

論文 多段配筋を持つPCa柱の曲げ終局強度に関する研究

新藤 健太*1 榎谷 栄次*2 笠松 照親*3 張 瑜中*1

要旨: 高強度材料を用いた柱部材の場合、端部の圧縮領域のコンクリートに圧縮余裕度が生じ、曲げ終局耐力に寄与しているものと考えられる。本研究は、グラウト充填式鉄筋継手を端部に有し、多段配筋されたPCa柱の曲げ終局強度を評価するため、圧縮ストラットを用いて、タイ作用およびアーチ作用によるモデル化を行い、その適合性に関して実験結果から検証した。

キーワード: 高強度材料, 多段配筋, PCa柱, 曲げ終局強度, 圧縮ストラット

1. はじめに

多段配筋されたプレキャスト(以下PCaと略す)柱の曲げ終局強度についての研究例は少なく、評価式の適合性については必ずしも芳しいものではない。本研究は高強度鉄筋およびコンクリートを用い、多段配筋されたPCa柱の曲げ終局強度を評価するため、タイ作用およびアーチ作用によるモデル化を行い、実験結果と比較検討を行った。以下にその成果を報告する。

2. 実験概要および結果

2.1 試験体

本研究で用いた試験体諸元を表-1に、配筋の例を図-1に示す。試験体はPCa試験体13体、従来型一体打試験体(以下RCと略す)3体の計16体とした⁽¹⁾⁽²⁾。また材料性状を表-2に示す。

加力方法として、第1シリーズであるPC4-1~5, RC6-1~PC-5試験体は建研

式とし、第2シリーズであるRC6-1C~PC6-6C試験体は片持式とした。

2.2 荷重-変形履歴曲線

実験から得られた荷重-部材角曲線を図-2に

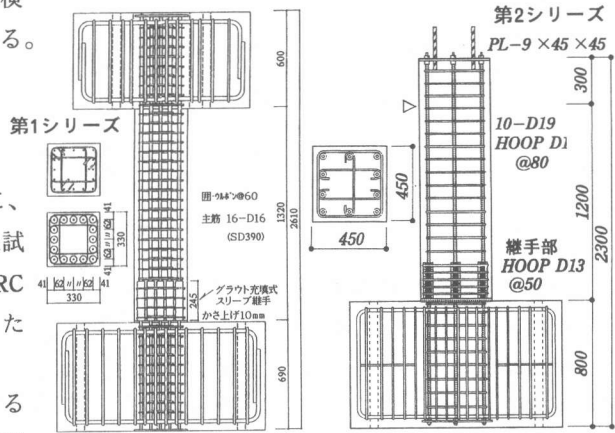


図-1 試験体配筋図

表-1 試験体諸元

試験体名	F_c^{*1} N/mm ²	軸力比 N/bDFc	主筋	帯筋	M/QD ^{*2}	種類
第1シリーズ	48	0.2	16-D16	4-U6.4	2.0	PCa
		0.3	(SD390)	@ 60		PCa
		0.4	$P_g=2.92\%$	$P_w=0.61\%$		PCa
		0.3	16-D16 (SD490) $P_g=2.92\%$	4-U6.4 @ 60 $P_w=0.73\%$		一体打
		0.3	16-D16 (SD490) $P_g=2.92\%$	4-U6.4 @ 40		PCa
第2シリーズ	60	0.2	16-D16	4-U6.4	2.0	一体打
		0.2	(SD490)	@ 50		PCa
		0.3	$P_g=2.92\%$	$P_w=0.73\%$		PCa
		0.4				PCa
		0.3				PCa
第2シリーズ	60	0.2	10-D19	3-D13	2.67	一体打
		0	(SD490)	@ 80		PCa
		0.2	$P_g=1.42\%$	(SD785)		PCa ^{*3}
		0.2		$P_w=1.41\%$		PCa ^{*3}
		0.2				PCa ^{*4}
		0.4				PCa

