

# 論文 多段配筋を持つ RC 部材の曲げ挙動に関する基礎的研究

張 瑜中<sup>\*1</sup> 槙谷 栄次<sup>\*2</sup> 新藤 健太<sup>\*1</sup> 小松 豊<sup>\*3</sup>

**要旨**：既往のRC部材の曲げ終局強度に関する研究において、主筋間に配される中間筋の効果を論じたものは極めて少ない。本研究は、梁及び柱タイプのRC部材における中間筋の効果を調べるために、曲げ破壊実験を行い、中間筋の降伏挙動が明らかにされた。また、得られた実験結果と圧縮ストラットモデルから導かれた理論式を用いて、解析された結果を比較検討し、両者が良く一致することが示された。

**キーワード**：中間筋、梁タイプ、柱タイプ、圧縮ストラット、曲げ終局強度

## 1.はじめに

鉄筋コンクリート部材において、ウォールガーターのような梁材では、引張鉄筋を数段にわたりて配筋することも受けられる。また、柱材の場合、断面の直交2方向に対して、配筋補強がなされるので、中間筋の本数も増加し、多段配筋を形成する。柱材の設計では、一般に中間筋の引張効果は考慮されないが、終局状態では、引張効果を考慮しないと、曲げ終局強度は、実験結果に対して過小に評価された結果になる。中間筋によって、曲げ終局強度が増加すると、せん断力も増加し、せん断設計において、安全な評価が行われない場合も考えられる。

本論文では、鉄筋コンクリート部材の中間筋が曲げ挙動に与える影響を調べるために、梁材と柱材を対象として中間筋の位置と本数を変化させた曲げ破壊実験を行った。

また、実験結果に対して、圧縮ストラットモデルによって導かれた曲げ終局との比較検討を行った。以下のその研究成果について報告する。

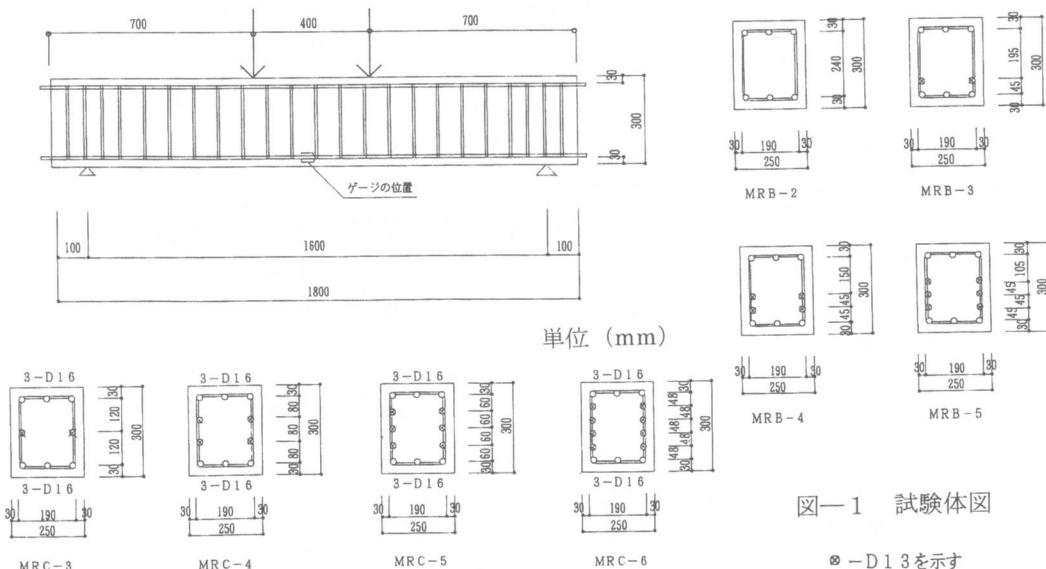


図-1 試験体図

\*1 関東学院大学大学院工学研究科建築専攻 工修（正会員）

\*2 関東学院工学部建築学科 教授、工博（正会員）

\*3 関東学院大学大学院工学研究科建築学専攻（正会員）

## 2. 実験概要

### 2. 1 試験体概要

試験体は、図-1に示すように、幅×高さ=250×300mmの断面を持つ上、下端に3-D16の主筋を配した。上下の主筋間にに対して、梁タイプでは、中間筋2-D13を引張領域に1～3段、柱タイプでは、対称に1～4段を等間隔に配した。試験体はそれぞれ梁、柱タイプ4体づつ合計8体を製作した。使用鉄筋は、D16及びD13がSD345、横補強筋のD13@75がSD795の鋼材を使用し、 $p_w = 1.25\%$ となった。また、コンクリートの圧縮強度は400kgf/cm<sup>2</sup>を目標とした。

