

論文 継手不良を有する RC 部材の主筋挙動に関する実験的研究

堀田 久人^{*1}・淵澤 健一^{*2}

要旨: 継手不良部が破断するメカニズムを明らかにすることを目的とし、継手不良部を有する RC 梁部材に対して繰り返し曲げせん断載荷試験を行った。継手部が破断するまでの主筋の歪分布を得るために主筋に歪ゲージを貼付した試験と継手破断にシアスパン比が与える影響を調査するため、シアスパンを変化させた試験の 2 つの試験を行い、試験結果を基に継手不良部から健全な鉄筋へ応力が伝達するモデルを提案した。このモデルが成り立たなくなると継手部が破断する。このとき付着応力の増大に伴うすべり量の増大で決まる場合と継手位置の健全な鉄筋の降伏で決まる場合があり、試験体による継手破断メカニズムの違いを示した。
キーワード: RC 梁部材, 継手不良, 主筋の歪分布, 繰り返し曲げせん断載荷, 応力伝達

1. はじめに

筆者らは既往研究¹⁾において母材と比較して引張強度、変形能力の小さい継手不良部が RC 梁部材の曲げ強度、及び復元力特性に与える影響について研究を行っている。その結果、継手部は変形能力が小さいほど、主筋の本数が少ないほど、横補強筋による主筋の拘束が無いほど早期に破断するという結論を得た。しかし、強度が母材の降伏荷重の約半分程度である継手部を有していても継手破断に至らない試験体も存在しており、継手破断のメカニズムについては不明な点が多い。

そこで本研究は継手破断のメカニズムを明らかにすることを目的とし、継手破断に至るまでの主筋の歪分布を調査するため、既往研究と同一の試験体を作製し、主筋に歪ゲージを貼付し繰り返し曲げせん断載荷試験を行った。また、継手破断にシアスパン比が与える影響を調査するため、シアスパン比の異なる試験体についても繰り返し曲げせん断載荷試験を行った。試験体は各試験について継手部の変形能力が異なる試験体を 2 体用意し、計 4 体とした。2 つの試験を基に、各試験体の継手部の変形能力と破断時の変形角との関係を説明し得る継手破断モデルを提案する。

2. 継手部の材料特性

主筋歪分布測定試験では試験体のシアスパン比を 2 とし、シアスパン比の異なる試験ではシアスパン比を 3 としている。試験体名称は Sh{シアスパン比}-S{継手部の変形能力}とする。両試験共に継手不良部を図-1 のように D13 の鉄筋に V 字型に切り込みを入れることで模擬している。歪分布測定試験では歪ゲージを貼付するための主筋の溝型加工に加えて一部 V ノッチの加工を施している。鉄筋の V ノッチ部の断面積は母材部分の約 20% である。図-2 に両試験に使用した継手部と同一な試験片の

引張試験結果をそれぞれ示す。継手部の引張試験は既往研究¹⁾と同様に評点区間 80mm の変形量と継手部から $2.5d_b=32.5\text{mm}$ 離れた位置での歪を測定している。継手部の変形能力は継手破断時の変形量から母材の歪に評点区間の長さをかけて求めた弾性変形量を差し引いたものを平均している。

歪分布測定試験体に用いた継手部の変形能力は 0.39mm であり、シアスパン比を 3 とした試験体に用いた継手部の変形能力は 0.52mm であった。また、引張試験途中で除荷することにより任意の変形能力を持つ継手部を作製することができる。本研究では図中に示すように載荷途中で除荷を行い、変形能力が 0.2mm となる継手部を作製し、試験体に組み込んでいる。

継手部の引張試験結果には最大荷重にややばらつきがあるが、これは加工段階での断面積のばらつきに起因するものであるため、試験体に組み込んだ継手部の最大

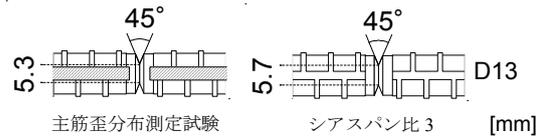


図-1 継手不良モデル詳細図

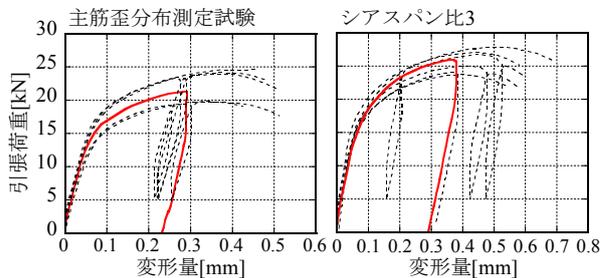


図-2 継手不良モデルの荷重-変形関係

表-1 継手部の変形能力,最大耐力

	Sh2-S04	Sh2-S02	Sh3-S05	Sh3-S02
継手変形能力 [mm]	0.39	0.18	0.52	0.22
最大耐力 [kN]	23.6	22.4	26.0	26.1
継手部最大耐力比 γ	0.63	0.59	0.58	0.58

