

# 論文 鋼材の抜出しを考慮した SRC 部材の降伏変形の評価に関する研究

上井 希祐\*1)

要旨：SRC(鉄骨鉄筋コンクリート)部材の変形を考える場合、曲げ変形、せん断変形の他に、材端定着部からの鋼材の抜出しによる付加変形が無視できないことは従来から指摘されており、降伏変形の評価においても同様である。本研究は、2体のSRC部材の曲げせん断実験において、材端部近傍を中心とした詳細な変形、及び鋼材ひずみの測定を行い、材端部からの鋼材の抜出しによる付加変形が、SRC部材の変形に及ぼす影響を定量的に把握したものである。更に、その結果に基づいてSRC部材の降伏変形の評価について検討を行った。

キーワード：SRC部材、降伏変形、鋼材の抜出し、付加変形

## 1. はじめに

SRC(鉄骨鉄筋コンクリート)造建物の耐震設計を行う上で、部材の荷重-変形関係モデルを確立することが重要である。そのためには、SRC部材の変形量の評価法を確立することが必要となる。ところで、SRC部材の変形量評価にあたっては、曲げ変形、せん断変形の他に、定着部内鋼材の抜出しによる付加変形を考慮する必要があることは従来から指摘されている<sup>1)</sup>。しかし、既往のSRC柱部材の曲げせん断実験においては、鋼材の歪に基づいた詳しい検討はなされておらず、不明確な点が多く残されている。

本研究では、定着部内、及び定着部近傍における鋼材の変形に着目したSRC柱供試体の曲げせん断実験結果に基づいて、全体変形に及ぼす定着部内鋼材の変形の影響量を把握し、最終的に、SRC部材の降伏変形量の評価法について検討することを目的とする。

## 2. 実験計画及び方法

供試体は、表 1 に示す A-C2、及び E-C の 2 体であり、鉄骨部分、及び RC 部分ともに曲げ降伏先行型となる様に設計した。パラメータは、鉄骨フランジ厚、同

ウェブ厚、主筋断面積、及び帯筋間隔である。供試体の寸法、及び詳細を図 1 に示す。また、供試体製作に用いた鋼材とコンクリートの力学的性質を表 2 1~2 に示す。

実験は図 2 に示す加力装置を用いて行い、累加降伏軸力の 20% の一定軸力を加えた後、図 3 に示すような交番水平変位を作用させた。次に、図 4-1 に示す ①~⑥ の変位計により全体変形を、図 4-2 に示す ⑦~⑩ の変位計により供試体各部の変位を測定した。さらに図 4-3 に示す ■ 印の位置において鋼材各部の軸方向歪を測定した。

表 1 供試体諸元

供試体名	鉄骨部分				RC部分				軸力 (t <sub>f</sub> )
	H (mm)	Bf (mm)	tw (mm)	tf (mm)	φ <sub>r</sub>	n (本)	φ <sub>h</sub>	x (mm)	
A-C2	150	90	9	16	D13	4	D10	150	45.7
E-C	150	90	6	6	D16	8	D10	75	47.4

注) H: 鉄骨背、Bf: フランジ幅、tw: ウェブ厚、tf: フランジ厚  
φ<sub>r</sub>: 主筋呼び径、n: 主筋本数、φ<sub>h</sub>: 帯筋呼び径、x: 帯筋間隔

\*1 新潟大学助手 工学部建設学科、工博(正会員)

表 2-1 鋼材の力学的性質

	$\sigma_y$ (tf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_B$ (tf/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{st}$ (%)	Est (tf/cm <sup>2</sup> )
PL6	3.06	4.73	1.96	30.9
PL9	2.61	4.01	1.86	33.3
PL16	2.50	4.12	1.68	38.0
D10	3.92	5.26	2.60	42.0
D13	3.71	5.26	2.20	40.0
D16	3.70	5.41	2.35	48.2

注)  $\sigma_y$ : 降伏点  $\epsilon_{st}$ : 歪硬化の始まり  
 $\sigma_B$ : 引張強さ Est: 歪硬化勾配

表-2 2 コンクリートの力学的性質

供試 体名	$F_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$F_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_c$ (tf/cm <sup>2</sup> )
A-C2	241	17.0	208
E-C	258	20.0	222

