

## [2143] プレキャストコンクリート造基礎の構造性能に関する研究

石橋 一也<sup>\*1</sup> 横谷 栄次<sup>\*2</sup> 大西 昭徳<sup>\*3</sup> 鈴木 正雄<sup>\*4</sup>

## 1. はじめに

近年、木造建築物の基礎を従来のRC基礎から、構造及び施工性能の向上をはかり、合理的構・工法としてプレキャスト化して適用するシステムが注目されている。

本研究では、木造住宅用のPCA基礎構造システムに使用されている特殊機械式の鉄筋継手としての構造性能を調べるために、種々の試験方法による部材実験を行った。ここでは、本継手システムを用いたPCA基礎の曲げ実験に限定して述べる。また、上部構造の支持スパンが小さいため、PCA基礎はディープビームとなり、実験結果は、通常の部材に対する曲げ終局強度から解析した耐力より大きく発現する。したがって、PCA部材内において圧縮ストラットーアイ作用とアーチ作用をモデル化し、極限解析を行って、実験結果との比較検討を試みた。以下にその研究成果を報告する。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体

表1に試験体一覧を示す。試験体は総数5体で、図1にその形状および配筋を示す。接合部を有するPCA基礎の試験体はPCA基礎ユニット( $\ell = 1820\text{mm}$ )を上部及び下部に設置されたコネクタ(図2)にH型金具をはめ込み、PCA基礎ユニットを緊結した後、上部グラウト注入口よりコッターにグラウトを充填したものである。

## 2.2 載荷方法

図3にSR-2Q-2及びSR-3A-Qの加力装置図を示す。SR-2M-1とSR-3A-Mは、300(tf)万能試験機により一方向単調載荷と

表1 試験体一覧

実験記号	実験の種類	試験体記号	コッターの有無	備考
SR-2M	PCA基礎の曲げ実験	SR-2M-1 SR-2M-2	有 有	一方向単調載荷 正負交番繰返載荷
	PCA基礎の曲げせん断実験	SR-2Q-2	有	正負交番繰返載荷
SR-3A	混合部材を用いたPCA基礎の曲げ実験	SR-3A-M	有	一方向単調載荷
	混合部材を用いたPCA基礎の曲げ実験	SR-3A-Q	有	正負交番繰返載荷

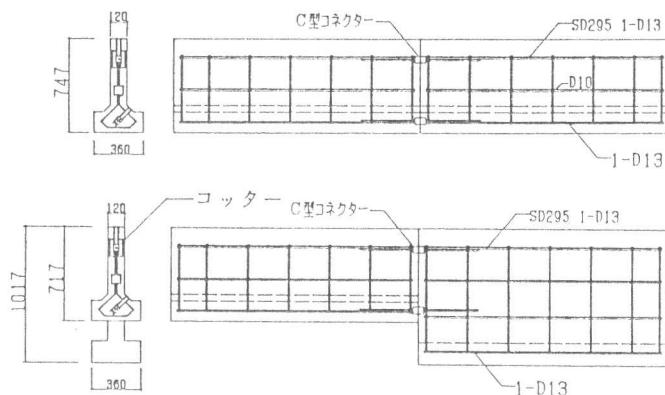


図1 試験体形状図

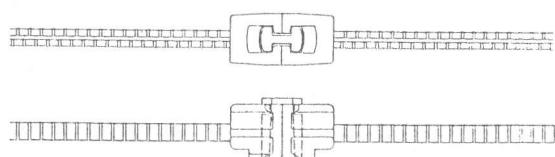


図2 コネクタ形状

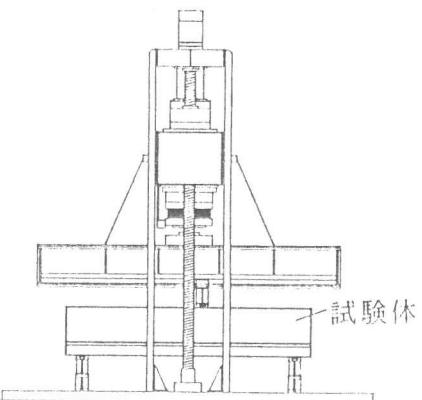


図3 加力装置図

\*1 最高裁判所官嘱科(正会員) \*2 関東学院大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)  
\*3 関東学院大学大学院(正会員) \*4 (株)住友林業生産管理部

