

RC 柱部材の変形性能の研究

変位成分に着目した変位挙動の考察

牧原 成樹 吉川 弘道

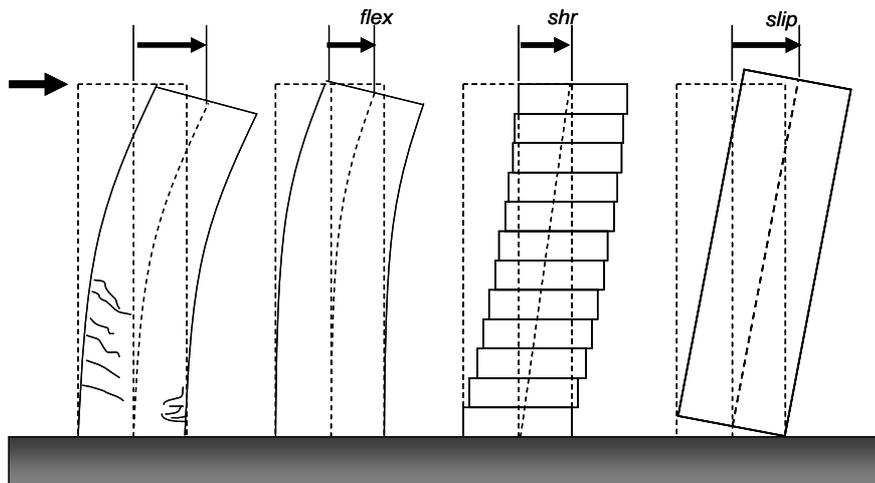
本論では、RC 柱部材を対象とした正負交番漸増繰り返し荷重試験結果を用い、RC 柱部材の変形特性に関する検討を行った。RC 柱部材の全変位量を、曲げ変形・せん断変形・軸方向鉄筋の伸び出しに伴う躯体部分の回転変位の3成分に分離して考察を試みた。RC 柱部材が正負交番荷重を受けた際の破壊パターンは曲げ破壊、せん断破壊と大きく2種類に分類されるが、曲げ降伏後のせん断破壊のように軸方向鉄筋が降伏した後、せん断破壊に移行することが確認されている。このような曲げ破壊型、せん断破壊型、複雑な挙動を示す曲げ降伏後のせん断破壊型 RC 柱部材の靱性を的確に評価するためには、曲げ変形の影響だけでなく、せん断変形の挙動も把握する必要がある。また、フーチングから軸方向鉄筋の伸び出し、それに伴う躯体部分の回転に起因した水平変位が生じる。この軸方向鉄筋の伸び出しに伴う回転変位は、全水平変位量に対して極めて大きくなるとの報告もあり、RC 柱部材の変形性能を適切に評価するためには、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しによる水平変位の評価方法を確立しておく必要がある。

Key words: RC 柱部材, 曲げ変形, せん断変形, 軸方向鉄筋の伸び出しに伴う回転変位, 変形分離手法

1. RC 柱部材の変形

正負交番荷重を受けた RC 柱部材は曲げモーメントやせん断力が生じ、これらの内力の発生やコンクリートのひび割れ、軸方向鉄筋の降伏により変形を起こす。ここで RC 柱部材の変形は、一般的に曲げ変形 δ_{flex} 、せん断変形 δ_{shr} 、軸方向鉄筋の伸び出しに伴う躯体部分の回転変位 δ_{slip} の総和で求められる(図1)。以下に算出式を示す。

$$\delta = \delta_{flex} + \delta_{shr} + \delta_{slip}$$



(a)全変形量 (b)曲げ変形 (c)せん断変形 (d)伸び出しによる回転変形

図1 RC 柱部材の変形成分図

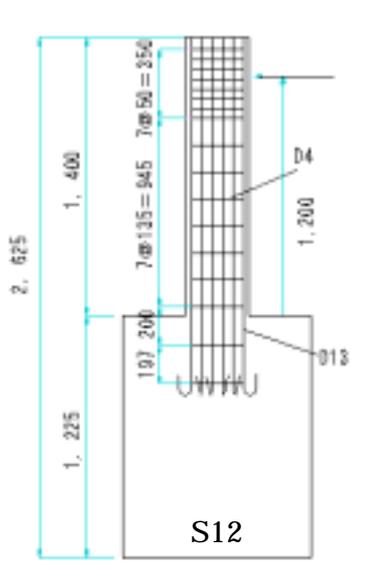
2. 実験概要と試験体諸元

用いた試験体は、軸力、曲げせん断耐力比をパラメータとした RC 柱部材の正負交番漸増繰り返し載荷試験を行ったものである。繰り返し回数は、直下型の地震を想定するため 3 回とした。試験体断面は鉄道 RC 高架橋を 40% 縮小した 320×320(mm)、またせん断スパン比 a/d (a =せん断スパン長, d =有効高さ)を 4.05 とした。

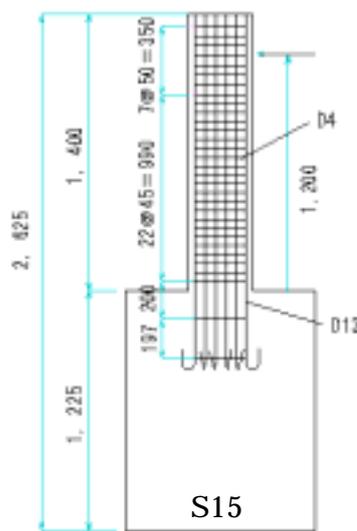
各試験体の諸元を表 1、試験体配筋図を図 2 に示す。本実験において、曲げ降伏後のせん断破壊型試験体と曲げ破壊型試験体に着目した。