### 2. 2 加力方法及び実験方法

加力は、300tf大型構造物試験機を用い、2点集中載荷を行い、シアスパン比は2とした。梁タイプは単調載荷とし、柱タイプは、シアスパン部において、部材角が1/300、1/200、1/100、1/50で1サイクルづつ正負交番繰り返し載荷を与えた。

実験方法は、主筋及び中間筋にひずみゲージを貼り、ひずみを測定すると共に、部材の鉛直変位は高感度変位計によって測定した。

表-1 各種荷重及び破壊モード一覧

試験体名	ひびわれ荷重(tf)	降伏荷重(tf)	終局強度(tf)	破壊モード
MRB-2	2.0	16.1	28.48	F
MRB-3	2.7	24.8	36.22	F→C
MRB-4	1.4	23.7	36.73	F→C
MRB-5	1.9	24.1	40.16	F→C
MRC-3	6.5	20.9	32.01	F→C
MRC-4	6.9	28.1	35.48	F→C
MRC-5	5.7	27.6	39.96	F→C
MRC-6	5.6	26.0	41.31	F→C

F→曲げ引張破壊 C→曲げ圧縮破壊

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1 使用材料の強度

使用した鉄筋の降伏点強度は、D16（主筋）、D13（中間筋）がそれぞれ4840kgf/cm<sup>2</sup>、3990kgf/cm<sup>2</sup>で、横補強筋D13は8370kgf/cm<sup>2</sup>であった。また、コンクリートの圧縮強度は450kgf/cm<sup>2</sup>であった。

#### 3. 2 ひび割れ及び破壊状況

曲げ初期ひび割れは、表-1に示されているように、梁タイプが1.4～2.7tfの荷重で発生し、柱タイプが5.6～6.9tfの荷重で発生した。両者とも中間筋が増えると、若干ひび割れ荷重は減少する傾向が見られる。尚、表中の荷重は載荷荷重を示している。

最終破壊は、中間筋のない梁材のみが鉄筋の降伏後、耐力の低下を示さず、純曲げ領域において終局強度に至る曲げ引張破壊を生じた。その他の梁及び柱タイプの試験体はすべて主筋及び中間筋が降伏した後、コンクリートの圧縮破壊を生じ、曲げ圧縮破壊になった。

荷重 (tf)

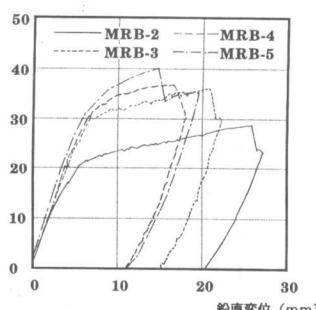


図-2 梁荷重一変位図

荷重 (tf)

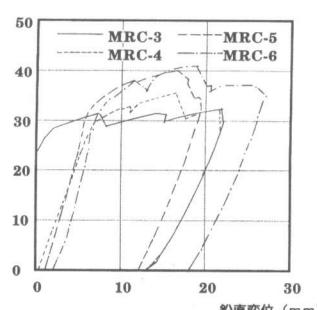


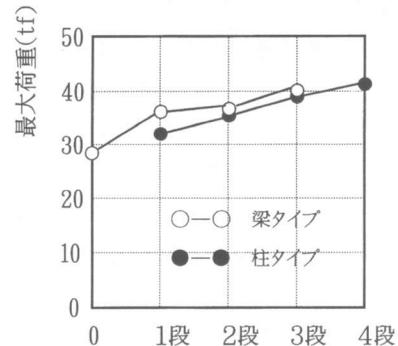
図-3 柱荷重一変位図

### 3. 3 荷重一変位曲線

荷重と荷重直下の鉛直方向変位の関係を梁タイプ及び柱タイプの正側の包絡線をそれぞれまとめて図-2 と図-3 に描いた。梁タイプでは、MRB-2 のみが鉛直変位が 26 mm で最大荷重に達したのに対して中間筋のある試験体は、すべて 15~20 mm 近傍で最大荷重に達している。また柱タイプでは、中間筋の本数に関係なく、20 mm 近傍で最大荷重に達し、梁タイプに比して韌性に優れた挙動が見られる。これは、圧縮領域の中間筋の効果を示している。