*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)

荷重は測定した断面径から、各試験片の最大荷重-断面積関係の回帰直線より推定している。表-1 に各試験体に組み込んだ継手部の変形能力、最大荷重、母材の降伏荷重に対する最大荷重の比 γ を示す。

3. 主筋歪分布測定試験

3.1 試験体概要

試験体概要を図-3 に、試験体諸データ及び使用した材料特性を表-2、表-3 に示す。使用したコンクリートでは、原因は不明であるが材齢の大きい供試体の圧縮、引張強度が材齢 28 日の供試体よりも小さい値となった。

試験体の断面は 150×250mm 有効横補強筋比は 0.8% としている。主筋には D13 を 6 本使用し、フープ筋には D6 を使用している。

継手を模擬した V ノッチ加工を有する鉄筋は初期荷重方向時に引張側となる鉄筋群の中央に配し、継手位置は危険断面から梁せい D 離れた位置とした。試験体の危険断面側は厚さ 12mm のエンドプレートに主筋をアーク溶接することで定着をとっている。継手部に溶接による熱応力が生じるのを防ぐため、反対側は直線定着とした。

3.2 歪測定方法

試験体の全ての主筋に図-4 のように鉄筋軸方向のリブを切削し幅 4mm、深さ 1.5mm の溝型加工を施している。主筋の断面積は引張試験を行い、未加工の鉄筋と降伏荷重を比較することで算定した。算定した溝型加工鉄筋の断面積は 106.5mm² であり、これは D13 の公称断面積 127 mm² の 83.8% である。

積 127 mm² の 83.8% である。

図-5 に歪ゲージの貼付位置とコードの配線方法を示す。歪ゲージはゲージ長 2mm のものを用い継手部を含む横並びの主筋群と反対側の中央の鉄筋、計 4 本に継手位置からフープ筋間隔の半分となる 32.5mm 間隔で危険断面側のスタブから試験区間全域にわたる 24 点について裏表両面に貼付している。ゲージ貼付後、ポリエステル系接着剤で塗り固め養生を行った。なお、継手部には歪ゲージを貼付していない。ゲージを貼付した鉄筋を NO.1 から No.4 とする。継手部を有する鉄筋は NO.2 である。コアコンクリート内のゲージコードは試験体中央に配した $\phi 6$ に沿わせてスタブから外に出している。 $\phi 6$ の丸鋼はコンクリート打設後に定着を除去しており、耐力に寄与しない。試験区間のカバーコンクリート側のゲージコードは試験体外側に直接コードを出している。

3.3 荷重方法

加力装置模式図および曲げモーメント図を図-6 に示す。荷重はスタブの両側をそれぞれピン支持、ピンローラー支持とし、加力ビームをオイルジャッキで上下に押し引きすることによって行っている。ピンローラー側の試験区間端部で曲げモーメントがゼロになるように加力を調整した。図中に示す治具を用いて測定した変形量から材端部変形角を算出し、荷重はこの材端部変形角が ± 0.005 , ± 0.01 , ± 0.015 , ± 0.02 , $+0.04$ となるよう漸増させている。なお、材端部変形角は継手部が引張を受ける方向に正をとる。

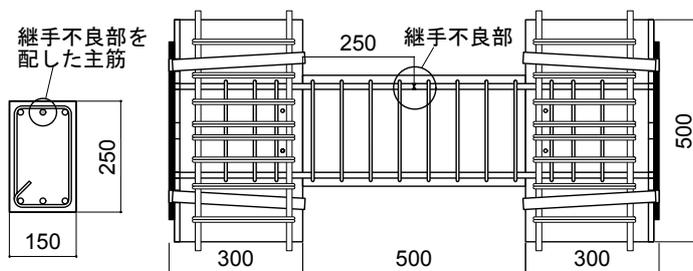


図-3 試験体概要 [mm]