表 1 試験体諸元

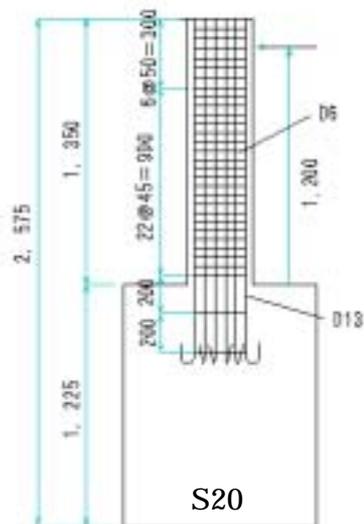
試験体名	断面(mm)	軸力(kN)	軸方向鉄筋		帯鉄筋			コンクリート圧縮強度(N/mm ²)					
			鉄筋比(%)	降伏強度(N/mm ²)	径及び間隔(mm)	鉄筋比(%)	降伏強度(N/mm ²)		降伏ひずみ(μ)				
S12-1-3	320×320	100	2.48	387	D4@135	0.058	296	1075	24.0				
S12-3-3		300							D4@45	0.174	353	1910	23.8
S15-0-3		0			D6@45	0.44	353	1910					22.8
S15-1-3		100											D6@45
S20-0-3		0			D6@45	0.44	353	1910	28.4				



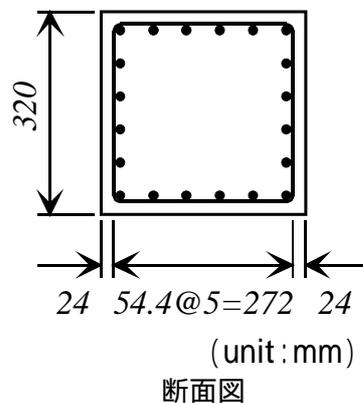
S12 試験体



S15 試験体



S20 試験体



断面図

図 2 試験体配筋図および断面図

3. 変形成分の実験的分離手法

RC柱部材に水平荷重が作用すると、せん断力と曲げモーメントが発生する(図3参照)。本実験では、試験体を4区間に分割しそれぞれの区間に取り付けられた変位計から曲げ変形(以下、 δ_{flex})とせん断変形(以下、 δ_{shr})を計測した。ただし基部の区間1に関しては、軸方向鉄筋の伸び出しに伴う回転変位も含んでいると仮定する。このため、軸方向鉄筋の伸びだしに伴う回転変位(以下、 δ_{slip})においては、2.4で再度検討を行い、全変形量の算出を行う。

