

# 論文 鉄筋の継手不良が RC 部材の構造性能に及ぼす影響に関する実験的研究

堀田 久人\*1・浅野 貴文\*2

**要旨：** RC 部材中の継手不良が部材の復元力特性に及ぼす影響を明らかにするため、シアスパン比 2 の RC 梁部材を対象に繰返し曲げ載荷試験を行った。部材中央に配した継手部は、引張強度が母材の降伏強度の約半分となるよう主筋を V 字に加工することで模擬しており、その変形能力は引張試験により把握している。実験の結果、継手破断以前の部材の挙動に継手部が及ぼす影響は認められなかった一方で、継手部の変形能力が小さい試験体ほど、また主筋本数が少なく、補強筋による主筋の横拘束がない試験体ほど、載荷早期に継手部が破断する傾向を示した。また、実験による知見をもとに、継手破断のメカニズムについて考察した。

**キーワード：** 鉄筋コンクリート部材、継手不良、繰返し曲げ載荷

## 1. はじめに

柱や連続梁に用いる主筋のように構造上必要な鉄筋長さを確保するため、鉄筋同士を継ぐ必要があるが、その継手位置は原則として応力の最も小さい部分に設ける事が定められている。これは万一継手の施工にミスがあったとしても、部材性能に及ぼす影響が最も小さくなるようフェイルセーフを考えているからである。

一方で、近年規定された A 級継手に代表されるように、一方向及び繰返し加力試験によって耐力、靱性及び付着に関する性能が母材と同等以上であることが認められた継手に限り、応力の最も小さい部分以外にも継手を設けることが認められている。ここで、母材と同等以上の耐力とは、すなわち継手を配した鉄筋が、引張試験において母材で破断することを意味している。しかし実際には、継手性能の良否は人的要因や気象条件を含めた施工条件により左右されるため、母材以外で破断するケースが少なからず存在しており、継手不良の発生確率をゼロとすることは現実的に難しい。

ここで、継手不良をゼロにすることが不可能ならば、逆に、継手不良の発生確率と、継手不良が構造部材に及ぼす影響の 2 点を総合的に勘案して定める“工学的に許容できる継手不良率”なるものを認めてしまう方向も考えられる。しかしそのためには、継手不良が部材の復元力特性に及ぼす影響を、継手部の材料特性と併せて調査する必要があるが、現在そのような研究は報告されていない。

そこで本研究では、母材に比べて引張強度・変形能力の小さい継手部を有する RC 梁部材を対象に繰返し曲げ載荷試験を行うことで、部材中の継手不良が部材の曲げ強度及び復元力特性に及ぼす影響を調査及び考察する。

## 2. 継手不良モデルの荷重変形特性

本実験では図-1 に示すように、D13 の異形鉄筋の一箇所に V 字に切れ込みを入れることで、鉄筋の継手不良を模擬している。この継手不良モデルの荷重変形特性を把握するため、11 本の試験片に対して引張試験を行った。鉄筋の変形量は図-2 に示す治具を試験片に取り付け、治具の左右に取り付けた変位計による測定値を平均することで求めている。なお標点距離区間は 80mm である。

継手不良モデルの荷重変形関係を図-3 の曲線に示す。各試験片における挙動のバラツキは極めて小さく、引張耐力及び変形能力、共に安定した値を示した。なお、引張荷重 18kN 程度までは標点距離区間全体として弾性であり、また、母材降伏時の引張力  $45.5\text{kN}(=358\text{N}/\text{mm}^2 \times 127\text{mm}^2)$  の約半分に相当する最大耐力 24kN を示した。なお、試験片のうち 2 本は最大耐力まで引張った後、除荷した。図中の直線は、継手部を除いた鉄筋の変形量を、標点距離 80mm と鉄筋のヤング係数  $1.91 \times 10^5 \text{N}/\text{mm}^2$  から算出した弾性剛性を用いて描いたものである。この鉄筋の変形量を継手不良モデルの変形量から差し引くと、継手不良モデルの変形能力の平均値は 0.6mm 程度となり、載荷途中で除荷した 2 本の変形能力は 0.2mm 程度となる。この変形能力 0.6mm と 0.2mm の継手不良部を配した鉄筋各 2 本を次章の曲げ載荷試験の試験体の主筋として用いた。

