

論文

[2047] 曲げ降伏領域に機械式鉄筋継手を設けた梁の曲げ降伏後の力学特性

大久保全陸^{*1}

1. 序論

機械式鉄筋継手の普及に伴って, RC構造の耐震性状を検討するために, その継手を用いた部材実験が活発に行われている. 既往の実験によると, 機械式鉄筋継手を用いても, 部材の力学的特性, 特に強度特性はほとんど問題はないものの, 継手を部材の曲げ降伏危険断面に配置すると, 引張鉄筋降伏による曲げ降伏後の荷重上昇が継手の無い場合に比べて比較的顕著となる場合がある, との指摘がある[1, 2].

この荷重上昇は, 部材の曲げ耐力の増加という観点からはそれ自身問題ではないが, 近年の耐震設計方法の理念の一つである, 設定した曲げ降伏機構の実現と曲げ降伏後の部材の靱性確保という2つの観点からは, 降伏後の曲げ強度の上昇は単なる余力ではなく, それに見合った部材のせん断設計(靱性設計)の必要性和, 非降伏部材の曲げ及びせん断強度の保証が要求されることとなり, 荷重上昇の可能性についてはこれを定量的に明らかにしなければならない問題点となる.

この荷重上昇は, 機械式鉄筋継手単体の引張試験で伸びを測定する検長を短くしたときに得られる荷重と伸びの関係のグラフでみられるように, 鉄筋単一の引張試験で得られる応力歪曲線に比べて, 歪硬化による荷重上昇が早期に起こる(降伏棚長さが見かけ上短くなる)ことに起因する現象である. すなわち, 降伏点強度と剛性が異なる二つの材料(鉄筋と継手金物)が直列に結合された, 見かけ上, 降伏棚長さが短くなった複合バネが部材の曲げ降伏領域(ヒンジ領域)に設けられると, 部材変形の増加に伴って伸張するバネが降伏棚を超えて応力度上昇域に達することによって, 部材としての荷重上昇が起こる現象である, と考えることができる. 従って, そのバネの挙動は部材の変形量と密接に関係するので, 荷重上昇割合は部材の変形との関係で論じられるべきものである.

本報告では, RCフレーム構造の耐震設計において曲げ降伏ヒンジが計画される梁端に機械式鉄筋継手を設けた場合の曲げ降伏後の荷重上昇のメカニズムの解明を目的として行った実験について上記の複合バネに基づく仮説を充てはめて検討する.

2. 梁端に機械式鉄筋継手を設けた部材実験

2.1 試験体

曲げ降伏後の荷重上昇は, スリーブ式及びネジ式のいずれの継手についても共通のメカニズムに起因しており, その上昇率は, 後章で述べるように継手部の位置, 長さ及び剛性(基本的には, 荷重と伸びとの関係)に依存するものと考えられる. そこで, 本実験では継手の位置を変えた図1に示す片持ち梁4体(No. 1:継手なしを含む)を計画した. No. 2は, 継手端を柱に2cm入った位置としたもの, No. 3は継手端を柱面から梁側に5cm入った位置としたもの, No. 4は継手端を柱面から梁側に10cm入った位置としたものである. 継手位置を変えたものを計画した考えは, 継手単体の実験で検長を変えたものを計画していることと基本的に対応している.

梁の主筋にはD16を使用し, 継手には無収縮グラウトモルタルを注入する市販のスリーブ式継手

*1 九州芸術工科大学教授 芸術工学部環境設計学科, 工博(正会員)

を用いた。梁主筋の応力歪特性ができる限り陽に部材の荷重変形関係に反映されるように梁主筋本数を少なくし、上下共2-D16とした。梁主筋比は0.57%である。

2.2 使用材料の性質

梁主筋SD345, D16及び肋筋5.5φの力学的特性を表1に示す。主筋D16の数値は、日本建築センターの継手性能判定試験の弾塑性域一方向繰返し加力試験に従って行った実験(6体)で、鉄筋に貼付した歪ゲージの測定結果に基づいて決定した値である。