### 3. 4 ひび割れ、降伏及び最大荷重

今回の曲げ破壊実験から得られたひび割れ、降伏及び最大荷重を表-1 に示した。また、最大荷重と中間筋の段数の関係を図-4 に示した。これより、梁タイプの場合、中間筋が 1 段配されると、急激な荷重の増加が見られるが、中間筋が 2 段から 3 段に増えても荷重は余り増加しないことが見られる。また、柱タイプでは、中間筋が増えると共に、荷重は比例的に増加していることが認められる。



### 3. 5 引張主筋及び中間筋の降伏状況

図-4 最大荷重と中間筋の段数の関係

引張主筋と中間筋の降伏状況を図-5 に示す。これより、梁タイプでは、引張主筋が降伏後、すべての中間筋は下部から上部に向かって順次降伏する状況が見られる。また、柱タイプの場合引張鉄筋が降伏後、中間筋が 2 段まではすべて降伏するが、最終破壊に至るまでに、3、4 段の中間筋が配された場合は、それぞれ 2 段及び 3 段まで降伏することが認められた。

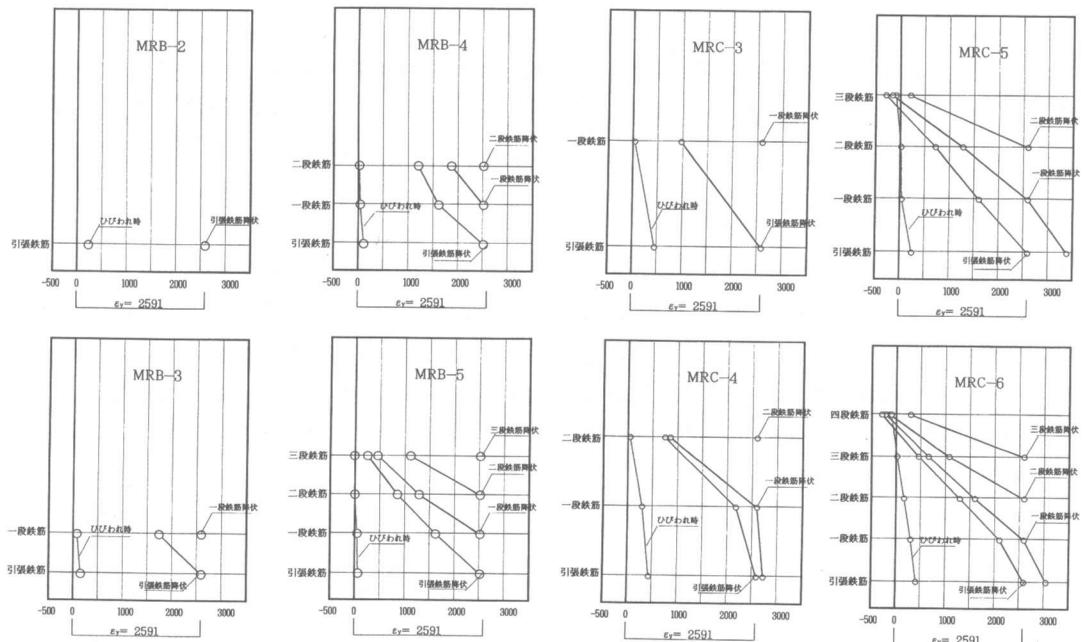


図-5 引張主筋及び中間筋の降伏状況図

### 4. 圧縮ストラットによる曲げ抵抗機構

多段配筋された RC 部材が四点曲げを受ける場合、両端の曲げせん断領域と中央部の純曲げ領

域の三つのブロックに分けられる。この曲げせん断ブロックでは、集中荷重作用点直下の圧縮領域から部材成近傍の下端筋に向かって引張鉄筋と釣り合う圧縮ストラットが形成される。これをタイ作用と呼ぶ。また、荷重直下の圧縮領域から支点に向かって引張鉄筋をタイとする圧縮ストラットが形成される、これをアーチ作用と呼ぶ。前者の圧縮ストラットは、引張鉄筋に対応する抵抗機構を示し、後者の圧縮ストラットはコンクリートの圧縮抵抗機構を示す。この二つの圧縮ストラットによる曲げ抵抗機構について以下に述べる。