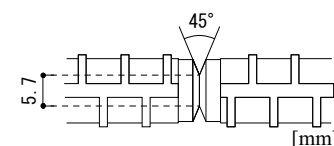


図-1 異形鉄筋継手不良モデル詳細

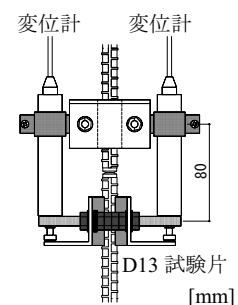


図-2 引張試験治具

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科建築学専攻准教授 工博（正会員）

\*2 東京工業大学大学院 修士課程（正会員）

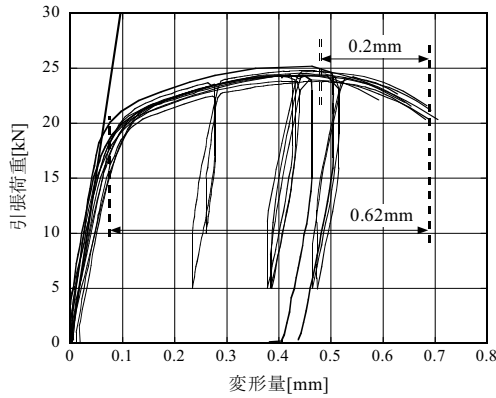


図-3 継手不良モデル荷重変形関係

### 3. 繰返し曲げせん断載荷試験概要

#### 3.1 試験体概要及び継手不良部の変形能力

図-4 に試験体概要を、表-1 に試験体諸データを、表-2, 3 に鉄筋及びコンクリートの材料特性を示す。作製した6体の試験体のパラメータは主筋本数、横補強筋の形状、継手不良部の有無とその変形能力である。試験体名は[主筋本数]{主筋径}\_S{継手不良部の変形能力}]で表し、横並びの主筋を拘束せず、せん断力に対する補強筋のみ施した1試験体には{-I}を添えている。継手

不良部を配した主筋の位置を、表-1中の部材断面に●で示しており、継手部の変形能力は、[6D13\_S06], [10D13\_S06]では約0.6mm, [6D13\_S02], [6D13\_S02-I]では約0.2mmである。

#### 3.2 加力装置及び加力方法

加力測定装置図兼曲げモーメント分布を図-5に示す。試験体のスタブをそれぞれピン支持、ピンローラー支持とする。加力はピン及びピンローラーに取り付けた加力ビームを油圧ジャッキで鉛直方向に押し引きすることで行い、ピンローラー側材端部で曲げモーメントがゼロとなるように荷重を調整した。載荷は危険断面における材端変形角で制御し、 $\pm 0.005$ ,  $\pm 0.01$ ,  $\pm 0.015$ ,  $\pm 0.02$ ,  $+0.04$  radと変形角を漸増させた。なお材端変形角は、図中の材端変形角測定治具を用いて、変位計により測定した変形量から算出している。

### 4. 載荷試験結果

#### 4.1 載荷試験結果概要

図-6に危険断面における材端モーメントと材端変形角の関係を各試験体ごとに示す。図中の破線は平面保持

表-1 試験体諸データ

試験体名	6D13	6D13_S06	6D13_S02	6D13_S02-I	10D13	10D13_S06
b×D[mm]	150×250			250×250		
試験区間長さ[mm]	500					
シアスパン比	2					
主筋	6-D13(pt=1.1%)			10-D13(pt=1.1%)		
横補強筋	D6@65(pw=0.8%)			D6@53.5(pw=0.8%)		
部材断面 ●: 継手不良部を配した鉄筋の位置						
継手不良部の有無と変形能力[mm]	無し	0.6	0.2	0.2	無し	0.6