コンクリートは、粗骨材寸法12mmの碎石普通コンクリートでレディーミクストコンクリートを使用した。コンクリートの力学的特性を表2に示す。

2.3 加力測定方法

図1に示す試験体を縦型にセットし、柱型部を固定して片持ち梁の先端に水平荷重Pを加えた。加力点は梁端から145cmの位置である。加力は一方向単調載荷とした。

変形関係の測定は、加力点の基礎(柱型)に対する相対水平変位 δ 、梁主筋位置での材軸方向5区間(区間長20cm)の伸縮量、及び鉄筋の歪の測定とした。

3. 実験による荷重変形関係

図2に4体の荷重変形関係(P- δ 曲線)を示す。図中の破線は次節で述べる解析による荷重変形関係である。また、図中の英文字記号は、図1に記した記号位置の鉄筋が降伏したことを示す。

表3に主要な実験結果と後述の解析結果を示す。各試験体ともほぼ同変形、同荷重で曲げ降伏した。しかし、降伏後の挙動は図2にみられるように各試験体間に違いがある。

4. 曲げ降伏後の荷重と変形の関係の解析

4.1 基本方針

鉄筋コンクリート部材では、鉄筋が曲げ降伏すると、その後、降伏した断面内の応力中心間距離jの微増によって荷重が若干増加するが、降伏領域内でのひび割れの分散と鉄筋の付着力の劣化等によって鉄筋の高歪領域(ヒンジ領域)が拡大し、部材の変形が急増する。この場合の部材の変形増加は、主として、ヒンジ領域の鉄筋の伸びに伴う塑性回転に起因している。

しかしながら、ヒンジ領域の区間L内に鉄筋より強度剛性の高い機械式鉄筋継手が存在すると

表1: 鉄筋の力学的特性(試験片6体の平均値)

呼び名	σ_y	E_s	σ_t	ϵ_{sh}	E_{sh}
D16	3619	1.76	5466	2.45	4.62
5.5φ	3193	2.14	4170	----	----

σ_y : 降伏点強度(kg/cm²), E_s : ヤング係数($\times 10^6$ kg/cm²),
 σ_t : 引張強度(kg/cm²), ϵ_{sh} : 歪硬化開始時の歪(%),
 E_{sh} : 歪硬化後の2次剛性($\times 10^4$ kg/cm²)

表2: コンクリートの力学的特性(試験体3本の平均値)

	σ_B	ϵ_B	E_c	σ_{sp}
コンクリート	285	0.222	2.65	26.5
グラウト材	1129	0.395	3.46	----

σ_B : 圧縮強度(kg/cm²), ϵ_B : 圧縮強度時の歪(%), E_c :
 $\sigma_B/3$ 強度時の割線剛性($\times 10^5$ kg/cm²), σ_{sp} : 割裂引張強度(kg/cm²)

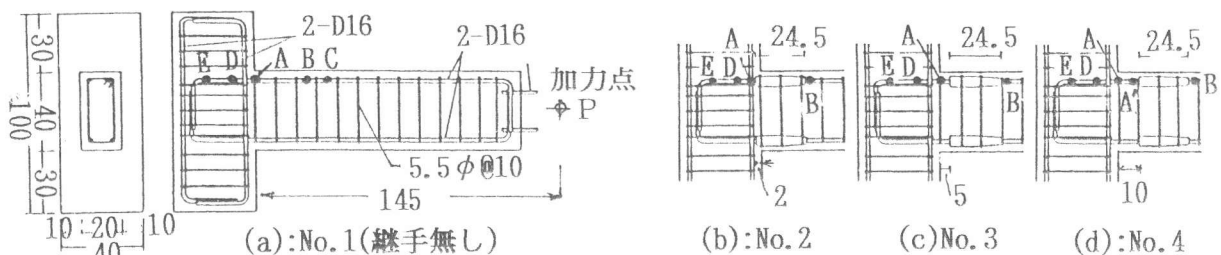


図1 試験体の形状、配筋、寸法等 [unit:cm]