図3に変位計取り付け位置と計測区間における内部分力、図4に変位計による曲率とせん断ひずみ算定図を示す。

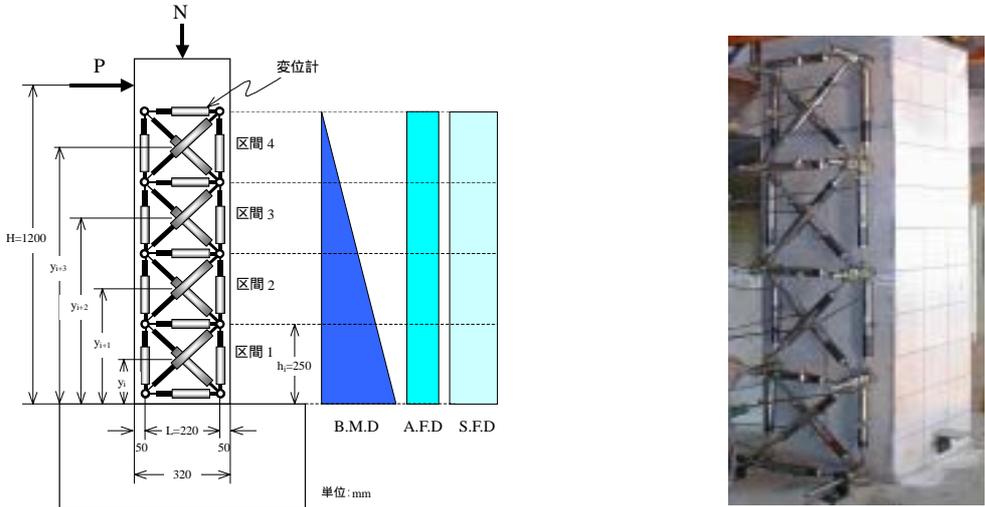


図3 変位計取り付け位置と計測区間における内力分布図

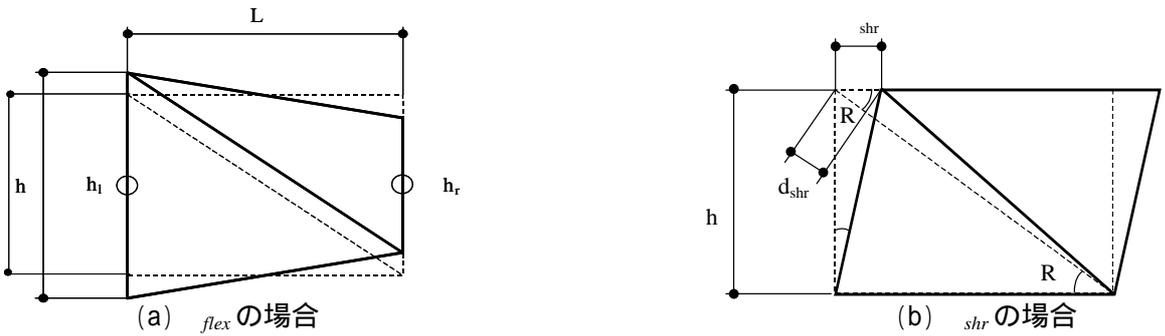


図4 変位計による曲率とせん断ひずみの算定

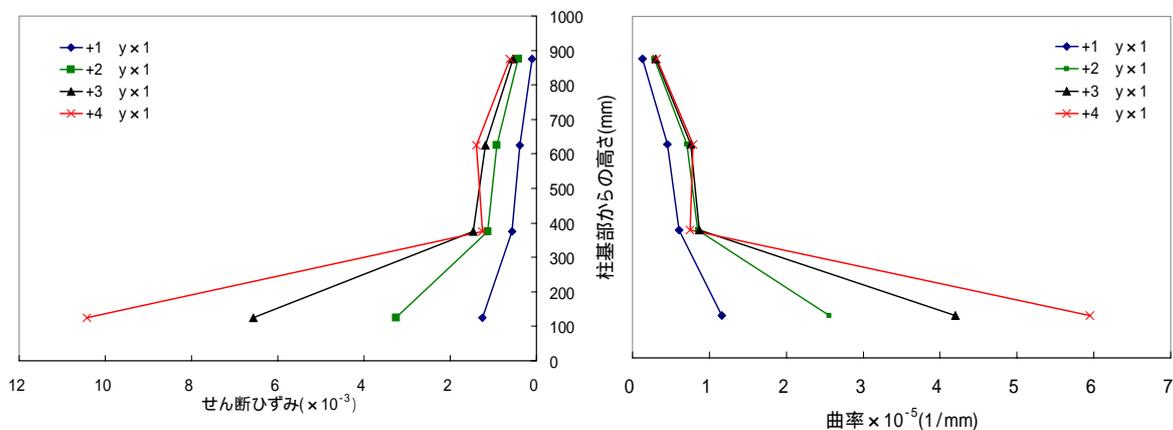
- 曲げ変形: $\delta_{flex} = \sum \phi_i (H - y_i) \cdot h$
- せん断変形: $\delta_{shr} = \sum \gamma_i \cdot h$
- 載荷点変位: $\delta_{total} = \delta_{flex} + \delta_{shr}$
- ϕ_i : i番目の区間における平均曲率
- H: せん断スパン長(mm)
- y_i : 基部からi番目の区間の中心点までの距離(mm)
- γ_i : i番目の区間におけるせん断ひずみ
- h: 区間長 = 250mm

ここで、各区間での曲率とせん断ひずみは、6基の変位計から、図2.4に示すような幾何学量を用いて次式より算出を行う。

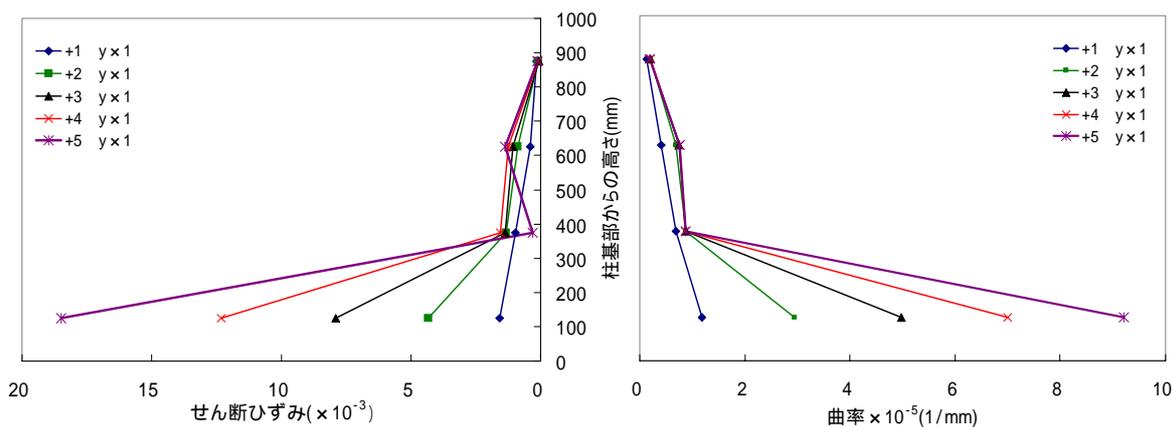
- 曲率: $\phi = (\Delta h_r - \Delta h_l) / (L \cdot h)$
- せん断ひずみ: $\gamma = \Delta d_{shr} / \cos R \cdot h$
- Δh_r : 鉛直方向における圧縮力による変形
- Δh_l : 鉛直方向における引張力による変形
- L: 水平方向の長さ
- h: 鉛直方向の長さ
- Δd_{shr} : 斜め方向の変形
- R: 水平方向に対する斜め角度

3.1 曲率とせん断ひずみの影響

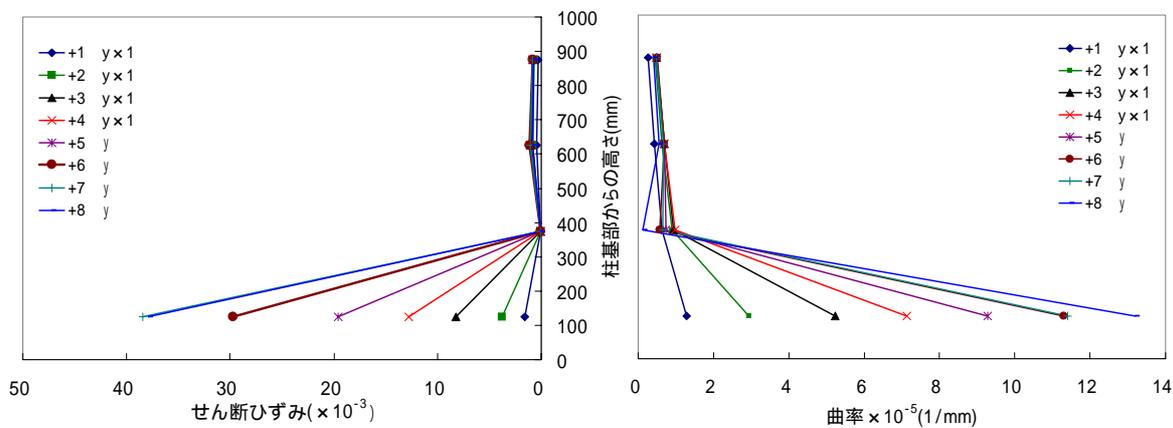
図5は各曲げせん断耐力比の試験体について、各 y_1 回目の曲率、せん断ひずみの測定結果を示す。せん断ひずみ、曲率は共に値が大きくなる領域が同じである。すなわち、柱基部付近(塑性ヒンジ領域)により、大きくなるという挙動を示している。この結果より、 $flex$ と shr の寄与する部分は柱基部であることが確認できた。