し、支点間距離1075mm、載荷点距離1000mmにより載荷した。また、SR-2M-2とSR-3A-Mは、正負交番繰り返し載荷とした。表2に加力サイクルを示す。

### 2.3 材料強度

このPCa基礎の性能実験に先だって行われたコネクタの引張試験の結果とコンクリート及びグラウトの性能を表3及び表4に示す。なおコネクタの引張試験の破壊性状は、鉄筋のネジ部で破断せず母材破断を生じた。これは、ネジ部を従来の断面欠損タイプ<sup>(2)</sup>からふかしタイプとしたためと思われる。

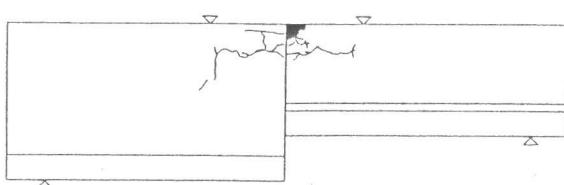


図4 龜裂図(SR-3A-M)

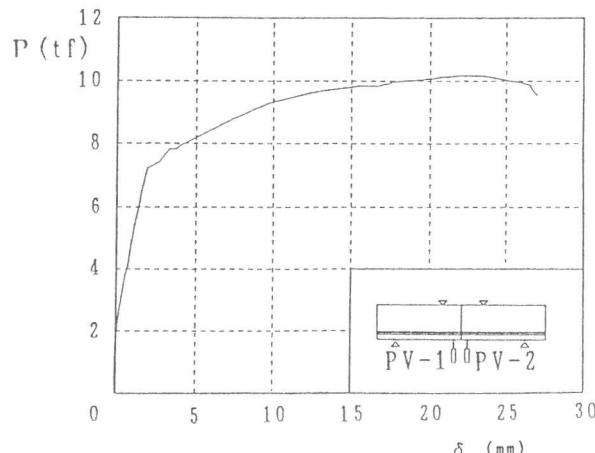


図5 荷重～たわみ曲線(SR-2M-1)

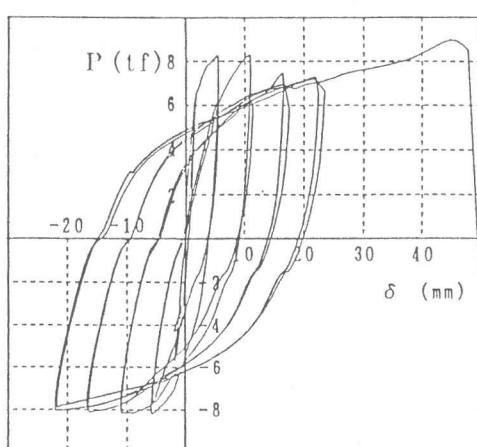


図6 荷重～たわみ曲線(SR-2M-2)

表2 加力サイクル

サイクル	1	2	3	4	5	6	7	8	9
部材角R ( $10^{-2}$ )	1.4	4.7	4.7	9.3	9.3	14.0	14.0	18.6	18.6
たわみ(mm)	1.5	5.0	5.0	10.0	10.0	15.0	15.0	20.0	20.0

表3 材料性状

試験体名	降伏点強度 $\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	破断強度 $\sigma_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	破壊形状
No. 1	3709	5588	アンカー筋破断
No. 2	3314	5580	アンカー筋破断
No. 3	4183	5580	アンカー筋破断
平均	3735	5582	