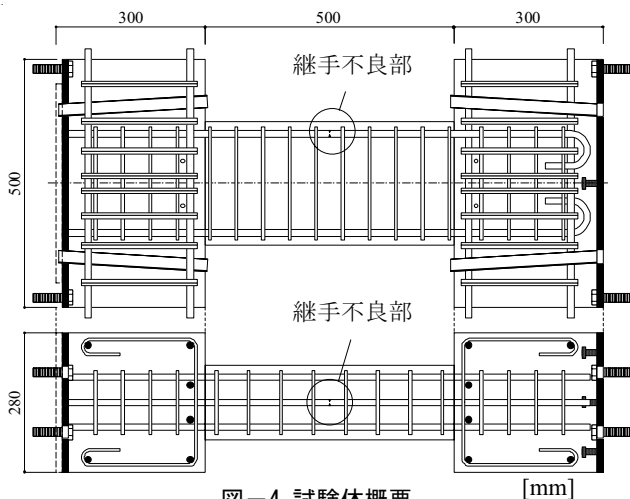


図-4 試験体概要

表-2 鉄筋の材料特性

種類	降伏強度 $\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング率 [ $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> ]
D13	358	511	1.91
D6	357	508	1.77

表-3 コンクリートの材料特性

試験体群	材齢	圧縮強度 $\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング率 [ $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> ]
6D13	28	33.4	3.2	3.36
6D13_S06	36	32.9	3.1	2.70
6D13_S02	28	31.7	3.2	2.61
6D13_S02-I	34	33.0	2.9	2.63
10D13	28	35.0	3.5	3.39
10D13_S06	33	36.2	3.3	2.68

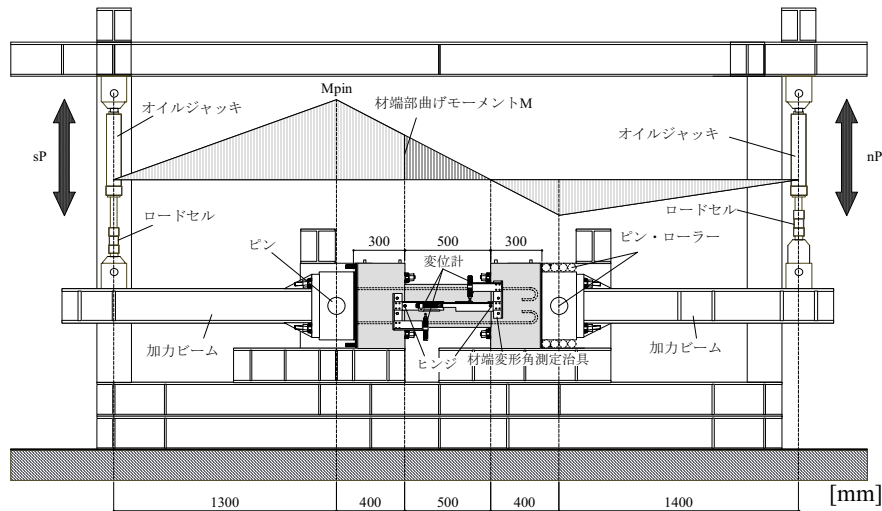


図-5 加力測定装置図及び曲げモーメント分布

を仮定した断面解析により求めた終局モーメントを表し、総じて実験結果とよく対応している。

変形能力 0.6mm の継手部を配した試験体[6D13\_S06]は、荷重 5loop(to+0.04rad)目の材端変形角+0.0216rad で最大耐力 27.5kNm を示し、継手部が破断した。変形能力 0.2mm の継手部を配した[6D13\_S02]は、荷重 2loop (to+0.01rad)目に最大耐力 28.3kNm を示した後、3loop (to+0.015rad)目+0.0146rad で継手部が破断した。同じく変形能力 0.2mm の継手部を配しながら、横並びの主筋が補強筋により拘束されていない[6D13\_S02-I]は、荷重 1loop(to+0.005rad)目に最大耐力 26.3kNm を示した後、荷重 2loop(to+0.01 rad)目+0.0044rad で継手部が破断した。

各試験体、継手破断後の耐力は最大耐力の3分の2強の値を示しており、これは鉄筋3本中、破断した鉄筋1本分の耐力が失われたものと考えてよい。また破断後、耐力は上昇せず部材の変形のみ進むが、負方向荷重時の部材の復元力特性に継手破断の影響は認められなかった。