注)  $F_c$ : シリンダー圧縮強度  $F_t$ : 割裂強度  
 $E_c$ : コンクリートYoung係数

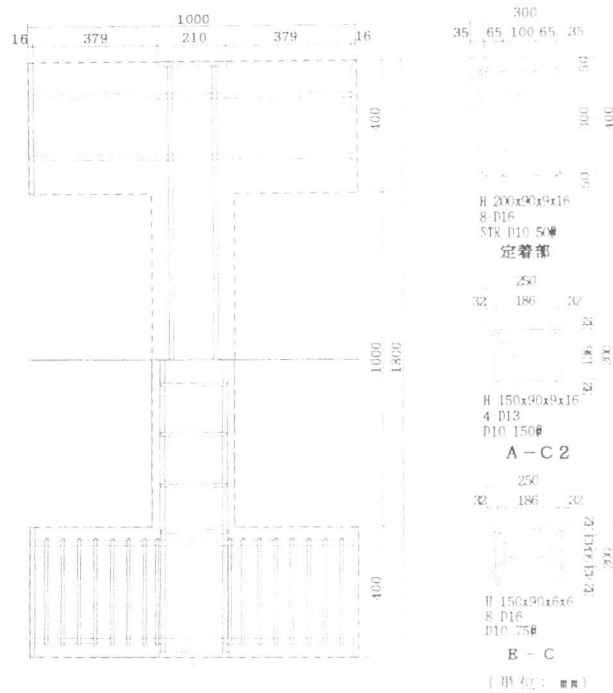


図 1 供試体

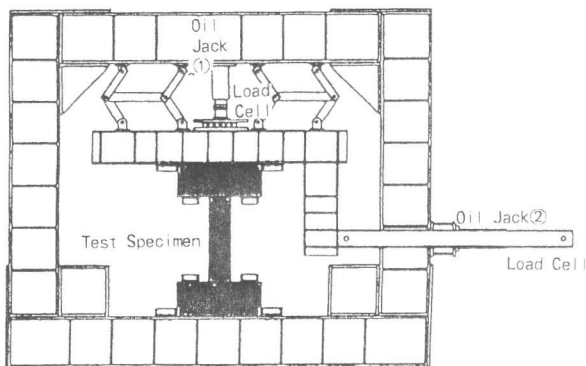


図 2 実験装置

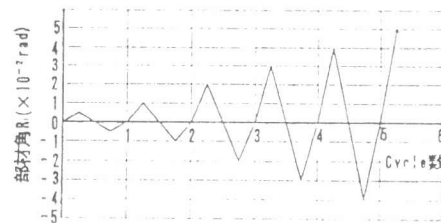


図 3 载荷プログラム

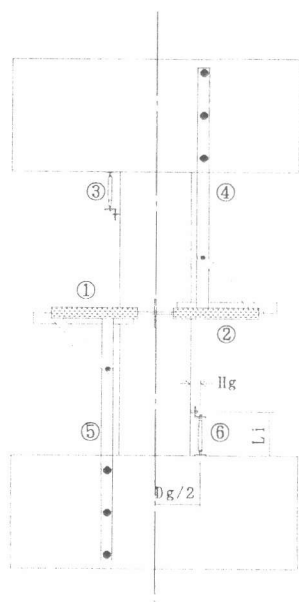


図 4 1 全体変形測定法

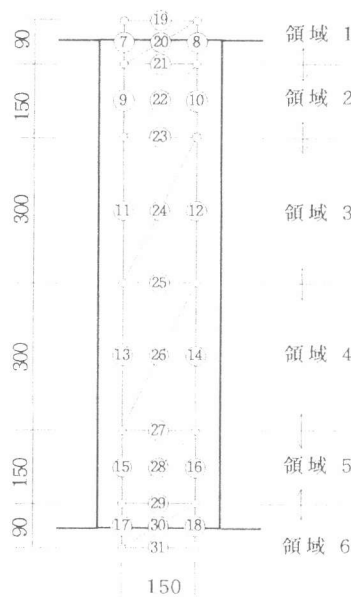


図 4 2 柱部変形測定法

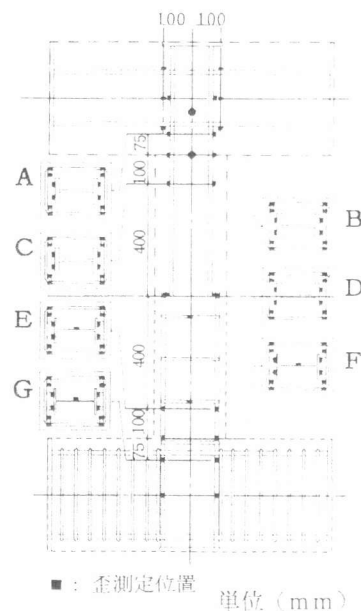


図 4 3 鋼材歪測定位置

### 3. 実験結果及び考察

#### 3. 1 破壊性状

図-5に、5Cycle終了時における柱部のひび割れ状況を示す。A-C2は曲げ降伏後においてせん断付着ひび割れも見られたが、材端部におけるコンクリートの圧壊が著しく、また主筋の座屈も見られ、最終的に曲げ破壊したものと考えられる。一方、E-Cは、鋼材の歪測定値から見て曲げ降伏したと考えられるが、3cycle以降において鉄骨フランジ、及び主筋に沿うせん断付着ひびわれが顕著となり、最終的にはせん断付着破壊したものと考えられる。

#### 3. 2 荷重-変形関係

図-6に、柱部に作用するせん断力  $Q$  と全体水平変形  $\Delta$  との関係を示す。履歴曲線は、A-C2では安定した紡錘形の性状を示し、E-Cでは若干逆S字形の性状を示した。