表4 圧縮強度

試験体名	コンクリート 設計基準強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^5$ kgf/cm <sup>2</sup> )	グラウト 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
SR-2M-1		217	2.16	340
SR-2M-2	240	205	2.06	499
SR-2Q-2		239	2.25	511
SR-3A-M		212	2.08	355
SR-3A-Q	300	201	1.99	370

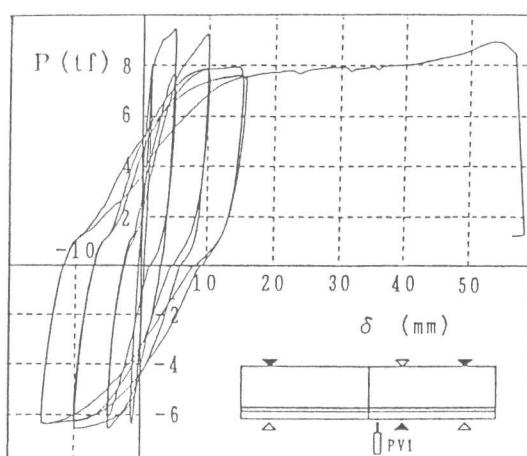


図7 荷重～たわみ曲線(SR-2Q-2)

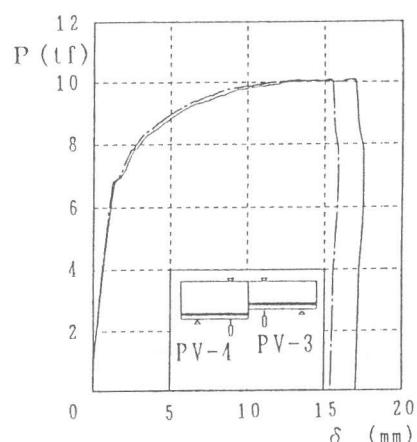


図8 荷重～たわみ曲線(SR-3A-M)

### 3. 実験結果

#### 3.1 ひび割れ及び破壊性状

ひび割れは、図4に示すように通常の部材の曲げひび割れのように、引張縁から材軸に垂直方向に発生せず、中立軸近傍において(純曲げ載荷では荷重間、曲げせん断載荷では、荷重点近傍)中立軸に沿って進展する。これは、引張側鉄筋の伸び変形が接合部に集中し、接合部の目開きが増大するためと思われる。この目開き変形の増大によって言い換えれば鉄筋の引張力に等しい水平力によってコンクリート部材が中立軸近傍で拘束された片持ち部材としての曲げモーメントを受けるため、中立軸に沿ってひび割れが発生したものと考えられる。

#### 3.2 荷重～たわみ曲線

図5～図9に全試験体の荷重～たわみ曲線を示す。

これより、最終破壊は、SR-2M-1, SR-2M-2, SR-2Q-2は下部主筋の母材破断で終局に至った。また、SR-3A-Mは、上部コンクリートの圧壊で終局に達し、SR-3A-Qは下部定着筋の引き抜けにより終局に至った。そのときの変形は、SR-2M-2で概ね47mmであった。これは、部材角 $R = 34.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$  ( $R = 1/29$ )に相当し、平成3年度に行なわれた同様の実験(参考文献(2))に比べ著しい靭性の向上がみられた。接合部における抵抗モーメントとしては、曲げ実験から得られた荷重10.23(tf)に対する最大値として $M_R = 5.50(\text{tfm})$ を採用することができる。また、引張主筋降伏時のモーメント $M_y$ は2.57(tfm)である。これより、抵抗モーメントの最大値 $M_R$ は、降伏モーメントの2.14倍となる。これは、基礎ばかりの中に生ずるアーチ作用によって、曲げ耐力が増大したものと考えられる。なお、SR-3A-Mの荷重～たわみ曲線において実線がピストンゲージPV-3を、一点鎖線がPV-4を示している。