図-7 に主筋 3 本の各試験体上面の最終破壊状況を示す。[6D13]では、危険断面寄りに曲げひび割れ及び中央主筋に沿う付着ひび割れが観察された。継手部を配した 3 試験体では、まず[6D13]と同様の曲げひび割れが生じ、継手破断と同時に部材中央に付着ひび割れが生じた。その後は、変形角の増大と共に付着ひびが危険断面まで進行し、曲げひび割れは部材中央を超える範囲にまで生じた。主筋を補強筋により拘束していない [6D13\_S02-I]では、継手破断と同時に斜め方向のひび割れも生じた。

主筋 5 本の試験体に関しては、[10D13\_S06]は変形能力 0.6mm の継手不良部を配しているにも関わらず、[10D13]の最大耐力 50.1kNm と同程度の最大耐力 49.8kNm を示し、また復元力特性についても差は認められなかった。

なお、全ての試験体は荷重終了時、写真-1 に示すような典型的な曲げせん断ひび割れが確認された。

#### 4.2 各パラメータと継手破断時の材端変形角の関係

表-4 に各試験体の正方向荷重時最大モーメント、並びに継手破断時の材端変形角及び材端モーメントの関係を示す。部材幅 150mm の試験体[6D13],[6D13\_S06],[6D13\_S02],[6D13\_S02-I]を比較する。継手部の変形能力をパラメータとした[6D13\_S06],[6D13\_S02]の結果から、継手部の変形能力が小さい試験体ほど、荷重早期に破断するといえる。また、補強筋の形状をパラメータとした[6D13\_S02],[6D13\_S02-I]の結果から、補強筋による主筋の横拘束がない試験体ほど、早期に破断するといえる。

[6D13],[6D13\_S06]及び[10D13],[10D13\_S06]はそれぞれ同一の補強筋を配しているが、断面形状及び主筋本数が異なる。部材幅 150mm 引張鉄筋 3 本の[6D13\_S06]では鉄筋が破断したが、部材幅 250mm 引張鉄筋 5 本の[10D13],[10D13\_S06]では、継手不良部が部材の曲げ強度及び変形能力に及ぼす影響は認められなかった。

#### 5. 引張試験及び曲げ荷重試験の考察

以下、継手部を配した鉄筋を“有継手鉄筋”，配していない鉄筋を“健全鉄筋”と称するものとする。

##### 5.1 コンクリートを介した主筋間の荷重伝達

主筋を補強筋により拘束していない試験体[6D13\_S02-I]が最も小さい破断変形角を示したことから、主筋の荷重はコンクリートを介して隣り合う主筋に伝達され、また、その伝達できる荷重の上限値は、コンクリートの拘束が強いほど大きいと考えられる。つまり、横補強筋を配し、荷重を伝える為に十分な拘束力を有する[6D13\_S02-I]以外の試験体では、有継手鉄筋が部材中央の継手部で負担できなくなった荷重を両側の健全鉄筋で全て肩代わりすることが出来る。逆に、補強筋による拘束のない[6D13\_S02-I]のコンクリートは、有継手鉄筋が本来負担するべき荷重を両隣の健全鉄筋に伝えきれず、主筋