これは、A-C2では鉄骨部分の耐力負担率が約50%と高く、RC部分のせん断耐力が曲げ耐力を大きく上回っていたためであると考えられる。一方、E-Cでは鉄骨部分の耐力負担率が約30%と低く、RC部分のせん断耐力が曲げ耐力を若干上回る程度であったためであると考えられる。

#### 3. 3 曲げ変形とせん断変形

図-4-2に示す位置における供試体各部の変位測定値を用いて供試体柱部の曲げ変形とせん断変形を求めた。A-C2については4Cycle終了時まで、E-Cについては3Cycle終了時までについて、柱部に作用するせん断力  $Q$  と曲げ変形  $\Delta f$  との関係を図-7に、せん断変形  $\Delta s$  との関係を図-8に各々に示す。両供試体とも、曲げ変形が全体変形の大部分を占めており、せん断変形は小さい。次に、せん断力  $Q$  と  $\Delta f + \Delta s$  との関係を図-9に示す。 $\Delta f + \Delta s$  と図-4-1に示す方法により求めた全体変形  $\Delta$  は、ほぼ一致している。このことから、最大耐力時までの変形の範囲内においては、全体変形を曲げ変形とせん断変形に分解して考えることができると考えられる。

#### 3. 4 定着部内鋼材の伸び出しを考慮した柱部の曲げ変形

定着部内の鋼材にも歪が生じているため、図-10に示すように、定着部からの鋼材の伸び出しが生じる。本研究では、図-10に示すように、主筋位置における伸び出し  $r\delta_{ni}$  により、柱端部に

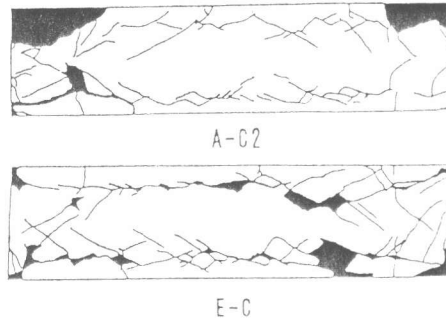


図-5 ひび割れ状況(5Cycle終了時)

