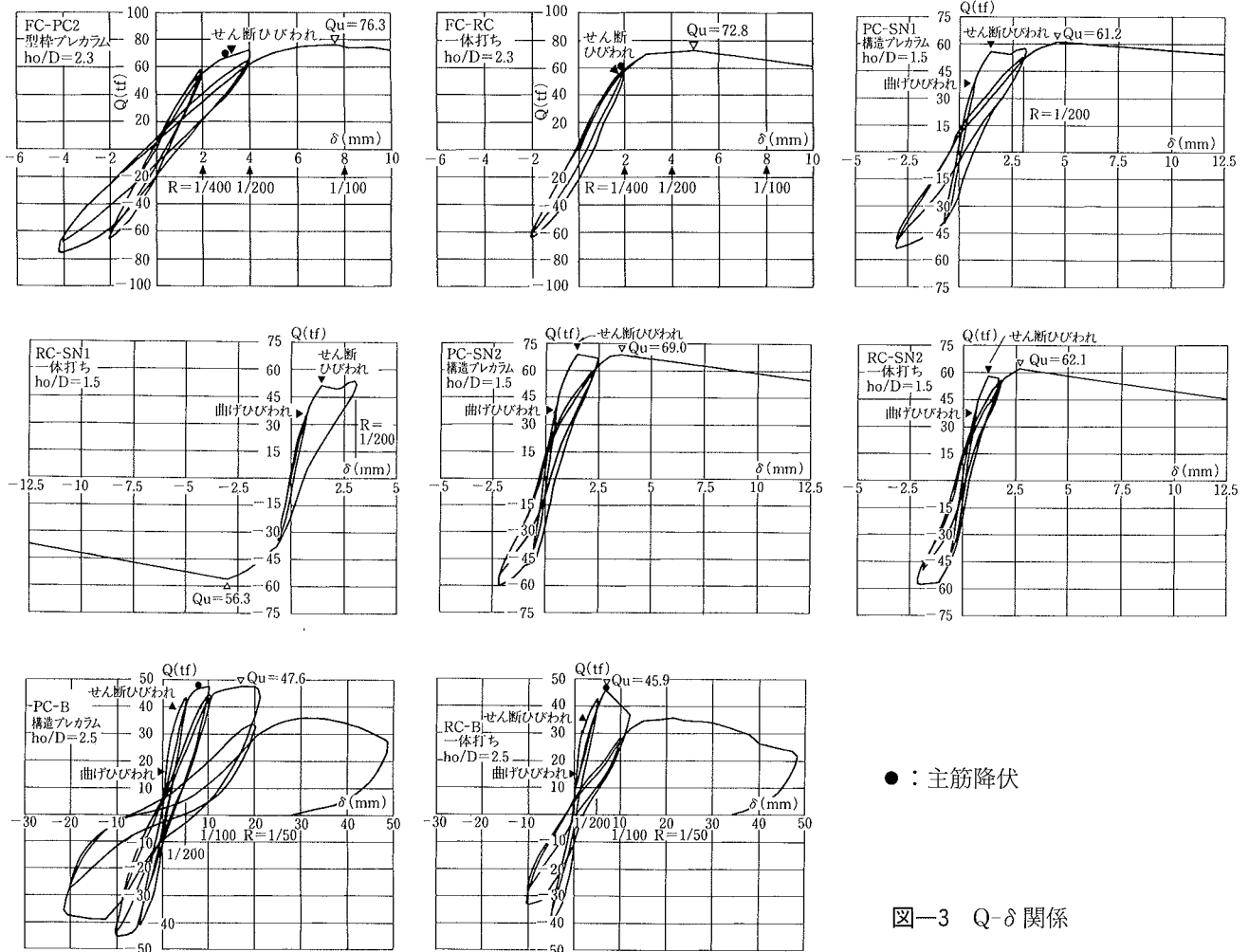
試験体	鉄筋				コンクリート	
	径	弾性係数 kgf/cm ²	降伏強度 kgf/cm ²	引張強度 kgf/cm ²	圧縮強度 kgf/cm ²	弾性係数 kgf/cm ²
FC部材	D13	1.89×10 ⁶	3,460	4,990	459	2.70×10 ⁵
	D19	1.97×10 ⁶	3,800	5,380	584	4.00×10 ⁵
せん断・曲げ破壊	D10	1.89×10 ⁶	3,460	4,990	281	2.37×10 ⁵
	D19	1.96×10 ⁶	3,650	5,690	562	2.73×10 ⁵