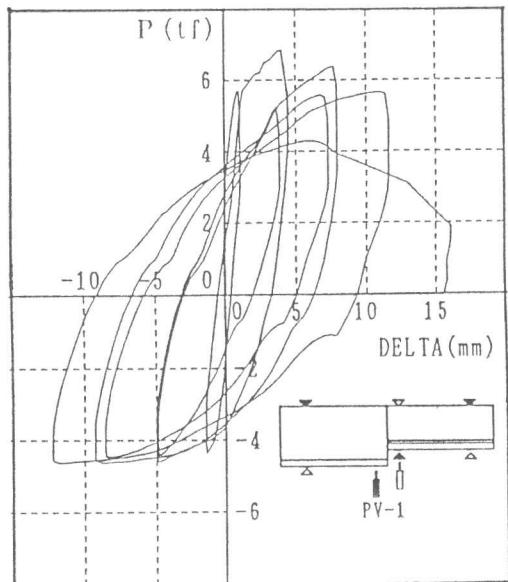


図9 荷重～たわみ曲線(SR-3A-Q)

### 4. ストラット-タイ作用とアーチ作用を考慮した基礎ばかりの曲げ終局強度

#### 4-1 基礎ばかりの曲げ終局強度(純曲げの場合)

##### (1). ディープビームのモデル化

ディープビームにおける曲げ終局強度は、通常のはりの曲げ終局強度より大きく発現する。これは、部材内にアーチ作用が生じ、これが曲げ耐力の増加に寄与するからである。本研究では、圧縮ストラットによるストラット-タイ作用とアーチ作用のモデル化を行い、曲げ耐力の解析を行った。<sup>(1)</sup>

##### (a). ストラット-タイ作用による曲げ抵抗

図10-aに示されているように、載荷点から角度 $\phi$ をもつ圧縮ストラットABCDにおいて作用する垂直応力 $\sigma_t$ およびせん断応力 $\tau_t$ と荷重直下の垂直断面における垂直応力 $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ およびせん断応力 $\tau_{xy}$ の関係は、次式で与えられる。

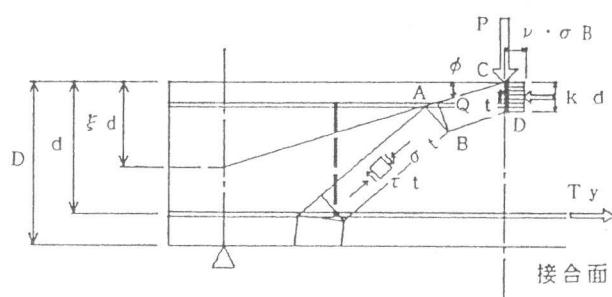


図10-a ストラット-タイ作用のモデル化

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

(1)式において、

$$\sin \phi = \tan \phi / \sqrt{1 + \tan^2 \phi}, \quad \cos \phi = 1 / \sqrt{1 + \tan^2 \phi}$$

の関係を用い、 $\tau_{xy} = Q_t / b \cdot k d$ ,  $\sigma_y = \nu \sigma_B$ ,  $\tau_t = 0$ とおくと、(1)式から次式が導かれる。

$$Q_t / kbd = \nu \sigma_B \cdot \tan \phi \quad (2)$$

圧縮合力と引張合力に関する釣合式は、 $C_c = T_y$ より、次式によって表される。

$$\nu \sigma_B \cdot kbd = a t \cdot \sigma_y \quad (3)$$

ここで、 $a t$ ,  $\sigma_y$ はそれぞれ鉄筋の断面積および降伏点強度、 $b$ ,  $d$ はそれぞれ、部材の幅およびせい、 $\sigma_B$ はコンクリート圧縮強度を示す。(2)式及び(3)と $\tan \phi = \xi d / a = \xi / \lambda$  ( $a / d$ :シアスパン比)を用いると、ストラット-タイ作用による曲げ抵抗 $Q_t$ は次式のように書き表される。