その区間 $L (=L_r+L_{ss}, L_r$:降伏領域内の鉄筋の長さ, L_{ss} :機械式鉄筋継手の長さ)内における鉄筋部分 L_r による塑性伸びが, 継手がない場合($L_{ss}=0$)に比べて相対的に減少し, 部材の塑性変形も減少する. この理由により, 継手がない場合には鉄筋の歪が歪硬化域に入るまでに部材は大きく変形するが, 梁端に剛な継手を設けた部材では, 変形の増加に伴って鉄筋が歪硬化域に入り, 荷重上昇が生じることになる. 本報告では, 試験体の梁端から加力点までの部分を図3のようにモデル化し, 梁端に鉄筋と機械式鉄筋継手が直列結合した複合バネを設けて, 梁の荷重と変形の関係を解析する.

4.2 梁端の軸方向鉄筋複合バネ

実験に用いた機械式鉄筋継手単体の引張試験による特定検長間の荷重と伸びの関係の実験結果の一例を図4に示す. 図5は同継手試験体の鉄筋部分の応力歪関係の測定結果であり, 図6は特定検長間の伸びから鉄筋の伸び(歪ゲージの歪 \times 鉄筋長さ)を差引いて得られた継手部分の伸びを継手長さで除した, 継手部分の見かけの応力歪関係である. 継手部分は鉄筋部分より強度が大きくなるように製作されているため, 降伏は起こらないが, 図6には鉄筋のスリーブからの抜け出しが含まれているため, 鉄筋応力が約 $0.85\sigma_y$ (σ_y :鉄筋の降伏点強度)以上のレベルで剛性低下が生じている.

継手単体6本の引張試験結果を基に, 鉄筋部分と継手部分の応力歪関係($\sigma\sim\varepsilon$ 曲線)を図7及び図8のようにモデル化した.

図7は鉄筋の $\sigma\sim\varepsilon$ 曲線のモデルを示している. 図中の破線は歪ゲージによって実測される応力歪関係であるが, 本解析では, 継手の無い通常の梁でも応力中心間距離の増加によって曲げ強度が増加することを図3のモデルで考慮するため, 鉄筋の応力歪関係で図7の実線のように降伏後の $\sigma\sim\varepsilon$ 曲線に2次勾配を持たせている. 2次勾配は, 降伏点から歪4%の点までを直線で結ぶ勾配とし, その値を $\alpha_r E_s$ とする.