*コンクリートの弾性係数は1/3割線係数、上段は後打ちコンクリート、下段はプレカラム

表-3 実験結果一覧

試験体		PC-FC1	PC-FC2	RC-FC	PC-SN1	RC-SN1	PC-SN2	RC-SN2	PC-B	RC-B
Q _{bcr} (tf)		-	-	-	30.0	23.0	38.0	34.0	18.0	14.0
Q _{scr} (tf)		80.0	72.0	58.0	56.0	51.0	69.0	58.0	39.0	34.0
降伏荷重 (tf)	実験値	83.8	67.0	60.0	-	-	-	-	44.9	43.9
	計算値	84.3	82.8	74.8	67.2	63.4	87.7	81.7	40.3	38.1
最大荷重 (tf)	実/計	0.99	0.81	0.80	-	-	-	-	1.11	1.15
	実験値	86.0	76.3	72.8	61.2	56.3	69.0	62.0	47.6	45.9
	計算値	87.2	84.8	77.1	79.3	69.0	93.4	87.5	43.8	41.1
	せん断	78.4	74.9	72.3	57.9	49.4	57.9	49.4	50.9	46.7
	実/計	1.10	1.02	1.01	1.06	1.14	1.19	1.26	1.09	1.12

Q_{bcr}: 曲げひびわれ荷重, Q_{scr}: せん断ひびわれ荷重 (いずれも目視による)
 最大荷重の実/計は、曲げ・せん断の内、低いほうの計算値を用いて計算した。
 アンダーラインは圧縮降伏を示す。



● : 主筋降伏

図-3 Q-δ関係

えられ、高強度のプレカラムを用いた試験体のほうがせん断耐力が高い結果と一致する。

表-4 は曲げ破壊試験体 (PC-B, RC-B) の主筋ひずみ計測値から求めた応力を用い、計測点間の応力差と距離から算出した付着応力度の、部材両端から主筋が降伏した区間 25 cm を除く中央部 50 cm の平均値を示す。同表よりいずれの試験体も最大耐力時に付着応力度が最大で、その値はプレカラムを用いた試験体のほうがわずかに大きい。このことと先に述べた耐力および変形状からプレカラムコンクリートは後打ちコンクリートとの一

体性も良く、付着割裂に抵抗していると考えられる。

3.3 ひびわれ発生状況

写真-1 は載荷終了時の試験体状況の一例を示したものである。せん断破壊を生じた試験体はプレカラム使用の有無による違いはあまり見られないが、付着割裂破壊を生じた試験体では、一体打ち試験体が典型的な付着割裂破壊であることが分かるのに対して、プレカラムを用いた試験体は曲げせん断ひびわれが多く発生し、比較的曲げ破壊に近い破壊状況を示している。

4. プレカラム柱のせん断耐力

半プレキャスト部材のせん断耐力を評価するときにしばしば用いられている方法として、コンクリート強度を外殻とコアの断面積に応じた等価強度とし、これを従来の強度算定式に適用して耐力を算定する方法がある。この方法は簡便で、比較的精度良くせん断耐力を評価できることが知られている³⁾。しかしながらコンクリートを等価強度とすることの根拠があいまいであることなどが問題点と言えよう。

そこで、構造プレカラムを用いた部材を対象に、せん断強度の評価方法を、建築学会編「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」に採用されているような塑性理論の下界定理に基づく明解な理論式として導くことを試みる。