#### 4. 1 タイ作用による曲げ抵抗

多段配筋された曲げせん断ブロックにおいて、圧縮ストラットは上部の荷重直下の圧縮領域から主応力に対応して形成される。中立軸と $\phi$ の傾斜をもつ上部の圧縮ストラットでは図一6に示されているように圧縮応力 $\sigma_t$ とせん断応力 $\tau_t$ が作用する。また、純曲げ領域の中央ブロックでは、上縁から $kD$ の高さの圧縮領域で、一様な圧縮応力が作用していると仮定する。

ストラットに作用している圧縮応力 $\sigma_t$ 、せん断応力 $\tau_t$ の応力場と中央ブロックの圧縮領域に作用する垂直応力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 及びせん断応力 $\tau_{xy}$ の応力場の間には、次の関係が成立つ。

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

上式の第1式及び第3式において $\tau_{xy} = Q_t / b \cdot k \cdot D$ 、 $\sigma_x = \beta_t \cdot \sigma_B$ 、 $\tau_t = 0$ とおき、 $\sin \phi = \tan \phi / \sqrt{1 + \tan^2 \phi}$ 、 $\cos \phi = 1 / \sqrt{1 + \tan^2 \phi}$ の関係を用いると、次式が導かれる

$$Q_t / k \cdot b \cdot D = \beta_t \cdot \sigma_B \cdot \tan \phi \quad (2)$$

この時、引張領域において、主筋が降伏し、主筋と断面の中央部の間に均等に配筋された中間筋も降伏していると仮定すると、引張合力と圧縮合力の釣り合い式  $C = T = T_t + \sum_{m=0} \gamma \cdot T_{im}$  において、 $T_t = a_t \cdot \sigma_y$ 、 $T_{im} = a_{im} \cdot \sigma_{iy}$ 、 $C = \beta_t \cdot \sigma_B \cdot k \cdot b \cdot D$  を代入すると次式が得られる

$$\beta_t \cdot \sigma_B \cdot k \cdot b \cdot D = a_t \cdot \sigma_y + \sum_{m=0} \gamma \cdot a_{im} \cdot \sigma_{iy} \quad (3)$$

ここで、 $a_t$ 、 $a_{im}$ 及び $\sigma_y$ 、 $\sigma_{iy}$ は、それぞれ主筋及び中間筋の断面積及び降伏点強度を示す。また、中間筋に関しては引張域に存在する鉄筋の内、断面中央部から、主筋の間に含まれた鉄筋のみを降伏鉄筋として考慮する。係数 $\gamma$ は、中間筋の位置に最も依存するが断面中央部から中立軸に存在する中間筋の引張効果を考慮しない仮定に対する補正の働きもする。式(3)を式(2)に代入し、 $\tan \phi = \xi \cdot d/a = \xi/\lambda_d$ の関係を用いると、タイ作用による曲げ抵抗 $Q_t$ は次のように書き表わされる

$$Q_t = \mu_t (a_t \cdot \sigma_y + \sum_{m=0} \gamma \cdot a_{im} \cdot \sigma_{iy}) \quad (4)$$

ここで、 $\lambda_d = a/D$ でシアスパン比、 $\mu_t = \xi/\lambda_d$ を表わし、 $\xi$ は、圧縮ストラットの傾きに関する係数である。

#### 4. 2 アーチ作用による曲げ抵抗

R C 部材における塑性ヒンジ部では、コンクリート強度が著しく大きくなったり、また引張鉄筋が少ないと、圧縮領域において、圧縮強度 $C_c$ が引張鉄筋の合力 $T$ より大きくなり、 $\Delta C = C_c - T$ のコンクリート圧縮力の増分が曲げせん断ブロック内で、アーチ作用を形成し、曲