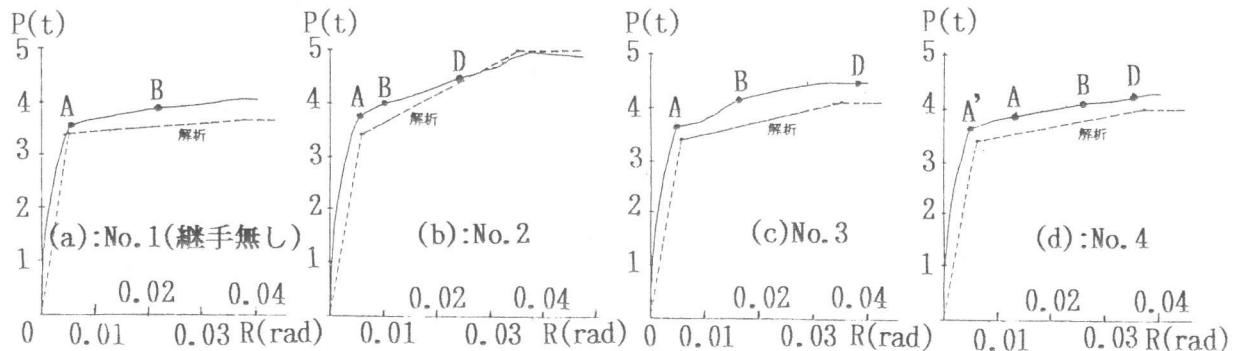


図2 荷重変形曲線

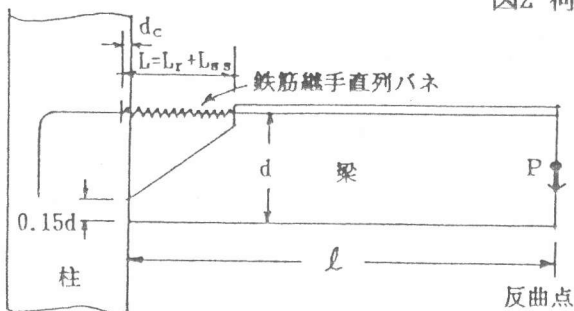


図3 解析用マクロモデル

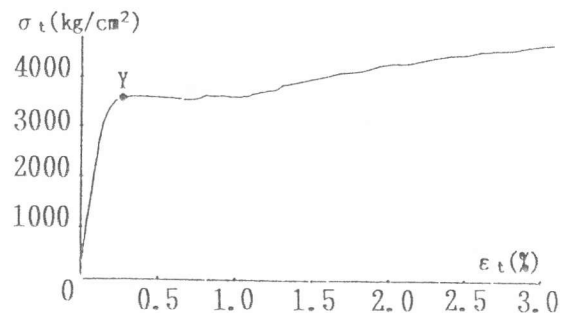


図4 継手単体引張試験結果の一例(D16)

図8は継手部分の $\sigma-\epsilon$ 曲線のモデルである。図6を参考に、 $k\sigma_y$ 以降の2次勾配を $\alpha_{ss}E_{ss}$ とする。図9は、長さ L_r の鉄筋と長さ L_{ss} の継手を直列結合した複合バネの応力歪関係である。図7と図8の記号を使うと、図9の $\sigma-\epsilon$ 曲線におけるY点及びその後の σ_t と ϵ_t は以下ようになる。

[Y点]: $\sigma_t = \sigma_y$ (1a)

$\epsilon_t = \sigma_y \{ \alpha_{ss} E_{ss} L_r + (k\alpha_{ss} - k + 1) E_s L_{ss} \} / \alpha_{ss} E_s E_{ss} L$ (1b)

[Y点以降]: $\sigma_t = k' \sigma_y$ [$k' > 1.0$] (2a)

$\epsilon_t = \sigma_y \{ \alpha_{ss} (\alpha_r + k' - 1) E_{ss} L_r + \alpha_r (k\alpha_{ss} + k' - k) E_s L_{ss} \} / \alpha_r \alpha_{ss} E_s E_{ss} L$ (2b)

4.3 複合バネの応力度の限界値

図9でモデル化した複合バネの応力歪曲線では、式2a及び式2bにおいて降伏後の応力度上昇を表す k' を任意に仮定すると、それに対応する応力度と歪が決定される。また、同モデルでは、 $\epsilon_t \leq 4\%$ の範囲を対象としているが、鉄筋部分の長さが継手部分の長さに比べて相対的に小さくなると、バネの応力度が母材鉄筋の引張強度以上になる場合もある。しかしながら、曲げを受ける梁の断面内では、断面力の釣り合い条件($T=C$, T:鉄筋の引張合力, C:コンクリートの圧縮合力)から、鉄筋の応力度は対になるコンクリートの圧縮合力の限界値までしか上昇しない。図3のマクロモデルを使用する本解析では、コンクリートの圧縮合力の限界値に対応させてバネの応力度に上限を設定する。