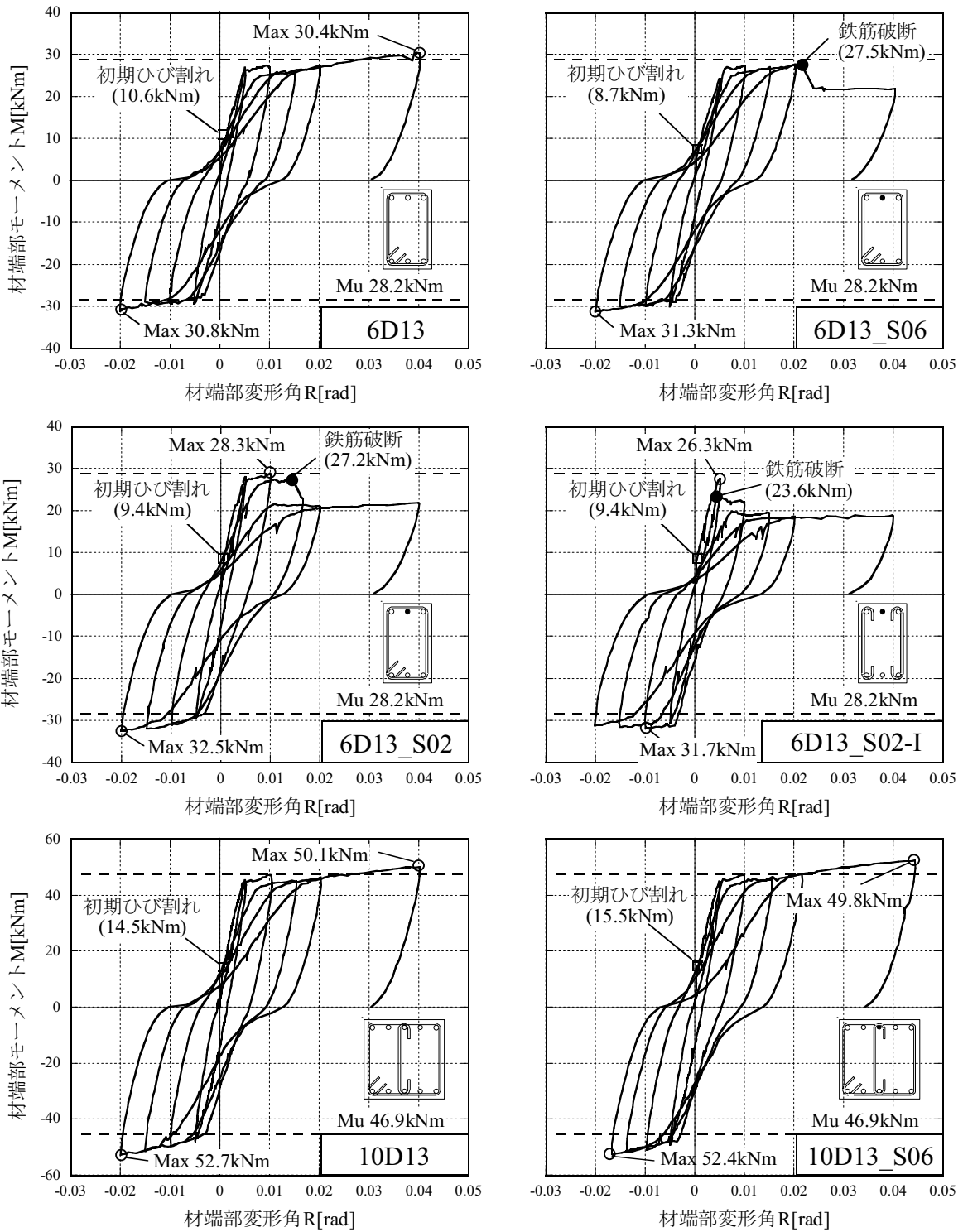


図-6 荷重試験結果 材端部モーメント-変形角関係

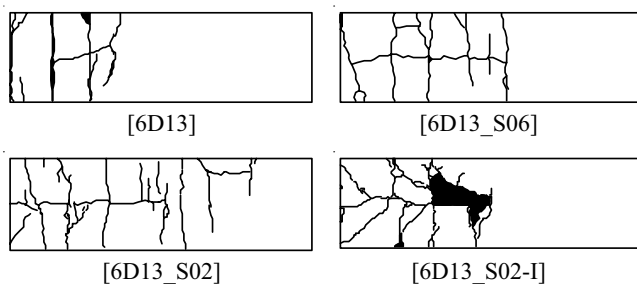


図-7 試験体上面荷重終了時ひび割れ状況

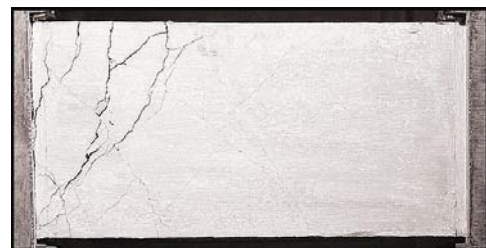


写真-1 荷重終了時ひび割れ状況

表-4 載荷試験結果 継手破断時の変形角とモーメント

試験体名	6D13	6D13 S06	6D13 S02	6D13 S02-I	10D13	10D13 S06
正方向荷重時最大モーメント[kNm]	30.4	27.5	28.3	26.3	50.1	49.8
鉄筋破断時の変形角[rad]		0.0216	0.0146	0.0044		-
継手破断時のモーメント[kNm]		27.5	27.2	23.6		-