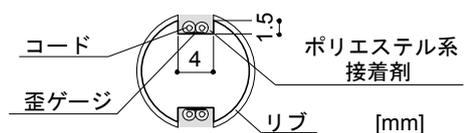


図-4 溝型加工鉄筋詳細

表-2 試験体概要

試験体名	Sh2-S04	Sh2-S02
試験時材齢 [日]	43	45
b×D [mm]	150×250	
試験区間長さ [mm]	500	
シアスパン比	2	
主筋	6-D13 ($p_t=0.98\%$)	
横補強筋	D6@65($p_{we}=0.8\%$)	

表-3 材料の力学特性

コンクリート

材齢 [日]	圧縮強度 [N/mm ²]	割裂強度 [N/mm ²]	ヤング率 [$\times 10^4$ N/mm ²]
28	33	3.4	2.64
48	32.1	3.1	2.32

鉄筋

種類	降伏応力 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	ヤング率 [$\times 10^5$ N/mm ²]
D13	354	552	1.95
D13(溝型加工)	-	551	2.00
D6	383	545	1.97



図-5 ゲージ貼付位置及び配線方法 [mm]

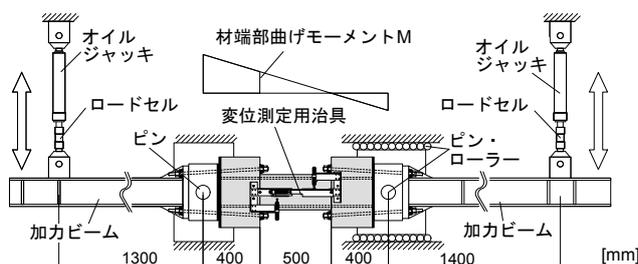


図-6 加力模式図及び曲げモーメント分布 [mm]