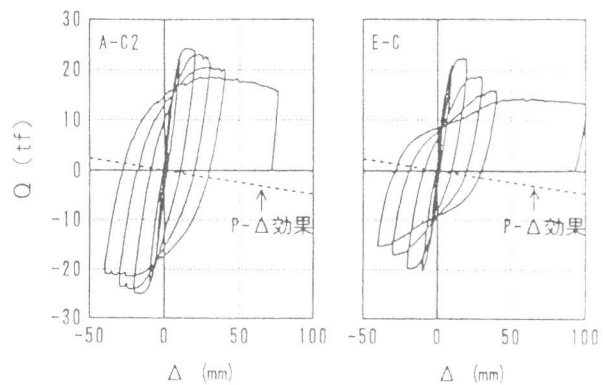


図-6 せん断力  $Q$  - 全体変形  $\Delta$  関係

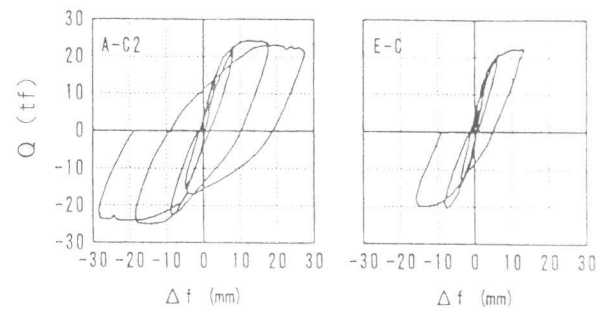


図-7 せん断力  $Q$  - 曲げ変形  $\Delta f$  関係

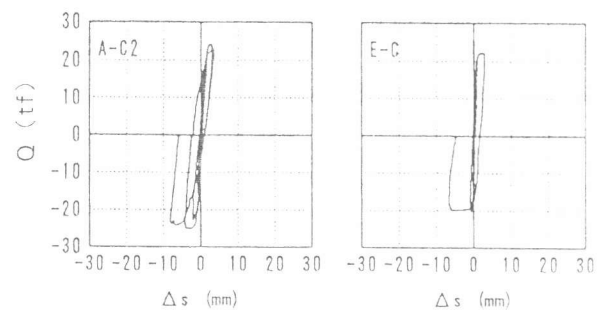


図-8 せん断力  $Q$  - せん断変形  $\Delta s$  関係

回転角  $\theta_B$  が生じるものと仮定した。この柱端回転角  $\theta_B$  によって部材に  $\Delta_B$  なる変形が生じる。図-11 に柱部に作用するせん断力  $Q$  と  $\Delta_B$  の関係を示す。

次に、部材の全体変形  $\Delta$  は、部材自体の曲げ変形  $m\Delta f$ 、せん断変形  $\Delta s$ 、及び柱端回転角  $\theta_B$  による付加変形  $\Delta_B$  の和で表されるものと仮定した。

$$\Delta = m\Delta f + \Delta s + \Delta_B \quad \dots (1)$$

ところで、図-7における曲げ変形  $\Delta f$  には、図-4-2に示した領域1、及び6における付加変形  $\Delta_B$  が含まれており、 $m\Delta f + \Delta_B$  に等しいと考えられる。そこで、 $m\Delta f$  は次のように表される。

$$m\Delta f = \Delta f - \Delta_B \quad \dots (2)$$

柱部に作用するせん断力  $Q$  と式(2)による  $m\Delta f$  との関係を図-12に示す。 $\Delta f$  に対する  $\Delta_B$  の影響は、曲げひび割れ発生後において一層明瞭に認められるようになる。これは、曲げひび割れ発生後、主筋の軸方向変形が、定着部を含めた材端部に集中するようになるためと考えられる。

次に、柱部の曲率分布を図-10に示す

ような逆三角形分布と仮定すると部材自体の曲げ変形  $m\Delta f$  は次のように表される。

$$m\Delta f = \left\{ \phi \cdot \left( \frac{L_{10}^2}{3} + \frac{L_{10} \cdot L_{20}}{2} + \frac{L_{20}^2}{6} \right) - \phi_{cr} \cdot L_{20} \cdot \left( \frac{L_{10}}{2} - \frac{L_{20}}{3} \right) \right\} \cdot L^2 \quad \dots (3)$$

ここに、 $L_{10} = L_1/L$ 、 $L_{20} = L_2/L$

ここで、図-13に3Cycleまでの各最大変位振幅時における柱端断面の歪分布を示す。図-13から、2cycleまでは、概ね断面の平面保持を仮定できると考えられる。そこで平面保持を仮定し、断面の曲げモーメント  $M$  - 曲率  $\phi$  関係を求めた。