まず、コンクリートの圧縮強度有効係数 ν および圧縮束の角度 ϕ にはプレカラムおよび後打ちコンクリートの2種について取扱うことの煩雑さを避けるため、コンクリートの影響を受けない同指針B法による評価方法にならうことにする。次に断面を図-6のように分割し、コンクリートがトラスの圧縮弦材として作用している区間とアーチ機構によってせん断力を負担している区間とを想定する。トラス機構を負担している区間は帯筋を中心にそれを取り巻く幅 b_{ts} , b_{tc} で表わすこととする。このモデルは若林・南によるモデル⁴⁾とほぼ同様のものであるが、 $b-2b_{ts}-(n-2)b_{tc}$ で表わせるアーチ機構負担分力を外殻あるいはコアごとに無筋コンクリートとして独立に扱っている。コンクリートが有効強度に達しているものとして、帯筋降伏時に幅 b_{ts} , b_{tc} は(2)式で、トラス負担分力は(3)式で表わせる。また、アーチ負担分力は(4)式で示すように、プレカラムあるいは後打ちコンクリートそれぞれの負担分力の和として求められる。図-7は既

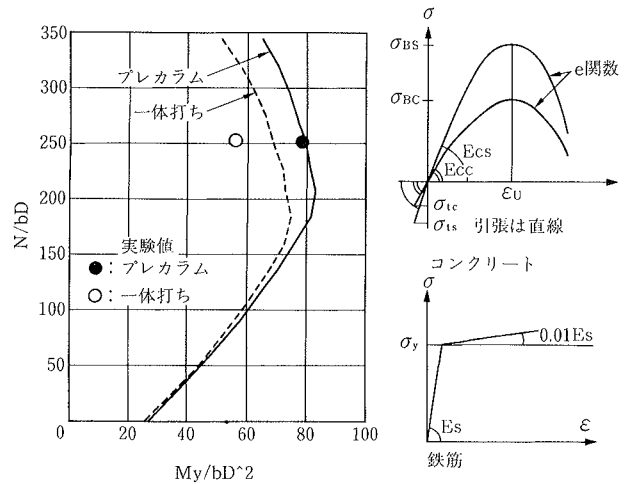


図-4 My-N 相関図

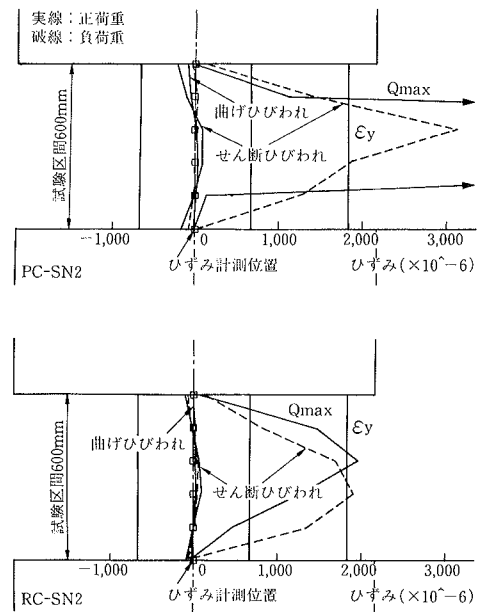


図-5 フープ筋ひずみ分布

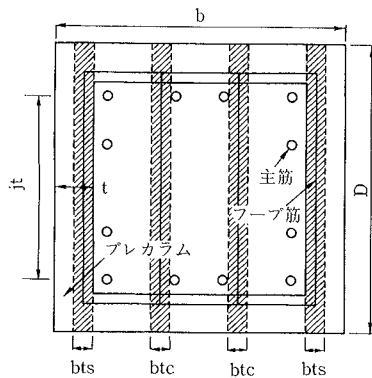


図-6 断面分割モデル

表-4 付着応力度

	1/200	1/167	1/100	1/50	1/33
PC-B	10.4	21.5	38.3	*39.5	9.4
RC-B	35.5	*38.8	19.4	8.9	—

* : 最大荷重時 単位は kgf/cm²

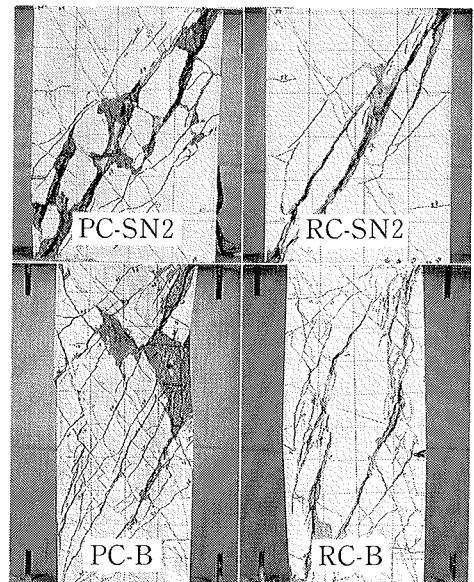


写真-1 破壊状況の一例

報^{1),2)}および本実験結果ならびに既往の研究^{5)~10)}について計算式の適用性を検討したものであるが、実用上十分な精度でせん断力が評価できることが分かる。