げ抵抗の向上に寄与する。

いま、図に示されているように、中立軸と  $\theta$  の傾きを持つ圧縮ストラットに作用する応力を  $\sigma_a$ 、 $\tau_a$  とし、中央ブロックの圧縮領域に作用する鉛直応力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  及びせん断応力  $\tau_{xy}$  との関係について式(1)を用いる。ここでは、 $\sigma_x = \beta_c \cdot \sigma_B$ 、 $\sigma_y = 0$ 、 $\tau_{xy} = Q_a / k \cdot b \cdot D$ 、 $\tan\theta = D(1-k)/a$  の諸式を式(1)に代入すると、次式が導かれる

$$Q_a = \frac{1}{2} \beta_c \cdot \sigma_B \cdot b \cdot D \cdot k(1-k) \cdot \frac{D}{a} \quad (5-a)$$

上式の上界値は、 $k = 1/2$  のとき得られるので、アーチ作用による曲げ抵抗としては、次式を適用する

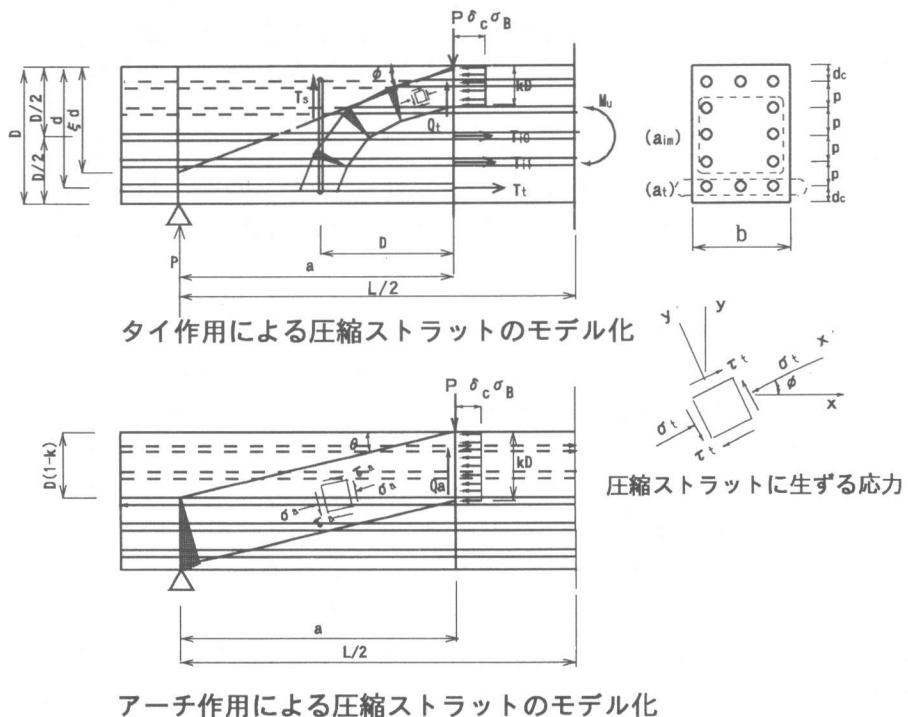
$$Q_a = \frac{1}{8\lambda} \beta_c \cdot \sigma_B \cdot b \cdot D \quad (5-b)$$

ここで、 $\lambda_D = a/D$  はシアスパン比、また  $\beta_c$  は、圧縮応力に対する有効係数であるが、引張鉄筋比、鉄筋の降伏強度、コンクリートの圧縮強度、中間筋の段数に依存し、実験結果から求める。

#### 4. 3 全曲げ抵抗

多段配筋されたRC部材の全曲げ抵抗  $Q_u$  は、それぞれタイ作用及びアーチ作用による曲げ抵抗  $Q_t$  及び  $Q_a$  を累加することによって与えられる。したがって、式(4)と式(5-b)から、 $Q_u$  は、次式のように書き表される

$$Q_u = \mu_t (a_t \cdot \sigma_y + \sum \gamma \cdot a_{im} \cdot \sigma_{iy}) + \frac{1}{8\lambda} \cdot \beta_c \cdot \sigma_B \cdot b \cdot D \quad (6)$$