$$Q_t = a t \cdot \sigma_y \cdot \xi / \lambda \quad (4)$$

### (b) アーチ作用による曲げ抵抗

図10-bに示されているように、荷重直下の垂直断面では、鉄筋が降伏したとき( $T_y = a t \cdot \sigma_y$ )の圧縮コンクリートブロックには、 $\nu \sigma_B$ の応力が作用するが、コンクリートの圧壊時の応力 $\beta \sigma_B$ より小さい。この圧縮応力度 $(\beta - \nu) \sigma_B$ が荷重直下から支点にかけて、圧縮ストラットとなり、アーチ作用を生ずる。この圧縮ストラットには、垂直応力 $\sigma_a$ 、せん断応力 $\tau_a$ が作用する。これらの応力と荷重直下の垂直断面に生じる垂直応力 $\sigma_y$ およびせん断応力 $\tau_{xy}$ の関係は(1)式において、 $\phi$ を $\theta$ または、 $\sigma_t$ を $\sigma_a$ に換えることによって得られる。これらの諸式に、 $\sigma_y = 0$ ,  $\sigma_x = (\beta - \nu) \sigma_B$ ,  $\tau_{xy} = Q_a / kbd$ ,  $\tan \theta = (1 - k)d / a$ を代入すると、次式が導かれる。

$$(\beta - \nu) \sigma_B = \sigma_a, \quad Q_a / kbd = \sigma_a (1 - k) d / 2a \quad (5)$$

(5)式より、アーチ作用による曲げ抵抗は、次式で与えられる。

$$Q_a = (\beta - \nu) \sigma_B \cdot k (1 - k) bd^2 / 2a \quad (6)$$

(6)式において、 $k$ に関する極値を求めるとき、曲げ抵抗に対する極限解析の下界の定理を満足する。これより、アーチ作用によるせん断抵抗の下界式として次式を得る。

$$Q_a = (\beta - \nu) \sigma_B \cdot bd / 8\lambda \quad (7)$$

以上の結果を用いると、曲げ終局強度は(4)式と(7)式の曲げ抵抗を累加して、次式のように書き

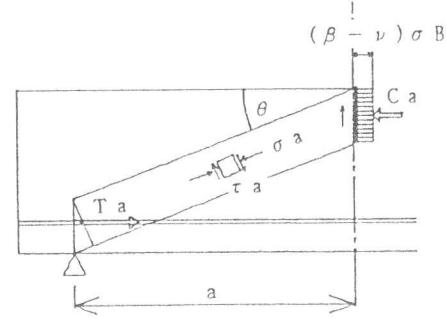


図10-b アーチ作用のモデル化

表される。

$$Q_{um} = Q_t + Q_a = \frac{2}{\lambda} (\xi \cdot a_t \cdot \sigma_y + (\beta - \nu) \sigma_B b \cdot d / 8) \quad (8)$$

ここで、 $\xi = 0.9$ 、 $\beta = 0.85$ 、 $\nu = 0.7$ と仮定する。

アーチ作用を形成するとき、圧縮力  $C_a$  は、タイの引張力  $T_a$  以下でなければならない。したがって、この条件から、 $\nu \leq 2P_t \cdot \sigma_y / \sigma_B$  の関係が得られる。 $(P_t = a_t / bd)$

#### 4-2. 基礎ばりの曲げ終局強度(曲げせん断載荷の場合)

曲げせん断を受けた場合、図11に示すように、荷重と支点の間にストラットータイ作用とアーチ作用が生ずる。このストラットータイ作用とアーチ作用による支点へのせん断伝達は、荷重と支点間の距離が左右異なるのでシアスパン比の差違による違いが生じる。