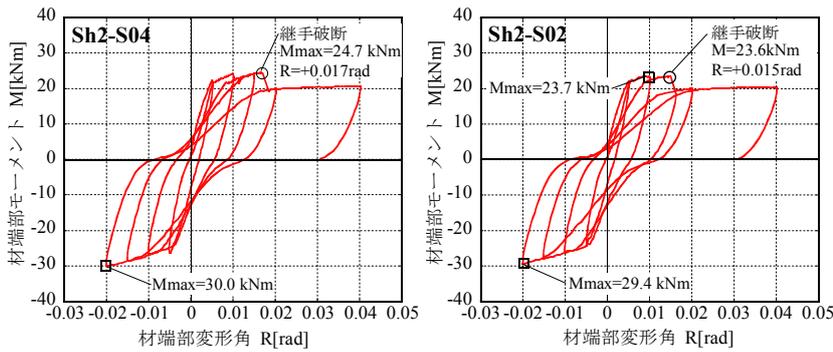


図-7 材端部変形角-材端部モーメント関係

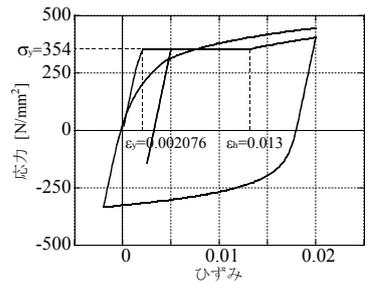


図-9 応力-歪関係

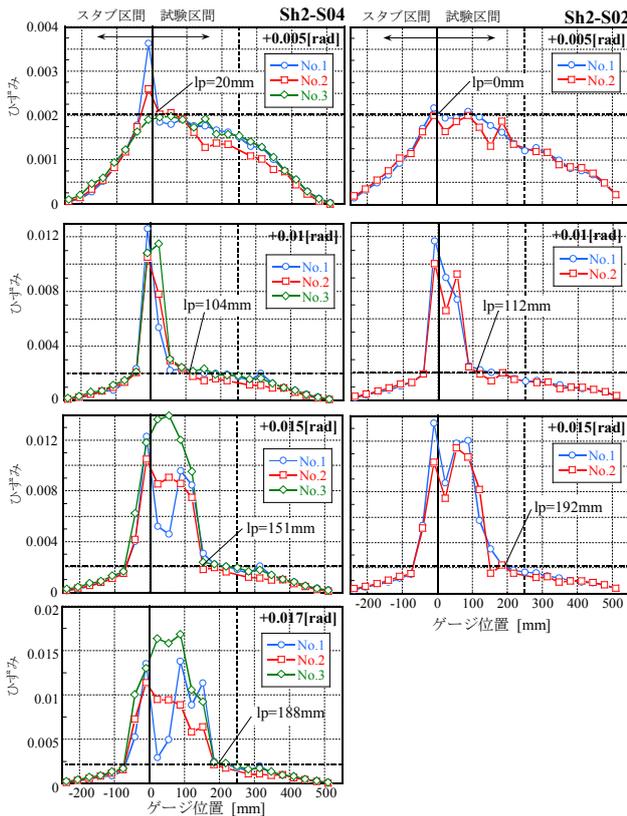


図-8 各最大変形角時の主筋の歪分布

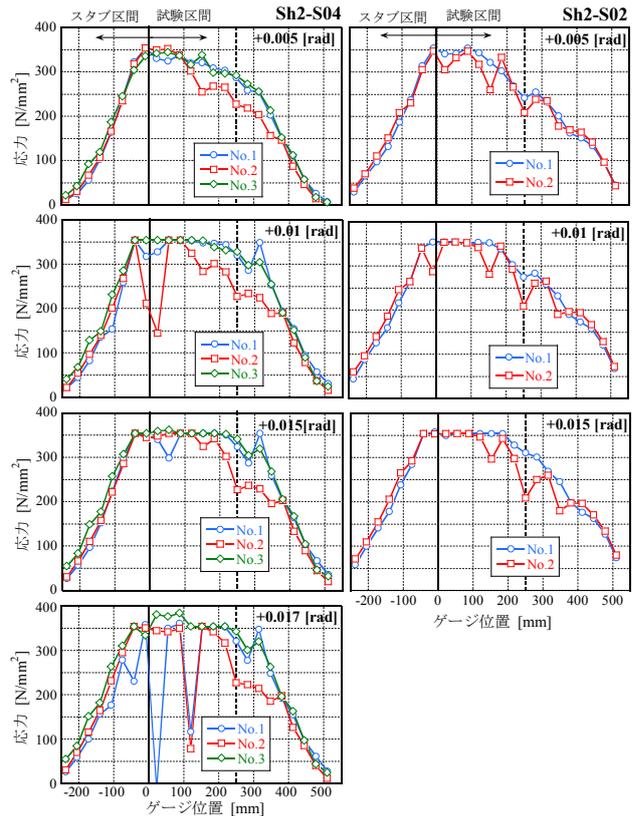


図-10 各最大変形角時の主筋の応力分布

3.4 試験結果

本節以降、継手部を有する鉄筋を有継手鉄筋、有継手鉄筋と横並びの主筋を健全鉄筋と呼ぶ。

(1) 材端部変形角-材端部モーメント関係

図-7 に各試験体の材端部変形角-材端部モーメント関係を示す。試験体 Sh2-S04 は 4 ループ目変形角+0.02rad 目指す途中、変形角+0.017rad で継手部が破断した。試験体 Sh2-S02 は 3 ループ目の最大変形角+0.015rad で継手部が破断した。継手破断後も継手部が圧縮側となる場合の復元力特性に変化は見られず、それに対して継手部が引張側の場合、継手破断後の耐力は最大耐力の 2/3 程度となる。これは有継手鉄筋分の耐力が低下したものである。

(2) 主筋の歪分布

図-8 に各载荷ループ最大変形角時及び継手破断時の主筋の軸方向歪分布を示す。横軸は危険断面を原点にとり、図中の点線は継手位置を表している。歪は各測定点

での両面の歪の値を平均したものである。試験体 Sh2-S02 に関しては鉄筋 NO.3、4 の歪ゲージの多くが载荷前に測定不能となったため、鉄筋 No.1、2 の歪分布のみ示す。材端部変形角が+0.005rad で一部の鉄筋は危険断面近傍の歪が図中の一点鎖線で示した降伏歪($\epsilon_y=2076\mu$)を越えている。この時、試験体の歪分布はモーメント分布通りとなる三角形分布よりも大きくなっており、テンションシフトによる歪増分が生じている。試験体 Sh2-S04 では鉄筋 No.1、2 よりも No.3 の主筋の歪分布が大きくなっており、局所的な歪の増減が見られる。

既往研究¹⁾における考察とは異なり、健全鉄筋と有継手鉄筋の歪が降伏歪を越えて急増する降伏領域は概ね一致している。また、図中の lp は有継手鉄筋の歪が降伏歪を越えた区間を歪測定点の間で歪が線形に分布するものとして求めたものである。この lp は健全鉄筋、有継手鉄筋の降伏領域と対応しており、各変形角時における