表-2 材料性状

試験体名	降伏強度 主筋 σ_y (N/mm ²)	降伏強度 帯筋 σ_{wy} (N/mm ²)	圧縮強度 σ_B^* (N/mm ²)
PC4-1	417	1360	52.8
PC4-2			50.4
PC4-3			52.8
RC4-4	549	1360	54.9
PC4-5			53.1
RC6-1	534	1360	65.0
PC6-2			67.1
PC6-3			74.7
PC6-4			70.8
PC6-5			70.3
RC6-1C	526	849	75.1
PC6-2C			74.4
PC6-3C			76.7
PC6-4C			74.2
PC6-5C			71.3
PC6-6C			73.1

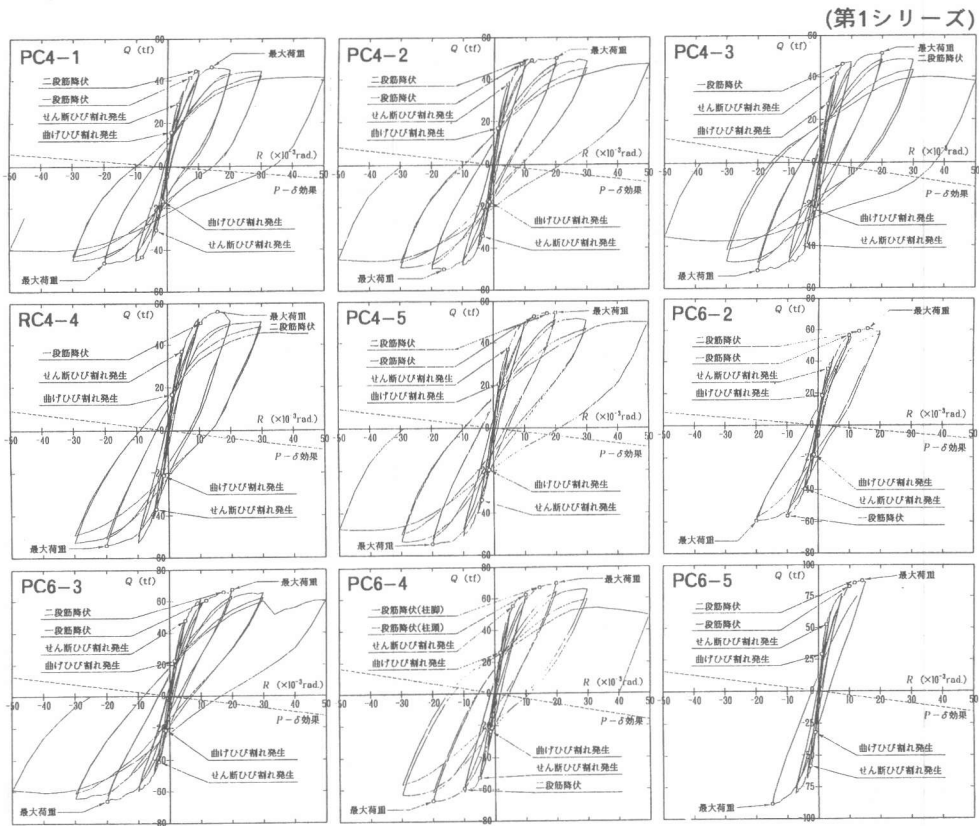
*1 コンクリート設定目標, *2 シアスパン比, (表ハッチ部は一体打試験体) * コンクリート圧縮強度
*3 継手部かぶり厚30mm確保⁽¹⁾, *4 継手端部集中配筋⁽¹⁾

*1 関東学院大学大学院 工修(正会員)

*3 西松建設(株)技術研究所(正会員)