$$V_u = V_t + V_a \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$b_{ts} = a_s \sigma_{wy} / (S \cdot \sin^2 \phi \cdot \nu \sigma_{Bs}) \quad \dots\dots\dots(2a)$$

$$b_{tc} = a_s \sigma_{wy} / (S \cdot \sin^2 \phi \cdot \nu \sigma_{Bc}) \quad \dots\dots\dots(2b)$$

$$V_t = 2b_{ts} \nu \sigma_{Bs} j_t \cos \phi \sin \phi + (n-2) b_{tc} \nu \sigma_{Bc} j_t \cos \phi \sin \phi = b_{jt} p_w \sigma_{wy} \cot \phi \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$V_a = V_{as} + V_{ac} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$V_{as} = \tan \theta b_{as} D \nu \sigma_{Bs} / 2 \quad \dots\dots\dots(5a)$$

$$V_{ac} = \tan \theta b_{ac} D \nu \sigma_{Bc} / 2 \quad \dots\dots\dots(5b)$$

$$\tan \theta = \sqrt{(2M/VD)^2 + 1} - 2M/VD \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$b_{as} = 2t - 2b_{ts} \quad \dots\dots\dots(7a)$$

$$b_{ac} = b - 2t - (n-2)b_{tc} \quad \dots\dots\dots(7b)$$

ここに、

V_u ; せん断耐力

V_t, V_a ; トラスおよびアーチ機構負担せん断力

n, a_s, S ; せん断補強筋の足数, 断面積, ピッチ

p_w ; せん断補強筋比

σ_{wy} ; せん断補強筋降伏強度

σ_{Bs} ; プレカラムコンクリートの圧縮強度

σ_{Bc} ; 後打ちコンクリートの圧縮強度

b, j_t, D ; 断面幅, 主筋中心間距離, 断面全せい

b_{ts}, b_{as} ; プレカラム断面内でトラスおよびアーチ機構が作用する幅

b_{tc}, b_{ac} ; 後打ちコンクリート断面内でトラスおよびアーチ機構が作用する幅

t ; プレカラムの肉厚

ν ; コンクリートの有効係数で次式による。

$$\nu = (2M/VD + 1) / 4 \quad (0.5 \leq \nu \leq 1.0)$$

ϕ ; トラス機構におけるコンクリート圧縮角度で、45度とする。

V, M ; 設計せん断力および曲げモーメント

5. プレカラム柱の主筋付着強度

前報²⁾では、プレカラムを使用することで独特の割裂パターンが生じることがあること(図-8)、またプレカラムに副帯筋を内蔵させた場合、一体打ちに比べ付着割裂が生じにくくなることを考慮した付着割裂強度式を提案したが、コンクリートの割裂強度を算出する際にプレカラムの割裂抵抗を無視しているため、プレカラム使用試験体のほうが部材耐力は高いが、付着強度が低く評価される傾向があった。また、繰返しによる付着劣化を考慮する際の低減係数を繰返し回数にかかわらず一律0.7としたが、より一般的に繰返し荷重、および繰返しによる新たな曲げせん断ひびわれの発生などによる付着劣化を考慮する必要がある。以上より前報の付着強度式を以下のように修正した。すなわち、(9)式に示すように、コンクリートの割裂強度をプレカラムと後打ちコンクリートの割裂強度の和として、考えられる割裂パターン(図