純曲げ載荷の場合と同様に、せん断伝達能力を解析すると、以下のように導かれる。

##### (a). ストラットータイ作用

$$Q_{t1} = \xi a_t \cdot \sigma_y / \lambda_1$$

$$Q_{t2} = \xi a_t \cdot \sigma_y / \lambda_2$$

ここで、 $\lambda_1 = a_1 / d$ 、 $\lambda_2 = a_2 / d$

##### (b). アーチ作用

$$Q_{a1} = (\beta - \nu) \sigma_B b d / 8 \lambda_1 \quad (10)$$

$$Q_{a2} = (\beta - \nu) \sigma_B b d / 8 \lambda_2$$

これより、曲げ終局強度は、(9)式と(10)式の累加として、次式のように得られる。

$$\begin{aligned} Q_{um} &= (Q_{t1} + Q_{t2}) + (Q_{a1} + Q_{a2}) \\ &= (\xi a_t \cdot \sigma_y + (\beta - \nu) \sigma_B b \cdot d / 8) \\ &\quad (1/\lambda_1 + 1/\lambda_2) \end{aligned} \quad \dots \dots (11)$$

ここで、 $\xi = 0.9$ 、 $\beta = 0.85$ 、 $\nu = 0.7$ と仮定する。

#### 4-3. 混合部材の曲げ終局強度

梁のせいが異なる2個の部材が接合され、曲げせん断載荷を受ける場合、図12に示すようにシアスパン比の違いによって、ストラットータイ作用とアーチ作用に差違が生ずる。両作用によるせん断伝達式は、以下のように解析される。

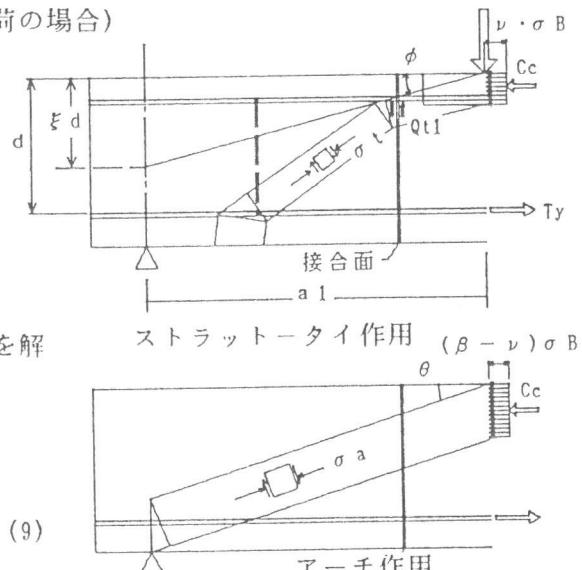


図11 ストラットータイ作用と  
アーチ作用のモデル化

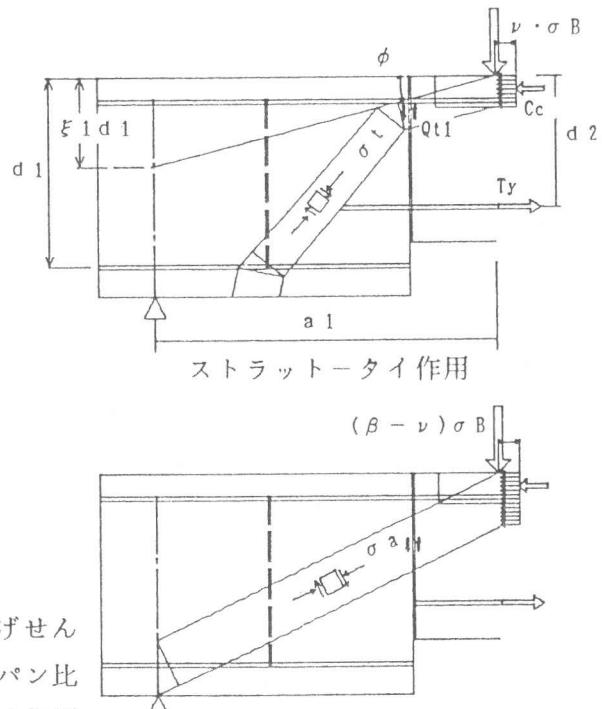


図12 ストラットータイ作用と  
アーチ作用のモデル化

(a). ストラット-タイ作用

$$Q_{t1} = \xi_1 a t \cdot \sigma_y / \lambda_1, \quad Q_{t2} = \xi_2 a t \cdot \sigma_y / \lambda_2 \quad (12)$$