ここに、鋼材の応力 - 歪関係は図-14-1に示すように仮定し、バウシinger効果

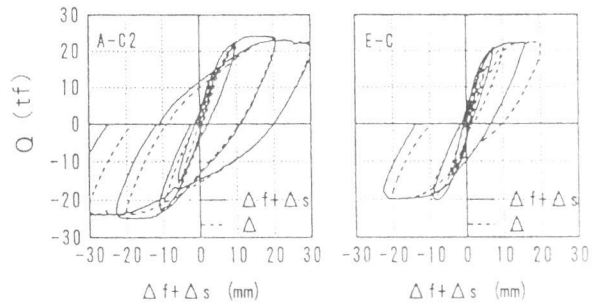


図-9 せん断力  $Q$  - ( $\Delta f + \Delta s$ ) 関係

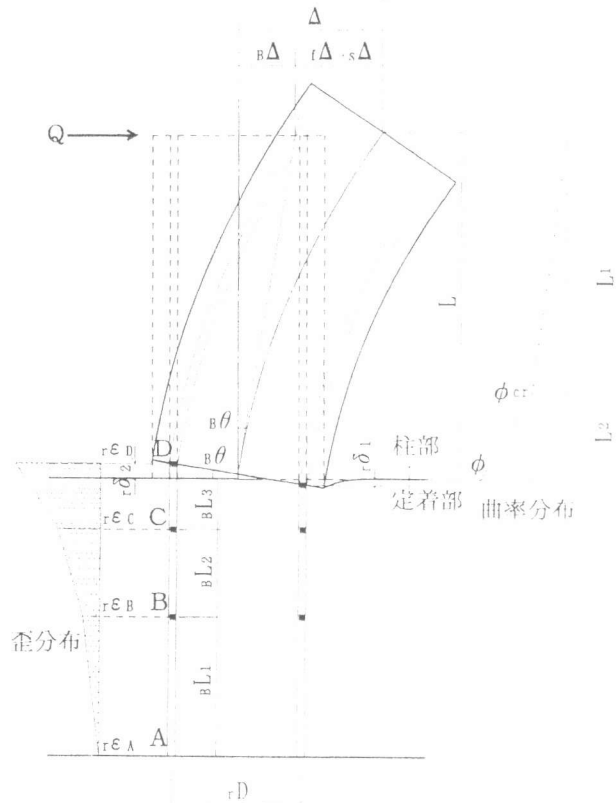


図-10 部材変形モデル

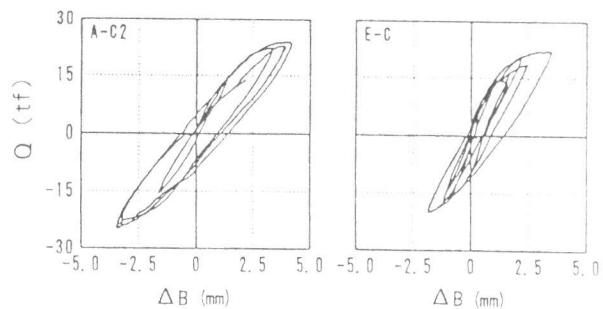


図-11 せん断変形  $Q$  - 付加変形  $\Delta_B$  関係

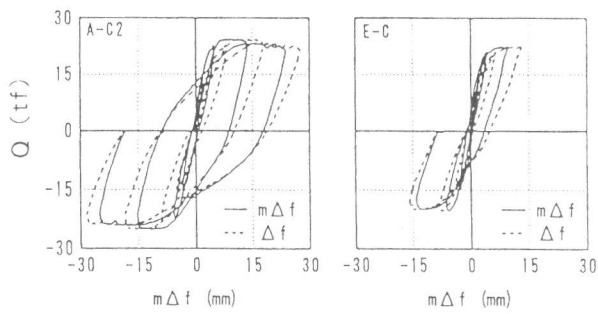


図-12 セン断力Q-曲げ変形 $m\Delta f$ 関係

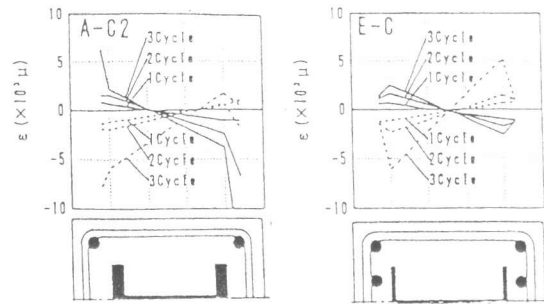


図-13 断面の歪分布

は無視した。また、コンクリートの応力-歪関係は図-14-2に示すように仮定した。図-15に、この $M-\phi$ 関係、及び式(2)に基づいて求めた柱端曲げモーメント $M$ と、部材自体の曲げ変形 $m\Delta f$ との関係を実線で、柱端曲げモーメント $M$ と、式(1)により付加変形 $\Delta B$ を考慮して求めた部材自体の曲げ変形 $m\Delta f$ の実験値との関係を破線で各々示す。計算値と実験値の対応は良好であり、部材が降伏する以前においても、定着部内鋼材の拔出しによる付加変形を考慮する必要があると考えられる。