試験体の降伏領域長さとする。試験区間内部では変形角の増大と共に降伏領域が広がっていくがスタブ内部では降伏領域は最大で $5.8d_b (=75\text{mm})$ 程度で一定となる。

歪分布全体を積分した変形量で比較すると試験体 Sh2-S04 では継手部が破断する直前の $+0.017\text{rad}$ で鉄筋 No.1-3 の変形量がそれぞれ 2.55mm , 2.40mm , 3.61mm となり、NO.3 の変形量がかなり大きく、健全鉄筋で平均すると有継手鉄筋の変形量より約 0.7mm 大きい。試験体 Sh2-S02 では破断直前の $+0.015\text{rad}$ で鉄筋 No.1-2 の変形量が 2.57mm , 2.34mm となり、変形量の差としては約 0.23mm と継手部の変形能力と対応している。

(3) 主筋の応力分布

図-9 に示す Ramberg-Osgood 関数で表される応力-歪関係より各鉄筋の応力を求めた。図-10 に継手破断時までの各載荷ループで最大変形角時の鉄筋の応力分布を示す。危険断面を原点に取り、図中の点線は継手位置を表す。なお、有継手鉄筋の継手位置における応力は継手部の材料試験から求めた最大耐力時の母材の応力としている。変形角 $+0.005\text{rad}$ の場合、試験体 Sh2-S04 では継手位置において、健全鉄筋の応力が継手部の最大応力を上回っており、健全鉄筋と有継手鉄筋では応力に差が生じている。その区間は継手部を中心に $20d_b (=260\text{mm})$ に及ぶ。試験体 Sh2-S02 では明確に現れてはいないが、傾向として両試験体ともに健全鉄筋と有継手鉄筋の応力に差が生じる区間があることや、変形角の増大と共に継手位置での健全鉄筋と有継手鉄筋の応力差は大きくなること、応力差が生じる区間は変形角の増大と共に降伏領域の進展により減少することがあると判断できる。

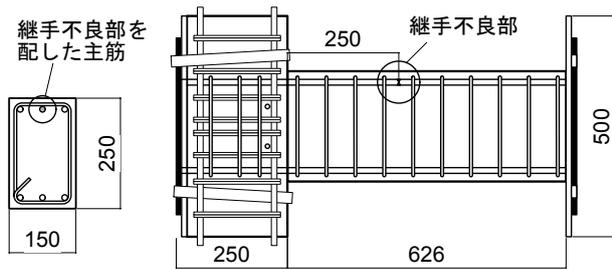


図-11 試験体概要 [mm]

4. シアスパン比を3とした載荷試験

4.1 試験体概要

試験体概要を図-11 に、試験体諸データを表-4、表-5 に示す。鉄筋の材料特性、試験体断面、有効横補強筋比は歪分布測定試験体と同一である。継手位置は危険断面から梁せい D 離れた位置とし、継手部を中心に間隔 65mm で横補強筋を配している。主筋は両端をエンドプレートにアーク溶接する事で定着をとった。有継手鉄筋に関しては溶接による熱応力が生じるのを防ぐため、片端の溶接をコンクリート打設後、4週経過した後にいった。

4.2 載荷方法

加力装置模式図及び曲げモーメント図を図-12 に示す。試験体スタブ側をピン支持、試験区間端部をピン・ローラー支持としている。載荷はピン側の加力ビームをオイルジャッキで上下に押し引きすることで行い、材端部変形角が ± 0.005 , ± 0.01 , ± 0.015 , ± 0.02 , $+0.04$ となるよう漸増させている。

4.3 試験結果

図-13 に各試験体の材端部変形角-材端部モーメント関係を示す。シアスパン比3の試験体は共に3ループ目、 $+0.015\text{rad}$ に向かう途中で、試験体 Sh3-S05 は $+0.008\text{rad}$ で Sh3-S02 は $+0.011\text{rad}$ で継手部が破断した。本試験では、変形能力の大きい継手部を有する試験体 Sh3-S05 の方が早期に継手破断するという結果となった。また、両試験体ともシアスパン比2の試験体よりも早期に継手部が破断している。