(b). アーチ作用

$$Q_{a1} = (\beta - \nu) \sigma_B \cdot b \cdot d_1 / 8 \lambda_1, \quad Q_{a2} = (\beta - \nu) \sigma_B \cdot b \cdot d_2 / 8 \lambda_2 \quad (13)$$

$$\text{ここで、} \lambda_1 = a_1 / d_1, \lambda_2 = a_2 / d_2$$

これより、混合部材の曲げ耐力は、(12), (13)式の累加として、次式が導かれる。

$$\begin{aligned} Q_{um} &= (Q_{t1} + Q_{t2}) + (Q_{a1} + Q_{a2}) \\ &= a t \cdot \sigma_y (\xi_1 / \lambda_1 + \xi_2 / \lambda_2) \\ &\quad + \{(\beta - \nu) \sigma_B \cdot b / 8\} (d_1 / \lambda_1 + d_2 / \lambda_2) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{ここで、} \xi_1 = 0.6, \xi_2 = 0.9, \beta = 0.85, \nu = 0.7$$

## 5. 基礎ばかりの曲げ終局強度と実験結果との比較

表6に実験結果及び既往算定式とストラット-タイ作用とアーチ作用を考慮した基礎ばかりの曲げ終局強度との比較を示す。これより、ストラット-タイ作用とアーチ作用を考慮した曲げ終局強度と実験値は良い対応を示していることがわかる。

表5 諸耐力算定値と実験値との比較

試験体名	実験値 (tf)	終局強度 略算式(1) (tf)	実験値 理論値	ストラット-タイ作用と アーチ作用を 考慮した終局強度			実験値 理論値
				ストラット- タイ効果 (%)	アーチ効果 (%)	理論値 (tf)	
SR-2M-1	10.23	5.538	1.85	57.92	42.08	8.915	1.15
SR-2M-2	8.96	5.538	1.62	57.92	42.08	8.915	1.01
SR-2Q-2	7.00	6.344	1.10	57.92	42.08	6.185	1.13
SR-3A-M	10.09	5.282	1.91	50.89	49.11	9.914	1.02
SR-3A-Q	6.86	6.051	1.13	52.27	47.73	6.715	1.02

$$(1) \cdots \cdots Q_{um} = 0.9 \cdot a t \cdot \sigma_y \cdot d / \lambda_i$$

## 6. まとめ

- (1). 定着筋はネジ部で破断せず、母材破断を生じる。
- (2). ひび割れは、通常の曲げひび割れのように発生せず、中立軸に沿って発現する。
- (3). 最大荷重時のたわみは概ね47mmで、部材角Rとしては、 $34.1 \times 10^{-3}$ radが得られ、前回の実験に比べ著しい韌性の向上が見られた
- (4). ディープビームにおける曲げ終局強度は、通常のはりの曲げ終局強度より大きく発現し、ストラット-タイ作用とアーチ作用を考慮した曲げ終局強度は実験値と良い対応を示す。

## 【参考文献】

- (1). P. Marti : Basic tools of Reinforced Concrete Beam Design, ACI Journal, January - February, PP46~56, 1985
- (2). 横谷 栄次, 入澤 郁雄, 西岡 幸一, 鈴木 正雄 : プレキャスト鉄筋コンクリート造基礎の力学的挙動に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP797-798, 1991