計算を簡単にするために、本解析では図3のモデルで梁端に歪の平面保持を仮定して、中立軸位置は圧縮縁から $0.15d$ に固定し、中立軸位置で梁端が回転変形を起こすものとする。この仮定により、引張鉄筋の歪 ϵ_t は、常に圧縮縁コンクリートの歪 ϵ_c の約5.67倍となる。塑性曲げ理論によると、梁は曲げ降伏後、 ϵ_c が0.3から0.5%で圧縮側コンクリートの抵抗モーメントが最大となることが知られている。そこで、 ϵ_c を0.3%とすると、バネの上限応力度に対応する歪 $\epsilon_{t,max}$ に関して次式が仮定できる。

$$\epsilon_{t,max} = 5.67 \epsilon_c = 1.7\% \quad (3)$$

また、塑性曲げ理論では、コンクリートの圧縮合力 C は次式で近似できることが知られている。

$$C = k_1 k_3 b d c \sigma_B \quad (c: \text{圧縮縁から中立軸までの長さ})$$

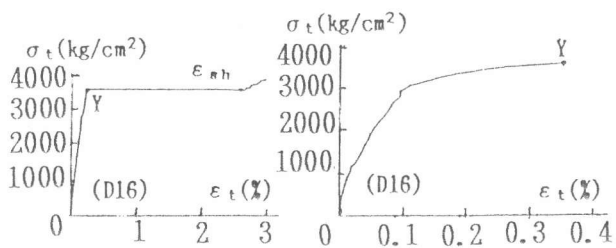


図5 鉄筋の $\sigma-\epsilon$ 曲線

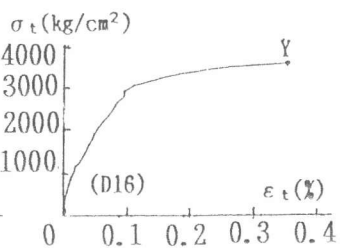


図6 継手部の $\sigma-\epsilon$ 曲線

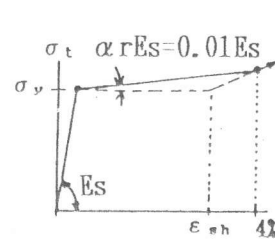


図7 鉄筋の $\sigma-\epsilon$ モデル

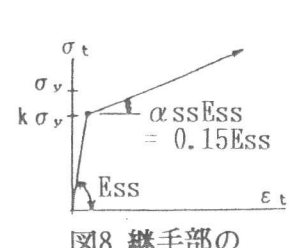


図8 継手部の $\sigma-\epsilon$ モデル

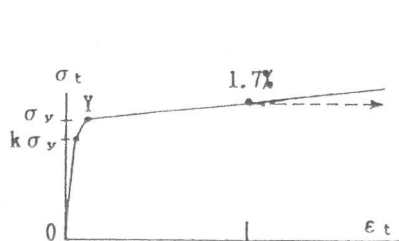


図9 鉄筋継手複合バネの $\sigma-\epsilon$ モデル

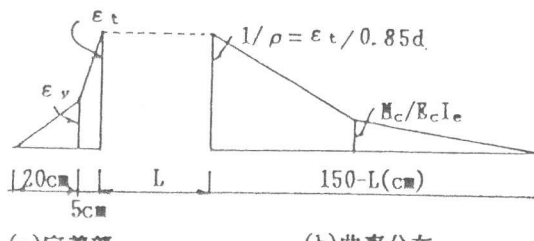


図10 定着部の歪及び梁の曲率分布の仮定

上式を引張鉄筋の合力 $T = a_t \sigma_t$ に等しく置くと、バネの上限応力に関するもう一つの条件として、式(4)が仮定できる。

$$\sigma_{t\max} = k_1 k_3 \sigma_B / p_t \quad (p_t = a_t / bd) \quad (4)$$

以上により、複合バネに関しては、式(3)と式(4)の条件を設け、いずれか小さい方の条件で制限されるものとする。なお、 $\varepsilon_t > \varepsilon_{t\max}$ の範囲では、バネは一定の応力度を保つものとする。