間のせん断力により破壊したと考えられ、これは図-7に示した試験体上面の斜めひび割れからも確認できる。

5.2 継手部の変形能力から考察する継手破断メカニズム

(1) 鉄筋の歪分布の仮定

筆者らは既報<sup>2)</sup>で、試験体の主筋定着域（危険断面からスタブ内の主筋先端までの範囲）まで含めた主筋の歪量を、図-8に示す溝形加工を施した主筋に歪ゲージを貼付することで調査している。そこで、前章の曲げ載荷試験において、継手破断した変形角0.015rad、0.022radを対象に、既報<sup>2)</sup>で得たデータから主筋の歪分布を調査した。なお、調査した2試験体（歪ゲージ貼付間隔は27.5mm及び36.7mm）の諸データは、断面220×220mm、シアスパン比2、引張鉄筋比0.9%、横補強筋比（0.008及び0.006）であり、前章の試験体とほぼ同値である。ここで、既報<sup>2)</sup>の加力方法は、軸力を導入している点( $\eta = 0.15$ )で前章と異なるが、載荷後、2試験体共に写真-1と同様の曲げせん断ひび割れが生じていたことから、調査結果は前章の試験体内の主筋歪を評価し得ると判断した。

2 試験体の引張側主筋の歪分布を表-5に示す。横軸の値は対象試験体の危険断面からの距離を表しており、-284~0mmの範囲は主筋定着域である。斜線部は実験結果を表し、ひび割れに伴う局所的な歪量の増大が認められる。また、危険断面歪量の大きさによらず、主筋定着域内の降伏域長さは、定着長さの概ね2割程度である。

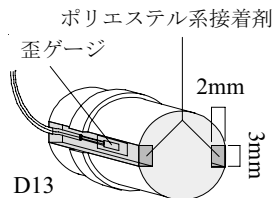


図-8 歪ゲージ処理詳細図

実験により得られた歪分布を、文献1)に倣い降伏域内で危険断面歪を頂点とする三角形分布となるようにならずことで、同表の太線に示す歪分布を得た。なお、主筋定着域内の降伏域を境に歪量の増加率を変化させている。得られた歪分布から、変形角0.022radでは、0.015radに比べて、危険断面歪が各鉄筋1.3~3倍となり、また部材範囲における主筋降伏域の広がりが確認できる。

調査結果を基に、ある変形角における健全鉄筋及び有継手鉄筋の歪分布を図-9のように仮定した。なお、定着域の降伏域長さは定着長さの2割とし、また、有継手鉄筋の部材中央における歪量は、2.で調査した継手不良モデルの最大耐力に相当する歪量、すなわち、継手破断時の継手部の直近の鉄筋の歪量  $\epsilon_{cr}$  を上限値としている。