S12 試験体



S15 試験体



S20 試験体

図5 曲率・せん断ひずみの分布状況

3.2 各区分における $flex$ と shr の挙動

次に、各区分の変形の挙動を示し、曲率・せん断ひずみの分布(図5)と同様に、柱基部である区分1のみにおいて、 $flex$ ・ shr の挙動が著しく増加しているかという検討を試みた(図6)。

S12試験体に関して、 shr の終局時に区分1だけでなく、すべての区分において shr が上昇していることが確認できる。この原因として考えられることは、曲げせん断耐力比が小さく、せん断の影響が強いため全区分に挙動が表れたと考えられる。S15試験体では、 shr の上昇は、区分1および2のみに表れ、他の区分では変化が乏しい。曲げ破壊型のS20試験体は、区分1以外殆んど変化が見られなかった。 $flex$ の場合は、区分1のみ変化していることより、柱基部に強く変形がみられる。

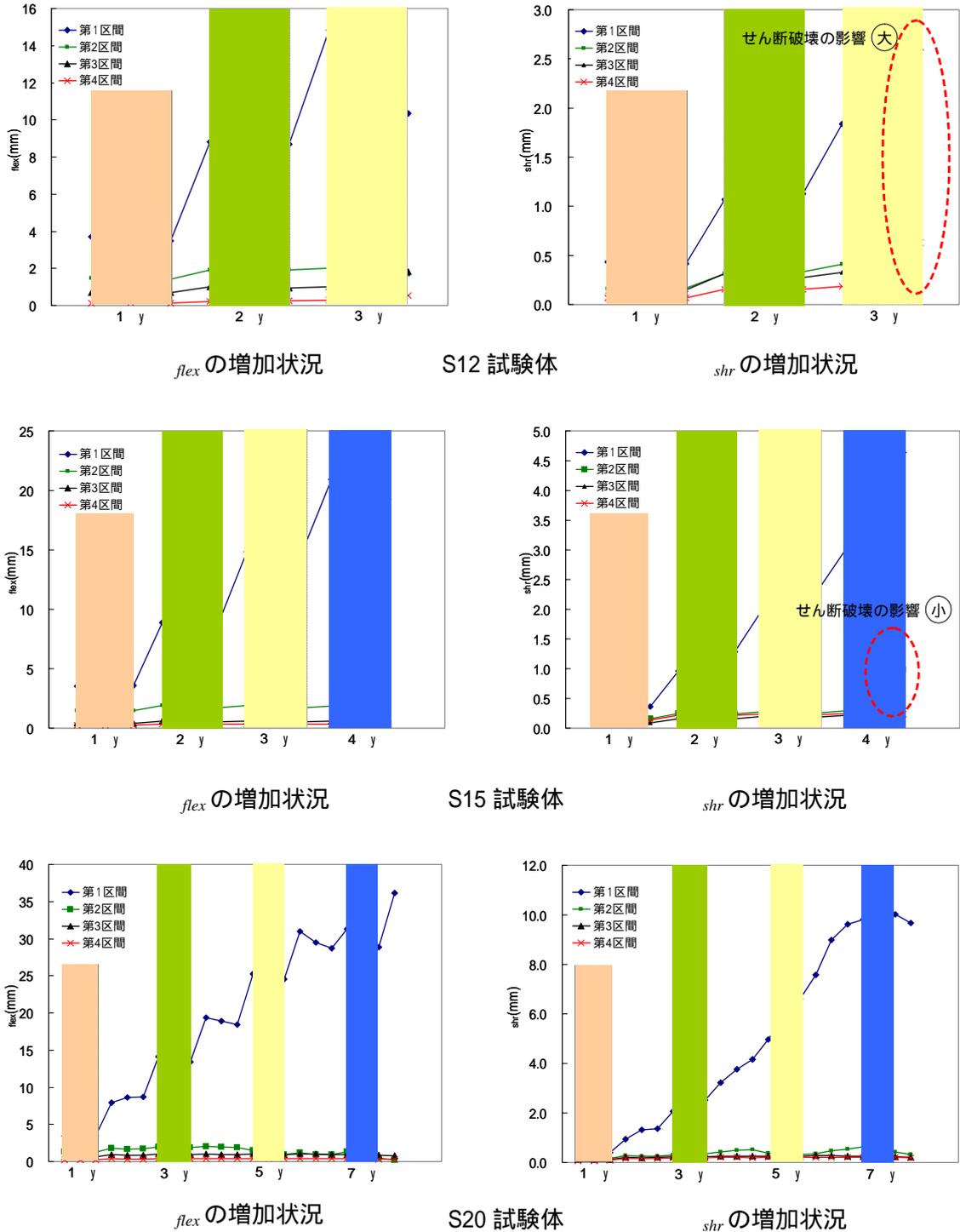


図6 各区分の増減状況

3.3 各変位状況の推移

繰り返し回数の増加に対する、 $flex$ 、 shr それぞれの変化状況についての検討を行った。今回は、 $flex$ 、 shr が全体の変位にどのような影響を与えるかという検討のために、曲げ降伏後のせん断破壊に至ったS12・S15試験体の結果を用いた。

・ $flex$ の場合

図7より、繰り返し回数が1, 2, 3と増えるにあたって、 $flex$ の挙動はわずかに低下していることがわかる。曲げせん断耐力比の違いに関して、著しい変化は見られない。

・ shr の場合

図8より、繰り返し回数が増加すると、徐々に増加していることが確認できる。さらに曲げせん断耐力比の違いに関しては、終局時に近づくとつれ S12 試験体は shr の急激な上昇がみられるが、S15 試験体はゆるやかに上昇している。これにより曲げせん断耐力が大きい、つまり帯鉄筋量が多いと shr の増加を遅延させることができる。