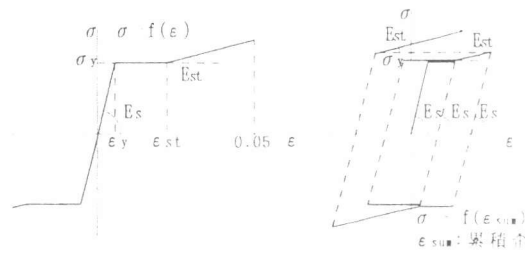


図-14-1 鋼材応力-歪関係モデル

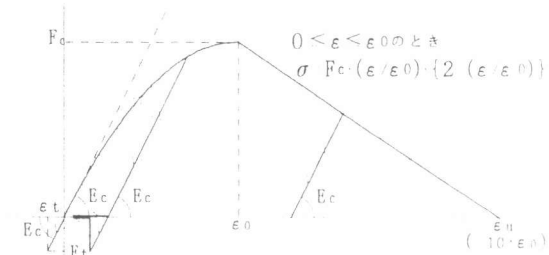


図-14-2 コンクリート応力-歪関係モデル

#### 4. 降伏変形

##### 4.1 降伏変形の評価

前述の実験結果により、降伏変形量の評価においては、定着部内鋼材の抜け出しによる変形を考慮する必要があると考えられる。

図13に示すように、部材降伏時においては、概ね断面の平面保持が成立しており、主筋、及び鉄骨フランジは降伏歪を越えていると考えられる。本論文においては、降伏時曲げ変形 $\Delta f_y$ は、計算の簡略化のため、図-16に示すように、全塑性モーメントに対応する塑性中立軸位置、及び圧縮縁コンクリート歪 $\epsilon_c = 0.004$

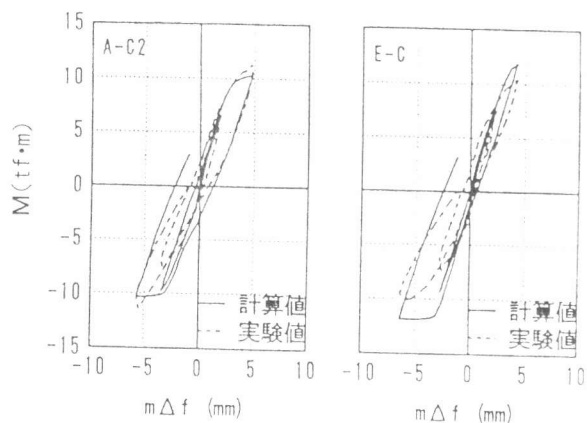


図-15 柱端曲げモーメント $M$ 曲げ変形 $m\Delta f$ 関係

と仮定して求めた材端断面曲率 $\phi_p$ を用いて、式(3)により求めることとした。降伏時せん断変形 $\Delta s_y$ については、曲げひび割れ発生後のせん断剛性低下を無視して、次式で与えることとした。

$$\Delta s_y = \kappa \cdot fMp \cdot (Gc \cdot Ac + Gs \cdot Aw) \quad \dots (4)$$

部材降伏時における定着部内鋼材の拔出しによる付加変形 $\Delta B_y$ については、定着部内引張主筋歪を図17に示すように仮定し、次式で与えることとした。

$$\Delta By = \theta By \cdot L$$

$$= (r \delta B / dny) \cdot L$$

$$\dots (5)$$

主筋の定着長さ $l_t$ は、定着部における主筋とコンクリートの平均付着応力度 $\tau_{av}$ を、 $\tau_{av} = 30 \text{ kgf/cm}^2$ と仮定することにより求めた[2]。

降伏変形 $\Delta y$ は、 $\Delta fy$ 、 $\Delta sy$ 、及び $\Delta By$ を用いて式(1)により与えることとした。