(2) ある部材角における主筋変形量の評価

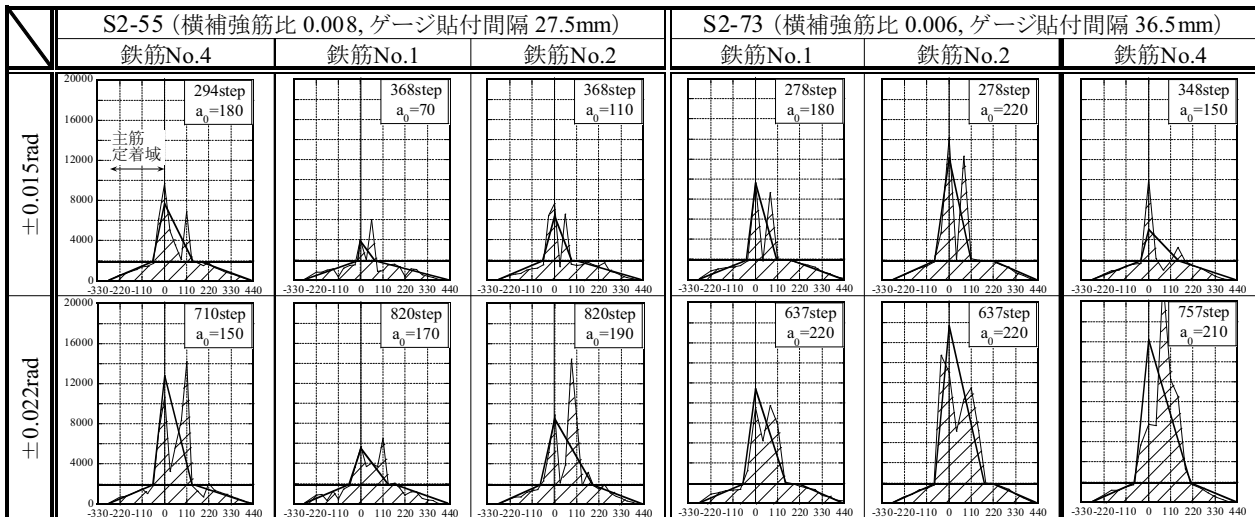
一般に部材角及び部材の変形量は曲げ成分、せん断成分、抜け出し成分の和として表される。その抜け出し成分は、主筋定着域での鉄筋変形量に相当するものと考え、全変形角からせん断成分を差し引いた変形角が、スタブ及び部材内部の鉄筋の変形により生じる変形角に相当するものと考えられる。なお、文献1)に沿って算出した部材降伏時の変形角のせん断成分は 0.0005radであった。つまり、部材降伏以降のある変形角  $R_A$  における健全鉄筋の変形量  $\delta_0$ 、有継手鉄筋の継手部を除いた変形量  $\delta_s$  及び継手部の変形量  $\Delta\delta$  の関係は、引張主筋の位置から中立軸までの距離  $d_n$  を用いて、下式で表せる。

$$(R_A - 0.0005rad) \times d_n = \delta_0 = \delta_s + \Delta\delta \quad (1)$$

(3) 継手破断時の歪分布

+0.015rad, +0.022rad における健全鉄筋と有継手鉄筋の

表-5 既報<sup>2)</sup>2試験体の引張側主筋の歪分布



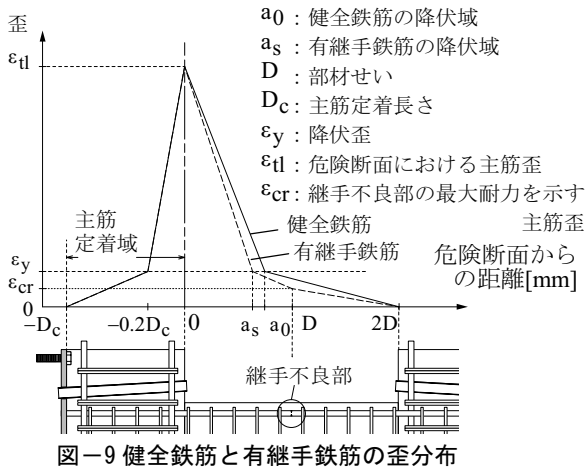


図-9 健全鉄筋と有継手鉄筋の歪分布

変形量を 5.2(2) に示した式(1)を用いて算出し、各変形角における健全、有継手両鉄筋の変形量の 4 関係を満たすように、5.2(1) で図-9 のように仮定した歪分布に適用した。ここで、表-5 を参考に、部材範囲における健全鉄筋の降伏域及び有継手鉄筋の降伏域を  $0.5D \sim D$  の範囲で定め、また  $+0.022\text{rad}$  における危険断面歪を、鉄筋が硬化し始める  $23000\mu$  程度とすると、図-10 に示す歪分布を描くことが出来る。このとき、2 変形角間で  $a_0$  は  $146\text{mm}$  から  $179\text{mm}$  へ、 $a_s$  は  $127\text{mm}$  から  $132\text{mm}$  へと広がり、また危険断面歪は約 1.5 倍となっており、描いた歪分布は概ね妥当であると考えられる。