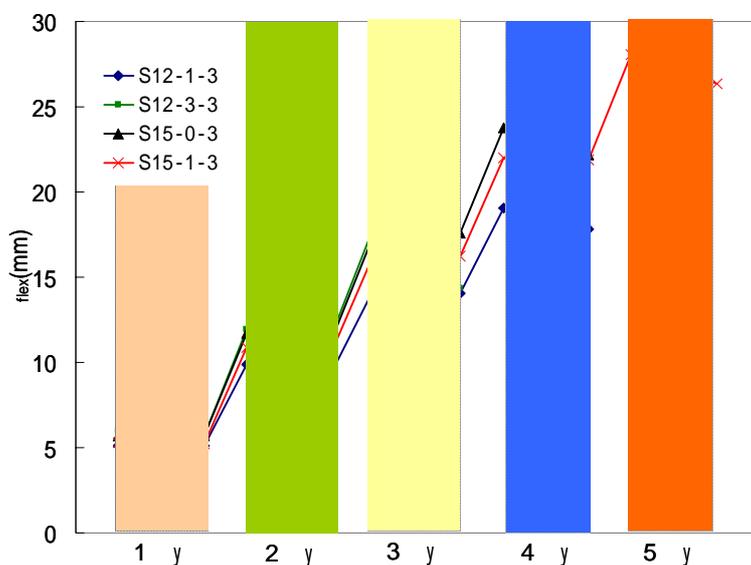


図7 $flex$ の増加状況

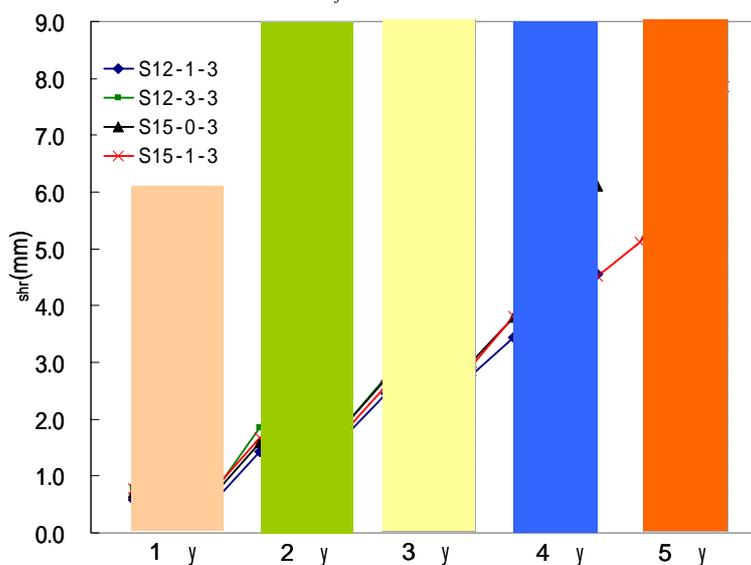


図8 shr の増加状況

4. 軸方向鉄筋の伸び出しに伴う回轉變位の算出手法

区間 1 の δ_{flex} には軸方向鉄筋の伸び出しに伴う回轉變位(以下, δ_{slip})が含まれていることより,これを定量的に評価する必要がある. 水平荷重载荷により軸方向鉄筋に引張力が作用すると,軸方向鉄筋がフーチング部から伸び出す現象が生じる. 軸方向鉄筋が伸び出すと,伸び出し量に応じた RC 柱部材の剛体回転が生じ,これが自由端の変位に加わる(図 9). この δ_{slip} は,全変位量に占める割合が非常に大きいと言われている. ここで,縮小試験体(S シリーズ)でも,同様に δ_{slip} が全変位量の割合に対し,大きな影響を与えるかについて検討を試みた.

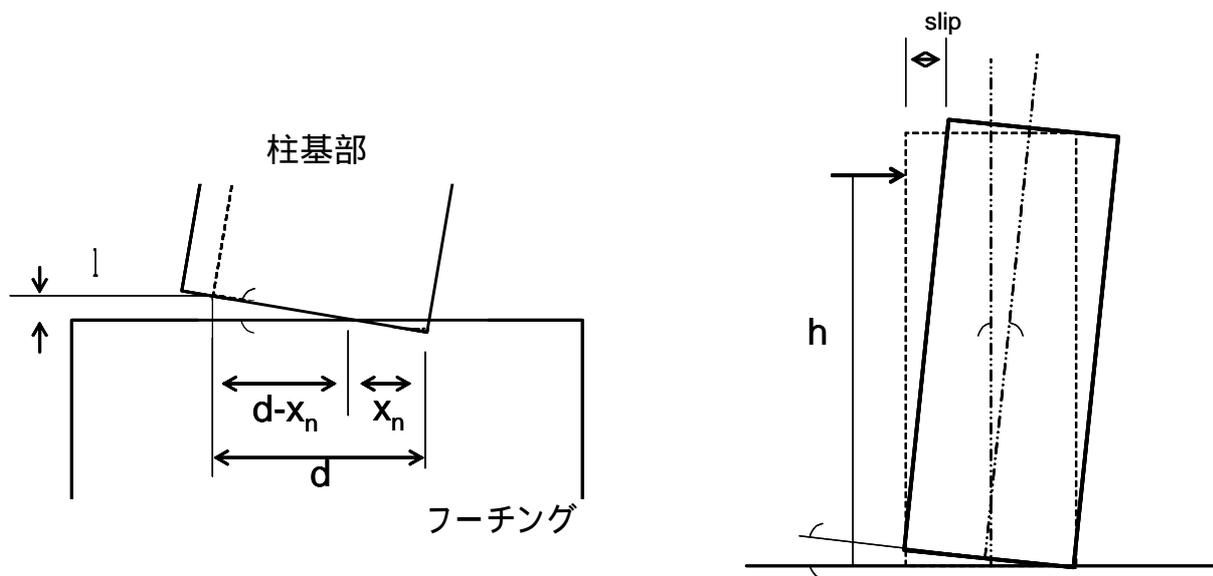


図 9 軸方向鉄筋伸び出しによる回轉變位算出図

Δl : 軸方向鉄筋伸び出し量(mm)

d : 部材の有効高さ(mm)

x_n : 圧縮縁により中立軸までの距離(力のつり合い, 平面保持の法則による)

θ : 柱部材の回転角

$$\theta = \Delta l / (d - x_n)$$

h : 载荷点までの高さ(mm)