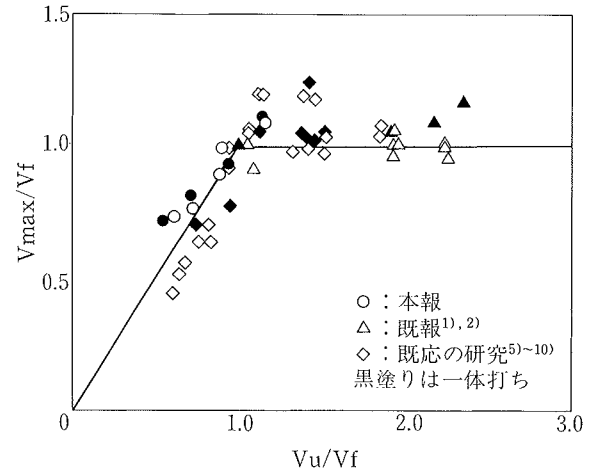


図-7 せん断耐力算定式の適合性

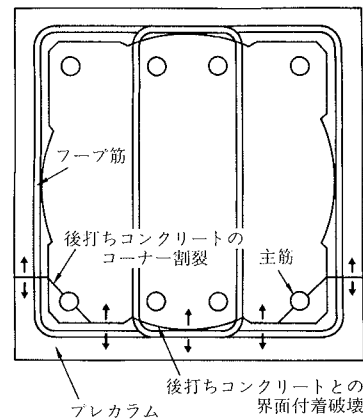


図-8 プレカラム特有の割裂パターン

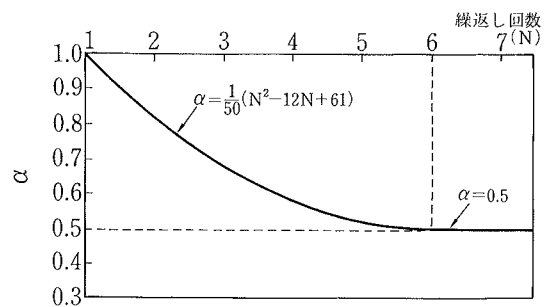


図-9 α -N 関係

—8に示すパターンあるいは全割裂)ごとに求め、いずれか小さいほうを採用することとし、低減係数 α は最大耐力に至るまでの繰返し回数 N に応じた付着強度の減少傾向を、文献¹¹⁾の一定振幅繰返し載荷試験の結果を参考に求めることを試みた。

実験結果よりヒンジゾーン以外にせん断ひびわれが進展するのは主に主筋降伏以後であること、主筋降伏以前は部材剛性も高く、わずかな荷重の上昇によって主筋の τ - S 関係はその処女載荷曲線に復帰すると考えられる¹¹⁾ことから図-9に示すような曲線で表わすこととし

た。文献¹²⁾では、 α を部材の塑性変形量に応じて決めているが、ここでは、曲げ降伏後の繰返し回数 N に応じて付着応力の減少量も徐々に低下する二次曲線とし、繰返し 6 回以降は一定値 0.5 となる曲線で α を表わす。表一 5 は本実験結果および前報²⁾の結果と計算値を比較したものである。試験体 PC-B では $\alpha=0.58$ (4 回繰返し時の付着応力低下率) を、RC-B では $\alpha=0.82$ 同 2 回繰返し時) を用いて計算した。実設計で降伏ヒンジを計画する部材では 6 回以上の繰返しに対応する、 $\alpha=0.50$ を用いた設計が必要と考えられる。同表で、実験値のばらつきが大きい計算値はそれらのほぼ平均的な値を示すことが分かる。なお、主筋の付着強度を用いて部材の付着割裂耐力を求める手法に関して、現在多くの研究が成されている¹²⁾が、破壊モードの判別などの点でまだ十分とは言えない。本構造形式の場合も同様で、今後の研究課題と言えよう。

$$\tau_{bu} = \alpha(\tau_{co} + \tau_{st}) \dots\dots\dots(8)$$

$$\tau_{co} = (0.4b_{is} + 0.5)\sqrt{\sigma_{bs}} + (0.4b_{ic} + 0.5)\sqrt{\sigma_{bc}} \dots\dots\dots(9)$$