#### (4) 継手破断時の健全鉄筋の負担荷重

$+0.015\text{rad}$  で継手破断する時、健全鉄筋及び有継手鉄筋が部材中央で負担する引張荷重は、図-10 の歪分布から、それぞれ  $32.3\text{kN}$ 、 $24.1\text{kN}$  と求まるが、このとき、もし仮に 3 本の主筋全てが健全鉄筋であれば、等しく  $29.6\text{kN}$  ずつ負担するものと考えられる。つまり、この引張荷重の平均値  $29.6\text{kN}$  と健全鉄筋の引張荷重  $32.3\text{kN}$  の差分が、コンクリートを介して健全鉄筋に伝達される荷重であると考えられ、その荷重は  $2.7\text{kN}$  である。同様に計算すると、 $+0.022\text{rad}$  での健全及び有継手鉄筋が部材中央で負担する引張荷重は、それぞれ  $35.7\text{kN}$ 、 $24.1\text{kN}$  であり、健全鉄筋は  $3.8\text{kN}$  の荷重が伝達されている。

### 5.3 荷重履歴における主筋本数の影響

継手部が破断するためには、健全鉄筋は有継手鉄筋より、継手部の変形量だけ余計に伸びなければならない。ここで前述のように、有継手鉄筋が本来負担すべき荷重がコンクリートを介して各健全鉄筋に等分配されるものとする、1 本あたりの追加負担荷重は、主筋 3 本の時に比べて 5 本の時の方が小さい。そのため健全鉄筋に分布する歪量は主筋 3 本のときに比べて 5 本のときのほうが小さくなると同時に、有継手鉄筋の変形量と健全鉄筋の変形量との差、すなわち継手部の変形量も小さくなるため、本実験において、主筋本数の多い[10D13\_S06]の継手部は破断しなかったと考えられる。

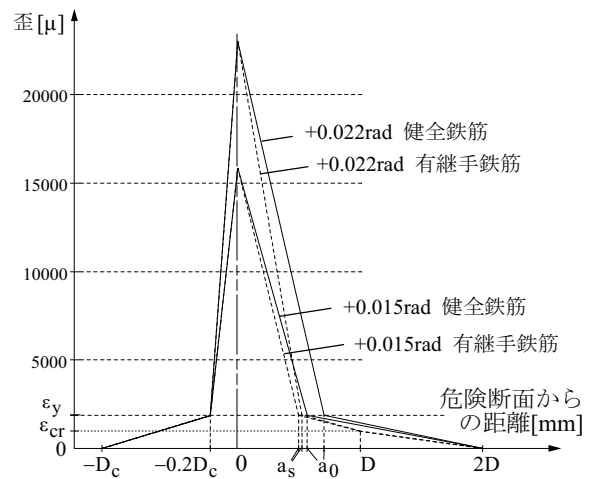


図-10 継手破断時の歪分布

## 6. 結論

継手不良部を有する RC 梁部材を対象に行った繰返し曲げ荷重試験により、以下の知見を得た。

- (1) 継手部が破断に至るまでは、継手不良が部材の復元力特性に及ぼす影響は認められない。
- (2) 継手部の変形能力が小さい試験体ほど、また主筋本数が少なく、補強筋による主筋の横拘束がない試験体ほど、荷重早期に継手部が破断する。
- (3) 継手破断後の試験体の耐力は、破断した鉄筋の耐力相当だけ低下するが、ほぼ一定値を示し、安定している。また、破断した鉄筋が圧縮側となるときには、継手部が部材の復元力特性へ及ぼす影響は認められない。
- (4) 試験体の諸条件及び継手不良の程度によっては、(例えば本試験体[10D13-06]のように、)材端変形角が  $+0.04\text{rad}$  に達しても継手部は破断せず、また部材の復元力特性に及ぼす影響は認められない。

また、荷重試験により得られた継手破断時の変形角と、引張試験により得られた継手部の変形能力との関係から、各鉄筋の変形量を説明し得る、主筋の歪分布を推定した。

以上の結果は継手部の変形能力が鉄筋の破断に深く関与していることを示しており、継手鉄筋を有する部材の構造性能を的確に評価するためには、今後の抜き取り検査において、試験片の引張強度だけでなく変形能力も併せて調査する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説, pp139-151, 2004.1
- 2) 貝塚祐樹, 堀田久人, 滝見直之：繰返し曲げ荷重を受ける RC 柱脚部の主筋歪及び応力に関する実験的研究(その 2 主筋歪及び応力分布に関する考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 構造IV, pp.207-208, 2003.