δ_{slip} : 軸方向鉄筋の伸び出しに伴う回轉變位(mm)

$$\delta_{slip} = h \cdot \theta = h \cdot \Delta l / (d - x_n)$$

4.1 軸方向鉄筋の伸び出し量算出手法

1) 軸方向鉄筋ひずみによる算出手法 ($S\varepsilon$)

軸方向鉄筋がフーチングから伸び出す量は、フーチング内埋め込み部先端にフックがついているため、先端は移動しないと考えると、フーチング内軸方向鉄筋ひずみ (ε) の積分値と考えられる。以下に算出式を示す。

$$S\varepsilon = \int \varepsilon dx$$

図 10 に一例として S15-1-3 試験体の軸方向鉄筋のひずみ分布を示す。

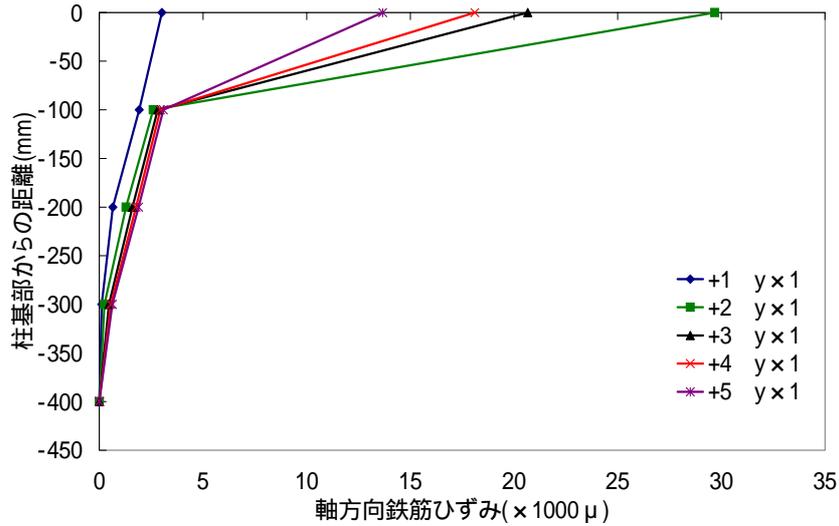


図 10 軸方向鉄筋ひずみ分布図(S15-1-3)

2) 直接計測法による算出

・ステンレスワイヤーによる直接計測法 ($S\delta_s$)

柱基部の軸方向鉄筋にステンレスワイヤーを取り付け、計測を行った。ステンレスワイヤー位置を図 11 に示す。

・直接変位計による計測法 ($S\delta_r$)

柱基部から 50mm の位置にガラス版を用い、図 11 のように設置した。その値より、断面の中立軸位置ならびに伸び出し量の算出を行った。

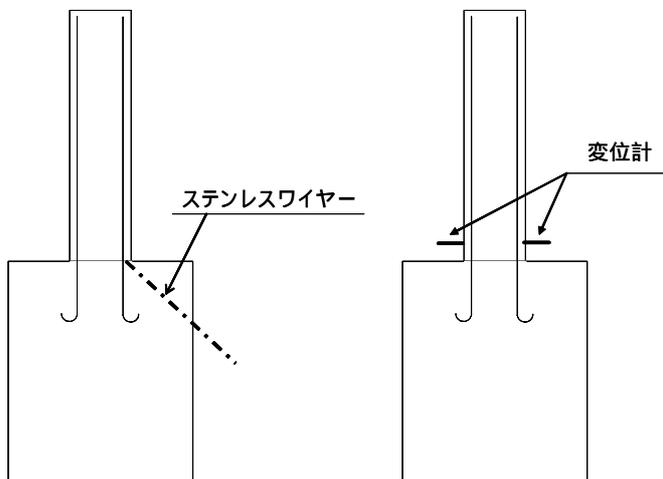
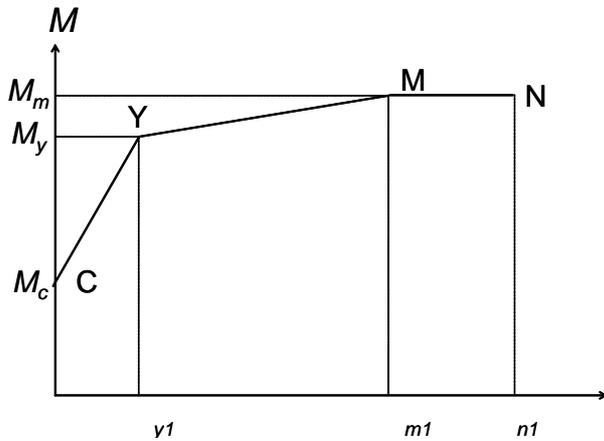


図 11 直接計測法

3) 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)による伸び出し量の算出

鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)(以下、鉄道標準)の曲げモーメント - 回転角(M -)関係より、伸び出し量に関して以下の仮定(図 12)を行う。(1)最大曲げモーメント以降、回転角の増加が望めない(2)ひび割れ発生後に回転角が生じる。また、以下に算出式を示す。



- M_c : 曲げひび割れ発生時の曲げモーメント
- M_y : 降伏時の曲げモーメント
- M_m : 最大曲げモーメント
- θ_{y1} : Y点における部材接合部からの軸方向鉄筋の伸び出しによる部材端部の回転角
- θ_{m1} : M点における部材接合部からの軸方向鉄筋の伸び出しによる部材端部の回転角
- θ_{n1} : N点における部材接合部からの軸方向鉄筋の伸び出しによる部材端部の回転角でM点と同じ値

図 12 伸び出し量の仮定図

)降伏時の回転角 θ_{y1} に関して

$$\theta_{y1} : \Delta L_y / (d - x_y)$$

d : 有効高さ(mm)

x_y : 降伏時の中立軸(mm)

ΔL_y : 降伏時の部材接合部からの軸方向鉄筋の伸び出し量(mm)

$$\Delta L_y = 7.4\alpha \cdot \varepsilon_y \cdot (6 + 3500\varepsilon_y)\phi / (f'_{fcd})^{\frac{2}{3}}$$