*2 関東学院大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

それぞれ示す。図中X軸に対する斜線はP- δ 効果による影響を示している。いずれも軸方向応力度係数(以下軸力比と略す)が上昇するにつれ、耐力の上昇が認められる。



3. 曲げ・せん断抵抗機構

3.1 圧縮ストラットによるせん断伝達

多段配筋されたPCa柱において、圧縮軸力と曲げモーメントが作用するとき、部材内には塑性ヒンジ領域を取り囲むように、引張主筋と中間筋の降伏合力とつり合った圧縮ストラットが形成される(図-3(a))。この圧縮ストラットは、曲げが卓越した外側部分、せん断が卓越した中央部分と圧縮が卓越した部分から構成される。せん断力は、圧縮が卓越した部分を介して、下部構造に伝達される。また、曲

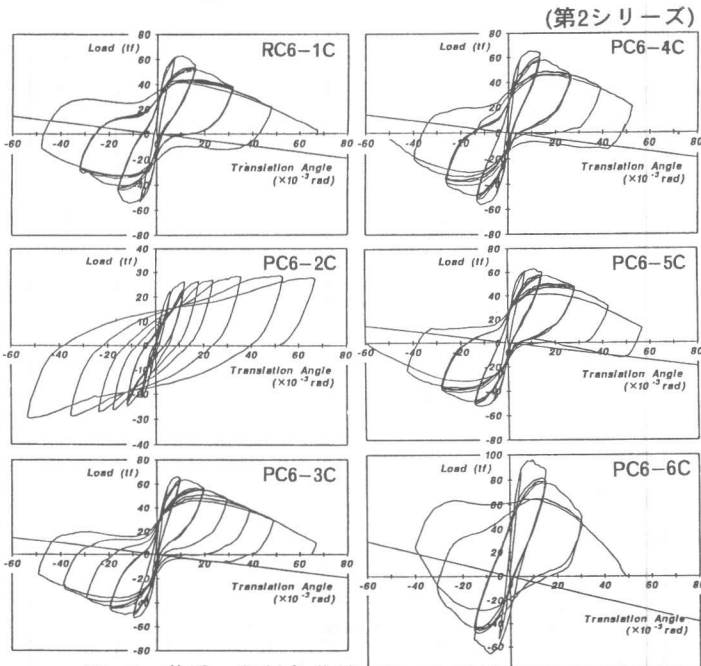


図-2 荷重-部材角曲線

げが卓越した部分の圧縮力は、横補強筋の引張力とつり合うように作用するので、この圧縮ストラットによるせん断伝達を、タイ作用と呼ぶ。また、軸方向力が作用すると、端部の圧縮領域に向かって帯状に圧縮ストラットが生じるが、それ以外にも、高強度コンクリートであるとか、コアコンクリート部が横拘束されると、端部の圧縮領域のコンクリートに圧縮余裕度が生じ、付加的な圧縮ストラットが生じる。これら2つの圧縮ストラットは、アーチ作用と呼ばれる。これより、端部に降伏曲げモーメントと軸方向力が作用した部材は、タイ作用とアーチ作用によって、せん断伝達が行われる。

3.2 タイ作用

部材の端部に配筋された主筋および中間筋の引張力 T_p 、 T_m がそれぞれ降伏に達すると、部材内では概ね材端から部材成 D だけ離れた引張領域から、材端部の圧縮領域にかけて、圧縮ストラットが形成される(図-3(b))。この圧縮ストラットにおいて、部材端の圧縮領域に接合し、材軸との傾斜角 ϕ をもつ帯状ストラット部では、圧縮応力度 σ_t とせん断応力 τ_t が作用しているが、ここでは σ_t が卓越している。一方、部材端の圧縮領域では、垂直応力 σ_x 、 σ_y およびせん断応力 τ_{xy} の直交系の平面応力場を構成する。この両者は、次式によって関係づけられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_t \sin^2 \phi + 2 \tau_t \sin \phi \cos \phi \\ \sigma_y &= \sigma_t \cos^2 \phi - 2 \tau_t \sin \phi \cos \phi \\ \tau_{xy} &= \sigma_t \sin \phi \cos \phi - 2 \tau_t (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) \end{aligned} \right\} (1)$$