アーチ作用による圧縮ストラットのモデル化

図-6 多段配筋部材における圧縮ストラットのモデル化

$\gamma$  は、中間筋の位置に関する係数を示し、壁や壁柱に対する曲げ終局強度評価式では、通常 0.5 の値が適用される。 $\xi$  は、RC部材の曲げ終局強度式における主筋の引張抵抗係数 0.8 を準用する。 $\beta_c$  は梁タイプ及び柱タイプごとに、実験結果から得られた平均値を採用する。これらの

諸係数を用いた計算値は、実験結果に対して、概ね良い対応を示しているので、ここでは、引張降伏モードに対しては、 $\gamma = 0.5$ を採用し、また、中間筋の有効係数を  $0.4 n$  ( $n$ は、中間筋の本数) と仮定する。

## 5. 実験結果に対する理論の検証

得られた梁及び柱タイプの最大荷重に対して、式(6)を用いて計算された終局曲げ強度の値を表-2に示した。ここで、MRB-4及びMRB-5の中間筋は、断面中央部の近傍に配置されているために、曲げ抵抗に対する寄与率が低いので、 $\gamma = 0.5$ としたが、MRB-3の場合、中間筋が主筋に最も近く配置されているために、曲げ抵抗に対する寄与率が高くなるので、 $\gamma = 0.85$ と仮定した。これより、実験値と計算値は大変良い一致が見られる。また、タイ作用については、梁タイプが13%～19%、柱タイプが22%～26%の発現を示し、柱タイプの方が梁タイプより大きく評価されている。また、タイ作用における中間筋の効果は、梁タイプの方が柱タイプより大きく現れていることがわかる。

表-2 実験値と計算値の比較

実験体名	$\gamma$	$\beta_c$	タイ作用 $Q_t$ (tf)			アーチ作用 $Q_a(t)$	計算値 $Q_u(t)$	実験値 $Q_E(t)$	実験値/計算値
			主筋	中間筋	合計				
MRB-2	0	0.125	11.55	0	11.55	2.64	14.185	14.240	1.004
MRB-3	0.85	0.125	11.55	3.44	14.99	2.64	17.627	18.110	1.027
MRB-4	0.5	0.125	11.55	4.05	15.60	2.64	18.235	18.365	1.007
MRB-5	0.5	0.125	11.55	6.07	17.62	2.64	20.260	20.080	0.991
MRC-3	0.5	0.190	11.55	0.81	12.36	4.22	16.577	16.005	0.965
MRC-4	0.5	0.190	11.55	1.62	13.17	4.22	17.387	17.740	1.020
MRC-5	0.5	0.190	11.55	2.43	13.98	4.22	18.197	19.980	1.098
MRC-6	0.5	0.190	11.55	3.24	14.79	4.22	19.007	20.655	1.087

## 6.まとめ

本研究において、以下の事柄が示唆される

- ① 梁タイプ、柱タイプにおいて、断面中心以下の鉄筋はすべて降伏した。
- ② 中間鉄筋の位置は、曲げ抵抗に大きな影響を与える。
- ③ 梁タイプについて、中間鉄筋がすべて降伏した。柱タイプについては、中間筋が少ない場合（2段以下）、中間鉄筋はすべて降伏した。また、中間鉄筋が多い場合（3段以上），上部2段以外の引張領域にある中間鉄筋はすべて降伏した。
- ④ 圧縮ストラット理論から求めたタイ作用とアーチ作用の負担分が終局曲げ強度計算値に対する割合は、梁タイプの場合、タイ作用について、計算値との割合が81.4%～87.0%、アーチ作用について、18.6%～13.0%の間にあり、柱タイプの場合は、タイ作用について、74.5%～77.8%、アーチ作用について、25.5%～22.2%の間にある。また、タイ作用における中間筋の効果は、梁タイプの方が柱タイプより大きく発現している。
- ⑤ 理論値は実験結果に対してよく対応している。

参考文献：

- (1) 横谷栄次、王まい、小曾根茂雄、謝爽、高強度鉄筋用機械式継手を有するP C a部材の力学的挙動に関する研究、構造工学論文集 V o l . 4 O B (1994年3月)