ε_y : 引張鉄筋の降伏ひずみ

ϕ : 引張鉄筋の直径(mm)

f'_{fcd} : 部材接合部のコンクリートの設計圧縮鉄筋(N/mm^2)で、材料係数 $\gamma_c = 1.0$ として算定する。

α : 鉄筋間隔の影響を表す係数で、一段配筋の場合は以下の式により算定する。

$$\alpha = 1 + 0.9e^{0.45(1-c_s/\phi)}$$

c_s : 引張鉄筋の中心間隔(mm)

)終局時の回転角 θ_{m1} に関して

$$\theta_{m1} = \{(2.7k_{w1} \cdot p_w + 0.22)(1 - N' / N'_b) + 1\} \theta_{y1}$$

$$\text{ただし } 2.7k_{w1} \cdot p_w + 0.22 \leq 3.7$$

$$N' / N'_b \leq 1.0$$

p_w : 帯鉄筋比(%)

k_{w1} : 帯鉄筋強度を考慮する係数

N' / N'_b : 釣合い軸力比

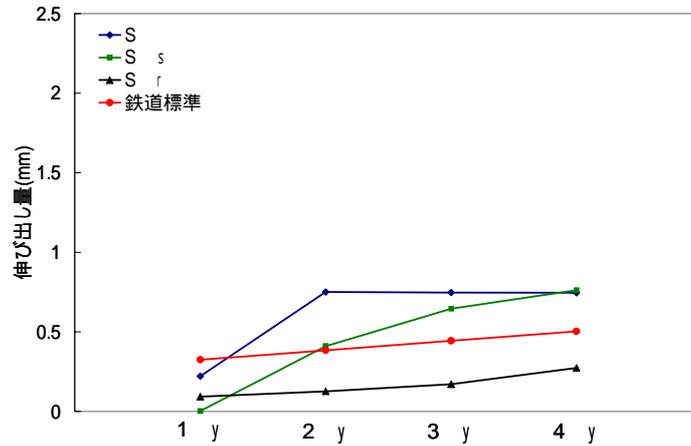
N' : 部材に作用する軸力

N'_b : 釣合い軸力

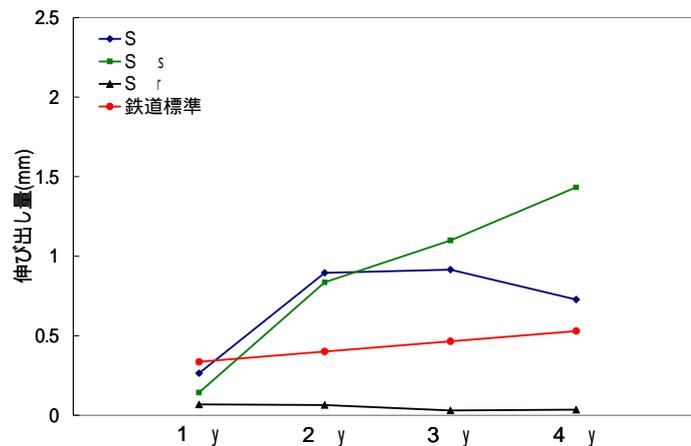
以上の各回転角より、伸び出し量の算出を行った。

4.2 軸方向鉄筋の伸び出し量算出結果

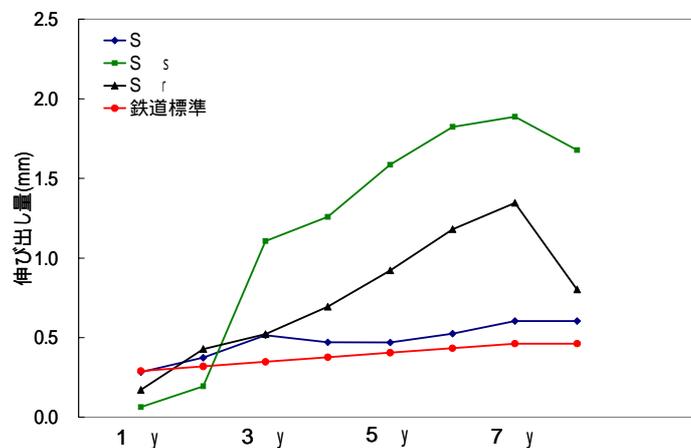
図 13 において、S12 試験体はどの計測方法に関しても、大きな変化は見られず変位が増加するにあたって伸び出し量も増加という挙動を示した。S20 試験体では、直接計測法に急激な上昇が見られた。この原因として設置している箇所にひび割れが進展したため正確に計測できず、大きな値を示したことが考えられる。軸方向鉄筋のひずみにより計測した結果 S_{ε} と鉄道標準に関しては降伏・終局共に近い値を示している。以上より伸び出し量は軸方向鉄筋のひずみにより計測した結果 S_{ε} を用いた。



S12 試験体



S15 試験体



S20 試験体

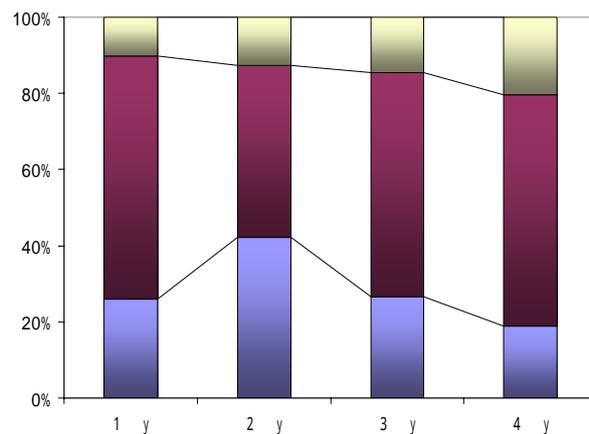
図 13 各変位に対する伸び出し量の挙動

5. 各変位置が占める割合

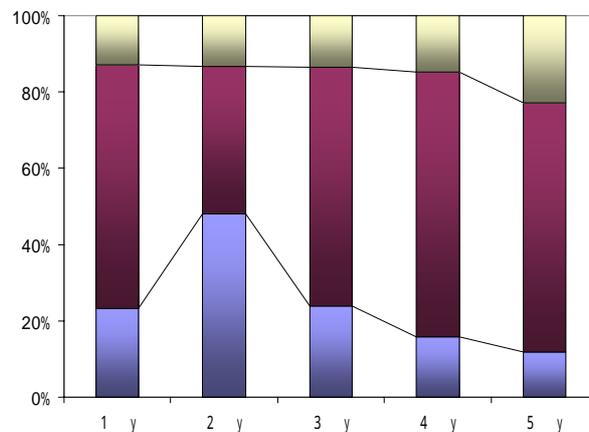
図 14 に、全変位置に対する $flex$ 、 shr 、 $slip$ が占める割合を示した。図は各変位の全変位置を 100%とし、その中に含まれている $flex$ 、 shr 、 $slip$ をパーセント(%)表記したものである。