上式の第1式および第2式において、 $\sigma_x=0$ 、 $\sigma_y=\beta_t \cdot \sigma_B$ とおくと、圧縮ストラットに生じる垂直応力度 σ_t は次式で与えられる。

$$\sigma_t = \sigma_y = \beta_t \cdot \sigma_B \quad (2)$$

またせん断伝達能力を Q_t とおき、 $\tau_{xy}=Q_t/kbD$ で表す。また $\tau_t=0$

$$\text{と仮定し、} \sin \phi = \frac{\tan \phi}{\sqrt{1+\tan^2 \phi}} \quad , \quad \cos \phi = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2 \phi}}$$

の関係を用い、さらにタイ作用による圧縮ストラットの傾き ϕ は余り大きくないと考えられるので $\tan^2 \phi \approx 0$ と仮定すれば、(1)式の第3式は次式のように表される。

$$\tau_{xy} = \frac{Q_t}{kbD} = \sigma_t \tan \phi \quad (3)$$

(2)式を(3)式に代入すると、せん断伝達能力 Q_t は、次式のように導かれる。

$$Q_t = \beta_t \cdot k \cdot b \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \tan \phi \quad (4)$$

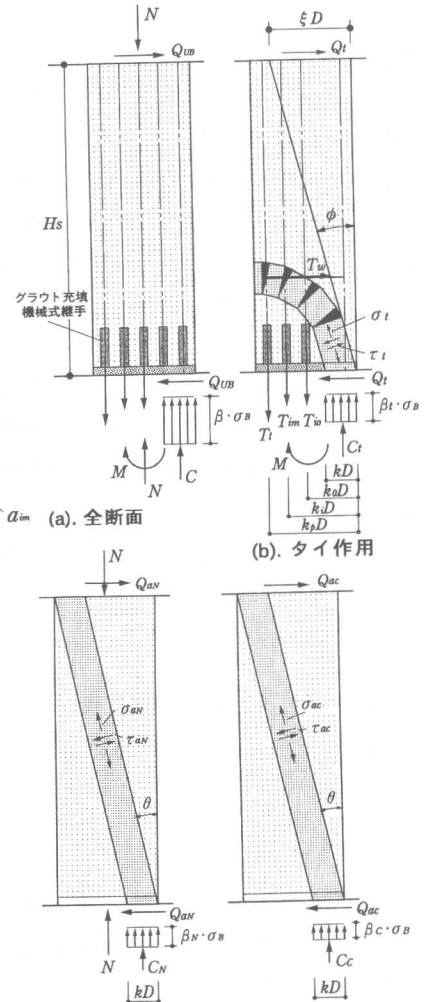


図-3 圧縮ストラットによる
曲げ・せん断抵抗機構

いま、部材端部における主筋および中間筋の降伏引張力 T_p 、 T_m と、コンクリートの圧縮合力 C_t のつり合い式： $C_t = T_t + \sum_{i=0} T_{im}$ から、次式が得られる。

$$\beta t \cdot k \cdot b \cdot D \cdot \sigma_B = a_t \cdot \sigma_y + \gamma \sum_{i=0} a_{im} \cdot \sigma_y \quad (5)$$

ここで、 a_t 、 a_{im} は、それぞれ主筋および中間筋の断面積で、中間筋は主筋間に配筋された全ての鉄筋を対象とし、低減係数0.4を乗じた値とする。 γ は有効係数で、0.5と仮定する。 σ_y は鉄筋の降伏点強度である。(5)式を(4)式に代入し、図-3(b)から、 $\tan \phi = \frac{\xi D}{H_s}$ を用いると、せん断伝達能力 Q_t は、次式で与えられる。

$$Q_t = \frac{\xi}{\lambda} (a_t \cdot \sigma_y + \gamma \sum a_{im} \cdot \sigma_y) \quad (6)$$

ここで $\lambda = H_s/D$ は、部材のシアスパン比、また H_s はシアスパン長をそれぞれ示す。パラメーター ξ は、曲げせん断を受けた部材の見掛け上の摩擦係数に相当し、柱材の場合 $\xi = 0.8$ を採用する。