τ_{co} は次の A: または B: を用いたときのいずれか小さいほうの値とする。

$$A: b_{is} = t/d_b, \quad b_{ic} = (2\sqrt{2} \cdot d_c' - d_b)/d_b \dots\dots\dots(10a)$$

$$B: b_{is} = 2t/\sum d_b, \quad b_{ic} = \{(b - 2t) - \sum d_b\}/\sum d_b \dots\dots\dots(10b)$$

$$\tau_{st} = \{(20/N_t + 5N_u/N_t + 20N_s/N_t) p_w \cdot b \sqrt{\sigma_{bc}}\}/d_b \dots\dots\dots(11)$$

ここに、

- τ_{bu} ; 付着割裂強度
- τ_{co} ; コンクリートによる負担応力
- τ_{st} ; せん断補強筋による負担応力
- α ; 繰返しによる強度低減係数
- b_{is}, b_{ic} ; プレカラムおよび後打ちコンクリートの割裂に関する係数
- d_b ; 主筋径
- $\sum d_b$; 一列に並んだ主筋直径の総和
- d_c' ; プレカラム内表面から隅角部主筋中心までのかぶり厚さ
- N_t ; 一列に並ぶ主筋本数
- N_s, N_u ; 一列の主筋のうち副帯筋が掛かっているもの、および掛かっていないものの本数

6. まとめ

プレカラムを用いた柱部材の曲げせん断実験により、以下のことが明らかとなった。

- ① プレカラムを使用した試験体は、一体打ち試験体に比べ、高軸力時ほど曲げ降伏荷重が高くなることが実験およびファイバーモデルを用いた断面解析から確認された。
- ② プレカラムを使用した柱部材のせん断耐力は、曲げ耐力と同様に一体打ち部材よりも高い。せん断耐力は、

表一 5 最大耐力時付着応力度の比較

試験体	τ_{bu} 実験値	τ_{bu} 計算値	実/計	α
PC-B	39.5	32.1	1.23	0.52
RC-B	38.8	29.8	1.30	0.68
PC-2-100	22.2	31.7	0.70	0.50
RC-4-200	29.5	41.2	0.72	0.68

下界定理に基づき、プレカラムと後打ちコンクリートを独立に扱うせん断理論式によって精度よく評価できることを示した。

③ 付着割裂破壊を生じた試験体のうち、プレカラムを使用した試験体のほうが高強度の外殻コンクリートが後打ちコンクリートと一体となって割裂に抵抗するため、耐力、変形能力共に優れていた。前報で提案した付着強度式を、この実験結果に整合し、かつ算定精度が向上するように修正した。

参考文献

- 1) 増田, 他: 遠心成形プレキャストコンクリート部材の開発—「プレカラム」の力学的諸性状について—, 大林組技術研究所報, No. 41, p. 61~67, (1990)
- 2) 増田, 他: 遠心成形プレキャストコンクリート部材の開発 (その 2) —「プレカラム」に打込む副帯筋と柱の付着割裂の関係—, 大林組技術研究所報, No. 45, p. 11~16, (1992)
- 3) 美原, 他: プレキャスト鉄筋コンクリート部材の設計式の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 991~992, (1992)
- 4) 若林, 他: コンクリート系構造物のせん断強度について, 京都大学防災研究所年報, Vol. 24 B-1, p. 245~277, (1981)
- 5) 武井, 他: RC ラーメン構造の外殻部をプレキャスト化した部材の耐震性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 1827~1828, (1983)
- 6) 武井, 他: RC ラーメン構造の外殻部をプレキャスト化した部材の耐震性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 1975~1976, (1984)
- 7) 青木, 他: フープ筋付きプレキャスト型枠を用いた RC 柱部材に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 191~194, (1989)
- 8) 青木, 他: フープ筋付きプレキャスト型枠を用いた RC 柱部材に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 523~538, (1990)
- 9) 瀬口, 他: 遠心成形プレキャストコンクリート柱の構造実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 519~520, (1990)
- 10) 香田, 他: 遠心成形外殻を用いたハーフ PCa 柱のせん断性状に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 993~994, (1992)
- 11) 森田, 他: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No. 229, p. 15~24, (1975.3)
- 12) たとえば 前田, 他: 鉄筋コンクリート部材の付着割裂破壊に対する設計, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, p. 199~204, (1993)