$slip$ に関して、降伏してすぐに全変位置に対する割合が増加していることが確認できる。さらに変位を 3 y, 4 y と増加させると $slip$ の割合が徐々に低下し、それに伴い shr が増加する挙動を示している。

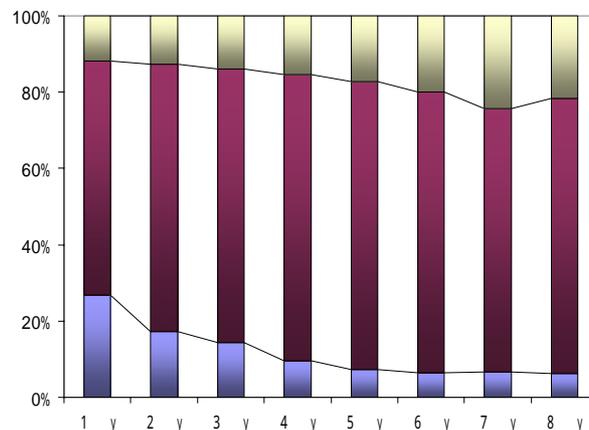
曲げせん断耐力比の小さい S12 試験体では、終局時に全変位置に対する shr 、 $slip$ の占める割合が大きい。さらに曲げ破壊型の S20 試験体は、降伏時から終局時に移行しても、 $flex$ の占める割合が一定となっていることが確認できた。このことより、 $flex$ を一定させることで繰り返しに変化する変位が shr から $slip$ へと移行させることで脆性的なせん断破壊を防ぐことが考えられる。各試験体で shr が 20%を超えると終局となった。



S12 試験体



S15 試験体



S20 試験体

図 14 全変位置に示す割合

6. 変形分離精度の検証

変形分離が適切に行われていることを検証するために、柱頭部の変位、全変位量 ($flex + shr + slip$) の計測結果を示した(図 15)。ひび割れの進展が少ない降伏時(1 y), および 2 y では精度良く評価していることが確認できる。S20 試験体のように柱基部に、ひび割れが進展していく場合、終局時において精度の低下が見られた。しかしながら、全体を比較すると、おおむね正確に変形の分離が可能であることがいえる。以上より、RC 柱の変位量は $flex + shr + slip$ に分離して評価できることができ、曲げ破壊やせん断破壊のメカニズムの解明が変形量を着目としておこなうことができる。

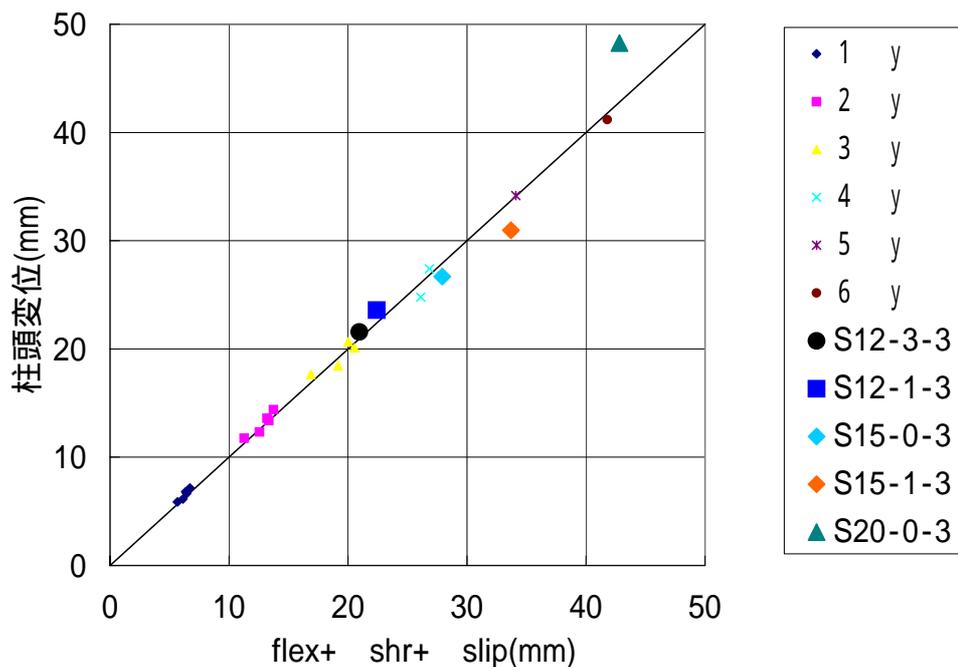


図 15 変形分離精度の検証

【参考文献】

- 1) 渡辺博志, 河野広隆: 曲げ降伏後にせん断破壊を生じる RC 柱部材の変形特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, 1997
- 2) 武蔵工業大学 構造材料工学研究室: 平成 9 年度 小型試験体による RC 単柱の実験結果報告書
- 3) 武蔵工業大学 構造材料工学研究室: 平成 10 年度 小型試験体による RC 単柱の実験結果報告書
- 4) 石橋忠良, 吉野伸一: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究, 土木学会論文集 第 390 号/ - 8
1988 年 2 月
- 5) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計: 鉄道総合技術研究所, 丸善株式会社, 平成 11 年度