3.3 アーチ作用

軸方向力 N とせん断力 Q_{aN} を受けた部材には、図-3(c)に示すように、部材端の圧縮領域に向かって、材軸と θ 傾斜角をもつ帯状の圧縮ストラットが形成される。この圧縮ストラットには、垂直応力度 σ_{aN} とせん断応力度 τ_{aN} が作用する。また、圧縮ストラットが接合する部材端の圧縮領域では、垂直応力度 σ_x 、 σ_y およびせん断応力度 τ_{xy} の応力場を構成している。この両者の間には、タイ作用の場合と同じ関係が成り立つので、(1)式から、次式に書き換えることができる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{aN} \sin^2 \theta + 2 \tau_{aN} \sin \theta \cos \theta \\ \sigma_y &= \sigma_{aN} \cos^2 \theta - 2 \tau_{aN} \sin \theta \cos \theta \\ \tau_{xy} &= \sigma_{aN} \sin \theta \cos \theta - 2 \tau_{aN} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

上式の第1式および第2式と、 $\sigma_x = 0$ 、 $\sigma_y = \frac{N}{kbD}$ の関係を用いると、次式が成り立つ。

$$\frac{N}{kbD} = \sigma_{aN} \quad (8)$$

また、(7)式の第3式に第1式を代入し、 τ_{aN} を消去する。さらに圧縮ストラットによるせん断伝達能力を Q_{aN} とおき、 $\tau_{xy} = Q_{aN}/kbD$ によって表すと、(7)式の第3式は次のように導かれる。

$$\frac{Q_{aN}}{kbD} = \frac{1}{2} \sigma_{aN} \tan \theta \quad (9)$$

上式に、図-1(c)から求めた $\tan \theta = D(1-k)/H_s$ と(8)式を代入し、パラメーター k に対して σ_{aN} がコンクリート圧縮強度 σ_B に達したときの上限値を適用すると、せん断伝達能力 Q_{aN} は次式で与えられる。

$$Q_{aN} = \frac{1}{2\lambda} (1 - \eta) N \quad (10)$$

ここで、 $\eta = N/(bD \sigma_B)$ で、 $(1 - \eta)/2$ は見掛け上の摩擦係数を示す。

次に、コンクリート圧縮強度に対して圧縮余裕度が生じたとき、部材内には図-3(d)に示すように、付加的圧縮ストラットが形成される。この圧縮ストラットには、垂直応力度 σ_{ac} とせん断応力度 τ_{ac} が作用するが、これらの応力度と部材端部の圧縮領域における応力場 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} の間の関係は、(7)式と同じ形で書き表される。ここで $\sigma_x=0$ 、 $\sigma_y=\sigma_{ac}=\beta_c \sigma_B$ 、 $\tau_{xy}=Q_{ac}/kbD$ とおき、 $k=N/bD \sigma_B$ の前述の結果を用いると、せん断伝達能力 Q_{ac} は次式のように導かれる。

$$Q_{ac} = \frac{1}{2\lambda} \beta_c (1 - \eta) N \quad (11)$$

これより、アーチ作用によるせん断伝達能力 Q_a は、(10)および(11)式の累加式として、次のように与えられる。

$$Q_a = \frac{1}{2\lambda} (1 + \beta_c) (1 - \eta) N \quad (12)$$

(12)式は、(10)式に対して、 β_c による見掛け上の摩擦係数が増加したことを示している。

3.4 全せん断伝達能力

以上、得られたタイ作用およびアーチ作用によるせん断伝達能力を累加した値が、曲げせん断部材降伏時の全せん断伝達能力となる。したがって、(6)式と(12)式から、次式が与えられる。

$$Q_{UB} = \frac{1}{\lambda} \{ \xi (at \sigma_y + \gamma \sum a_{im} \sigma_y) + \frac{1}{2} (1 + \beta_c) (1 - \eta) N \} \quad (13)$$