4.4 その他の解析仮定

梁の荷重と変形の解析にあたり次の仮定を設ける。

- ① 複合バネの長さ L は柱主筋位置からスリーブ端までの鉄筋区間 L_r とスリーブ長さ L_{ss} の和とする。
- ② 梁先端の変形 δ は、複合バネの伸びによって生じる回転変形 δ_B 、区間 L 以外の梁の曲げ変形 δ_c 、同せん断変形 δ_s 及び梁主筋の定着部からの抜け出しによって生じる回転変形 δ_{so} の和とする。
- ③ δ_B 及び δ_{so} の回転中心は引張鉄筋から $0.85d$ (d : 梁の有効せい) の位置とする。
- ④ 梁端の抵抗モーメントは、 $M = 0.95 a_t \sigma_t d$ (σ_t : 式(1)から式(4)に示した鉄筋の引張応力度の最小値、 a_t : 引張鉄筋の断面積) とする。
- ⑤ 区間 L 以外の梁の曲げ変形 δ_c の計算には、図10bに示す曲率分布を仮定する。B点の曲率は $1/\rho = \varepsilon_t / 0.85d$ 、C点の曲率は $M_c / E_c I_e$ (M_c : $1.8\sqrt{\sigma_B Z_e}$ 、 σ_B : コンクリート圧縮強度、 E_c : コンクリートのヤング係数、 I_e : 等価断面2次モーメント、 Z_e : 等価断面係数) とする。
- ⑥ 主筋の定着部からの抜け出しは、実験による定着部の歪分布を参考に図10aの歪分布を仮定し、抜け出し量は図10aの歪分布の面積とする。
- ⑦ 梁のせん断変形は、弾性変形の $1/\beta$ 倍とする。

5. 結果の考察

以上の仮定の基に、式(1)から式(4)の諸定数に以下の諸値を使用して試験体4体について変形を計算した。

$\alpha_r = 0.01$, $\alpha_{ss} = 0.15$, $k = 0.85$, $E_s = 1.76 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $E_{ss} = 2.69 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $k_1 = k_3 = 0.85$, $\beta = 0.3$ 。なお、式(2a)及び式(2b)の k' は、式(2b)の左辺を式(3)と等置して、 L_r , L_{ss} の値に応じて各試験体ごとに決定される。

試験体4体について、荷重変形関係の解析結果を実験と比較して図2に破線で示した。計算値を実験値と細かく比較すると、まだ今後の課題も種々残されているが、解析結果は概ね実験の傾向をとらえている。また、実験及び解析から、機械式鉄筋継手を梁端の降伏領域に設けても、降伏時の変形は継手の無い場合とあまり違わないが、曲げ降伏後の挙動に関しては、継手を梁端に接して設けると無視し得ない程度の荷重上昇が生じることがわかる。

図11に曲げ降伏後の荷重上昇率 R_i と部材塑性率 μ の関係を示す。降伏後の荷重上昇率(実験値)

表3: 荷重と変形の試験値及び解析値

試験体	τP_Y	$c P_Y$	$\tau P_{Y/C} P_Y$	$\tau \delta_Y$	$c \delta_Y$	$\tau \delta_{Y/C} \delta_Y$	τP_{\max}	τR_i	$c R_i$
No. 1	3.56	3.41	1.04	7.85	7.44	1.06	4.06	14%	7%
No. 2	3.73	3.41	1.09	7.55	8.01	0.94	4.98	34%	47%
No. 3	3.64	3.41	1.07	6.65	8.18	0.81	4.51	24%	21%
No. 4	3.68	3.41	1.08	7.49	8.33	0.90	4.35	18%	18%

τP_Y : 降伏荷重実験値(t), $c P_Y$: 同計算値, $\tau \delta_Y$: 降伏荷重時変形実験値(mm)
 $c \delta_Y$: 同計算値, τP_{\max} : 実験最大荷重, τR_i : 荷重上昇率, $c R_i$: 同計算値。