#### 4. 2 実験結果との対応

4. 1におけるSRC部材の降伏変形評価法について、文献[3]において引用した既往実験資料との対応を図18に示す。ここに、降伏変形の実験値としては、最大耐力の90%の荷重に達したときの部材角 $R_{90}$ を取っている。なお、降伏後も耐力が上昇し続ける場合は、荷重-変位関係をBi Linear型で近似し、その折れ点変形を降伏変形とした。 $R_{90}/R_y$ の平均値1.01、変動係数0.29(データ数102)であり、本論文における降伏変形評価法による計算値と実験値は概ね対応しているものと考えられる。また、単調荷重と繰返し荷重において、計算値と実験値の対応に明瞭な差異は認められなかった。

#### 5. 結び

SRC部材の曲げせん断実験を行い、材端部を中心とした詳細な変形、及び歪の測定により、材端定着部からの鋼材の拔出しによる付加変形が無視できないことを示した。さらに、材端における鋼材の拔出しを考慮した降伏変形評価を試み、実験値と計算値が概ね一致するとの結果を得た。

#### 参考文献

- [1] 仲威雄、森田耕次、立花正彦：鉄骨鉄筋コンクリート柱の耐力と履歴特性に関する実験的研究(その2)、日本建築学会論文報告集第260号、pp. 47~58、1977. 10
- [2] 宮武恒夫、窪田俊行：鉄筋コンクリート柱に関する研究I(降伏点の変形について)、日本建築学会関東支部第37回学術研究発表会論文集、pp. 113~116、1966
- [3] 上井希祐：鉄骨鉄筋コンクリート部材の荷重-変位履歴特性モデルに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17、No. 2、pp1143~48、1995

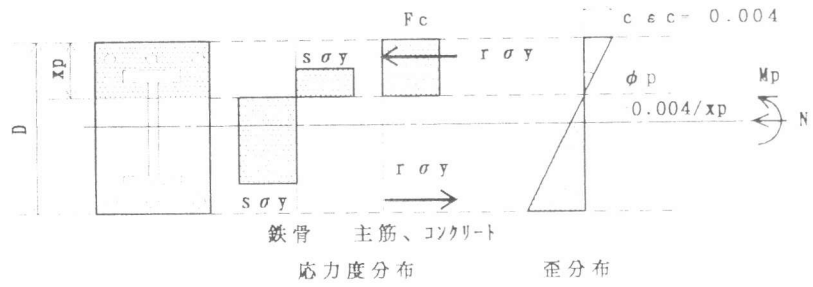


図16 降伏時材端断面曲率、及び中立軸

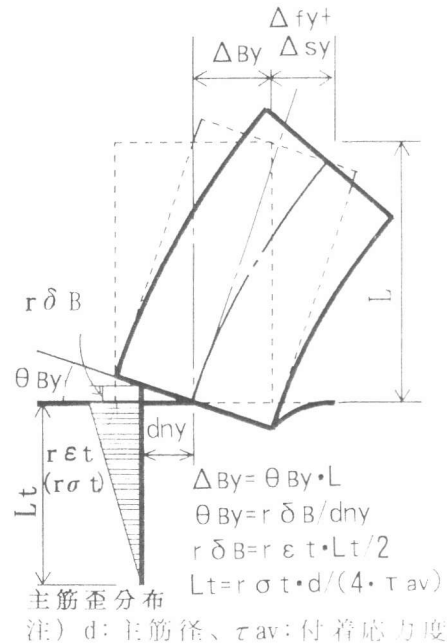


図-17 降伏時部材変形モデル

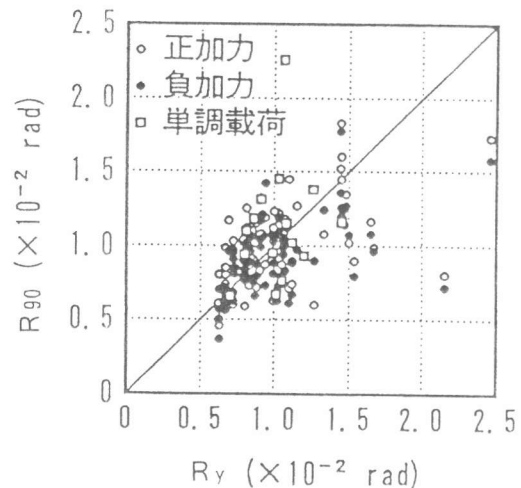


図-18 降伏変形計算値と実験値の対応