また、上式は次のように無次元化した形でも表現することができる。

$$\tau_{UB}^* = \frac{1}{\lambda} \{ \xi (qt + \gamma \sum q_{im}) + \frac{1}{2} (1 + \beta_c) \eta (1 - \eta) \} \quad (14)$$

ここで、 $\tau_{UB} = Q_{UB}/bD \sigma_B$ 、 $\eta = N/bD \sigma_B$ 、 $qt = at \sigma_y/bD \sigma_B$ 、 $q_{im} = a_{im} \sigma_y/bD \sigma_B$

(14)式において、 τ_{UB} は $\eta = 0.5$ のとき最大値をとり、次式で与えられる。

$$\max \tau_{UB}^* = \frac{1}{\lambda} \{ \xi (qt + \gamma \sum q_{im}) + 0.125(1 + \beta_c) \} \quad (15)$$

軸力比の最大値は、次式で与えられる。

$$\eta_{max} = 1 + \{ 2qt + \sum (q_{io} + 2q_{im}) \} \quad (16)$$

ここで、 $q_{io} = a_{io} \sigma_y/bD \sigma_B$ である。したがって、 $0.5 < \eta \leq$

η_{max} に対しては、 τ_{UB} を1次式で与えると、次のように書き表される。

表-3 実験値と算定値の比較

試験体名	実験値 最大強度 kN (t)	理論値			計 kN (t)	実/計
		主筋 kN	中間筋 kN	アーチ 作用 kN		
PC4-1	475 (48.5)	165.6	39.8	253.8	460 (46.9)	1.03
PC4-2	522 (53.3)	165.6	39.8	316.5	522 (53.3)	1.00
PC4-3	551 (56.2)	165.6	39.8	380.2	585 (59.7)	0.94
RC4-4	577 (58.9)	218.5	52.4	345.0	616 (62.9)	0.94
PC4-5	568 (58.0)	218.5	52.4	334.2	605 (61.7)	0.94
RC6-1	637 (65.0)	212.7	51.2	412.6	676 (69.0)	0.94
PC6-2	619 (63.2)	212.7	51.2	345.9	611 (62.3)	1.01
PC6-3	707 (72.1)	212.7	51.2	470.4	735 (75.0)	0.96
PC6-4	747 (76.2)	212.7	51.2	516.5	780 (79.6)	0.96
PC6-5	912 (93.1)	291.1	69.9	610.5	972 (99.2)	0.94
RC6-1C	608 (62.8)	177.4	17.8	413.6	609 (62.1)	1.01
PC6-2C	221 (22.5)	177.4	17.8	0	195 (19.9)	1.13
PC6-3C	658 (67.1)	177.4	17.8	415.5	611 (62.3)	1.08
PC6-4C	651 (66.4)	177.4	17.8	412.6	608 (62.0)	1.07
PC6-5C	615 (62.8)	177.4	17.8	409.6	605 (61.7)	1.02
PC6-6C	951 (97.0)	177.4	17.8	661.5	857 (87.4)	1.11

(ハッチ部はRC試験体を示す)

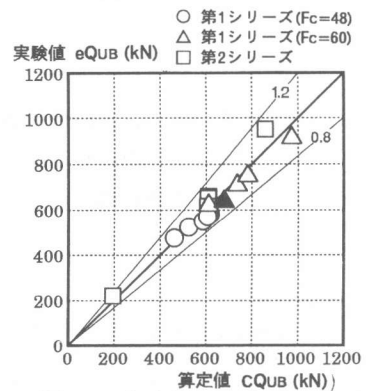


図-4 実験値と算定値の比較

$$\tau_{UB}^* = \frac{\eta_{max} - \eta}{\eta_{max} - 0.5} \times \max \tau_{UB}^* \quad (17)$$