荷重上昇率 R_i

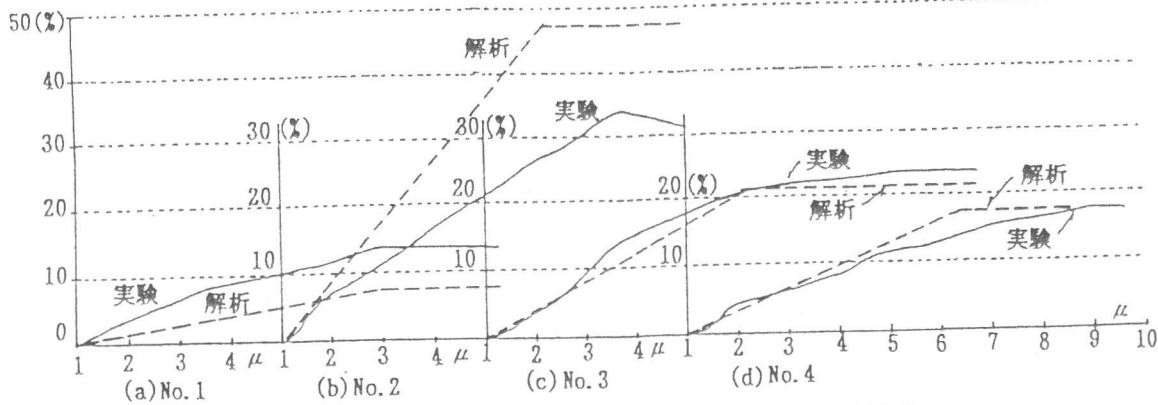


図11 荷重上昇率 R_i と部材塑性率 μ の関係

については、継手の無いものでも荷重上昇があるので、継手を設けた各試験体の荷重上昇率から継手の無い試験体の荷重上昇率を差し引いて、その値を継手の存在に起因する荷重上昇率とすると、継手を梁端に接して設けたNo. 2の場合、塑性率 $\mu=4$ ($R=1/50$)で約10%、 $\mu=8$ ($R=1/25$)で約20%程度となる。荷重上昇率を定量化するためには、更に多くの実験資料との対比が必要とされる。また、継手を梁端に接して設けたNo. 2では荷重上昇率の解析値が過大評価の結果となっている。No. 2のようにスリーブの一端を接合部内のみにのみ込ませた場合には、鉄筋がスリーブから抜け出す割合がNo. 3やNo. 4に比べて大きくなっていることも考えられ、複合バネ部の鉄筋長 L_r の仮定方法など、解析方法に関しても更に工夫が必要とされる。継手位置を梁端からある程度離すと、継手の影響による荷重上昇が緩和される。その距離 L_r の定量化についてもなお実験が必要とされるが、No. 4試験体($L_r \approx 10d_b$)は継手の無い試験体に近い挙動であった。

6. 結び

機械式鉄筋継手を梁端近傍に設けた場合の曲げ降伏後の荷重上昇について解析し、実験結果と比較検討した。梁端に接して継手を設けても、降伏時の変形に関しては、その影響は少ないが、降伏後の荷重上昇は無視し得なくなる。

本解析により曲げ降伏後の挙動を概ねとらえることができたが、RC部材の曲げ降伏後の挙動は、鉄筋の定着状況、軸力の有無、加力方法(単調載荷か繰返し荷重か)等によっても異なる。本報告では、荷重上昇のメカニズムに関する基本的性状を理解するために片持ち梁の梁端に機械式鉄筋継手を設けた試験体について一方向単調載荷による実験を行った。梁が連続する内部接合部の場合や軸力がある場合(柱)や繰返し荷重の場合には、降伏後の荷重上昇は本論の場合より小さくなることも予想される。それらについては、引き続き検討する予定である。

しかしながら、本論で対象とする荷重上昇は、ヒンジ部材のせん断設計や靱性設計、及び非ヒンジ部材の曲げ及びせん断設計において考慮する事項であるので、設計では過小評価とならないような注意が必要である。

[文献]

- [1]大久保全陸, 他: コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, 1993, pp. 689-694.
- [2]松森泰造, 他: コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, 1993, pp. 671-676.

[謝辞] 試験体作製にご協力頂いた(株)富士ピーエスに感謝します。