軸方向力が引張力の場合、 η の最小値は次式で与えられる。

$$\eta_{min} = 2qt + \Sigma(q_{io} + 2q_{im}) \quad (18)$$

これより、 $0 < \eta \leq \eta_{min}$ における τ_{UB} は、次式のように得られる。

$$\tau_{UB}^* = \frac{1}{\lambda} (qt + \gamma \Sigma q_{im}) (1 - \frac{\eta}{\eta_{min}}) \quad (19)$$

3.5 理論解と実験値の比較

(13)式によって得られた結果と実験値との関係を表-3ならびに図-4に示す。(13)式における摩擦係数 βc は0.1とした。なお、タイ作用およびアーチ作用によって導かれた諸式における係数 $\gamma = 0.5$ 、中間鉄筋

の断面積に関する低減係数0.4および $\xi = 0.8$ については、既往の実験結果⁽³⁾⁽⁴⁾によってその妥当性が検証されている。その結果、第1シリーズは0.94~1.03に、第2シリーズは1.01~1.13にそれぞれ分布しており、いずれも適切に評価されていることがわかる。第1シリーズの方が若干、過大に評価される傾向にあるが、これは加力形式の違いによる影響が生じているものと考えられる。

第1シリーズではタイ作用負担分が0.34~0.45に、第2シリーズでは軸力のない試験体を除き0.23~0.32にそれぞれ分布しており、軸力比の増大に伴ってアーチ作用負担分も上昇する傾向が認められる。またタイ作用負担分のうち、中間筋の負担分は第1シリーズで約25%、第2シリーズでは約10%程度であった。

また、(14)式から(19)式までの結果を用いて、 τ_{UB}^* と η の関係を描くと、図-5のように示される。第1シリーズ、第2シリーズのいずれの試験体も、適切に評価されている。

4. まとめ

高強度材料を用い、多段配筋されたPCa柱の曲げ終局強度を、圧縮ストラットによるモデル化を行い、実験結果と比較した結果、いずれの試験体も適切に評価できることが認められた。またアーチ作用による負担分は約55~75%で、軸力比の上昇に伴ってアーチ作用負担分も増大する傾向がみられた。

【参考文献】

- (1) 新藤健大，横谷栄次ほか：高強度鉄筋用モルタル充填式鉄筋継手を有する高層PCa柱の力学的挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.2, pp.1235-1240, 1996.7
- (2) 塩川真，笠松照親ほか：超高層RCプレキャストコンクリート工法の開発（その3.柱部材実験の概要）（その4.実験結果の検討），日本建築学会大会学術講演梗概集，C構造IV, pp.5-8, 1996.9
- (3) 横谷栄次，王勳ほか：高強度鉄筋用機械式継手を有するPCa部材の力学的挙動に関する研究，構造工学論文集，Vol.40B, pp.303-313, 1994.3
- (4) 張瑜中，横谷栄次ほか：多段配筋を持つRC部材の曲げ挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.2, 1997.6

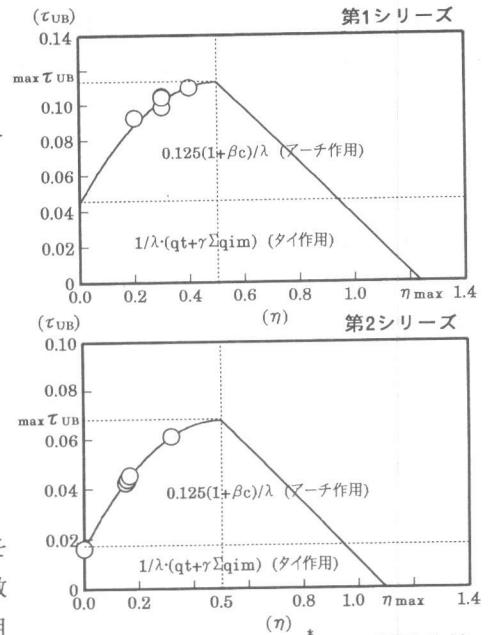


図-5 η に対する τ_{UB}^* の限界曲線