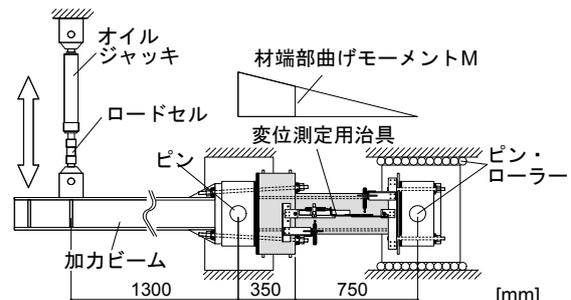


図-12 加力装置模式図及び曲げモーメント図 [mm]

表-4 試験体諸データ

試験体名	Sh3-S05	Sh3-S02
試験時材齢 [日]	33	35
$b \times D$ [mm]	150×250	
試験区間長さ [mm]	626	
シアスパン比	3	
主筋	6-D13($p_f=1.1\%$)	
横補強筋	D6@65($p_{we}=0.8\%$)	

表-5 コンクリートの力学特性

材齢 [日]	圧縮強度 [N/mm^2]	割裂強度 [N/mm^2]	ヤング率 [$\times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$]
28	33.1	3.2	2.48
35	32.7	3.4	2.47

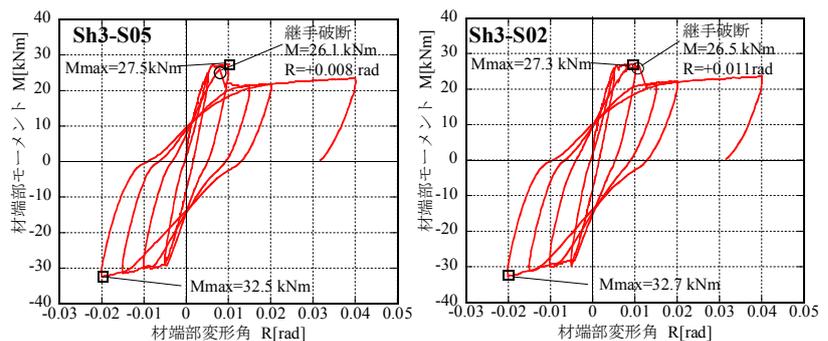


図-13 材端部変形角-材端部モーメント関係

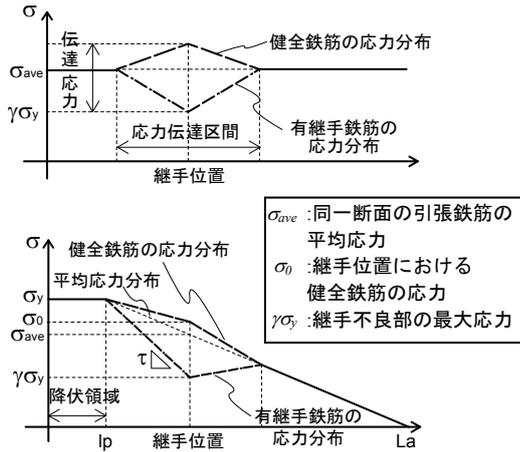


図-14 応力伝達モデル

5. 継手破断のメカニズム

5.1 応力伝達モデル

継手部が最大耐力に達すると有継手鉄筋は継手位置でそれ以上の応力を負担できなくなるため、コンクリートを介して健全な鉄筋に応力を伝達し継手部と同一断面での引張鉄筋の平均応力として必要な大きさを保つと考えられる。このとき各鉄筋の応力分布は図-14上のようになり継手部での応力差を伝達するために、ある伝達区間において健全鉄筋と有継手鉄筋に応力差が生じる。このとき伝達区間での健全鉄筋と有継手鉄筋の歪分布の差を積分した量がモデルが成立するのに必要な継手部の変形量となる。

伝達区間の長さを 3.4 節の図-10 で示した試験体 Sh2-S04 の変形角+0.005rad における応力分布から継手位置を中心として $20d_b (=260\text{mm})$ とする。また、応力分布の推移をみると、降伏領域が進展するにつれて継手位置より危険断面側の応力伝達区間は短くなっていくが反対側の伝達区間は一定のままで変化しておらず、モデルにおいても継手部以降の伝達区間の長さは変化しないものとした。また、降伏領域外は応力が線形に分布し、反曲点で応力が 0 となると仮定する。以上の仮定よりある継手位置 x における引張鉄筋の平均応力 σ_{ave} は降伏領域 lp 、せん断スパン L_a を用いて式(1)で表される。

$$\sigma_{ave} = \frac{L_a - x}{L_a - lp} \sigma_y \quad (1)$$

この平均応力 σ_{ave} と継手部の最大応力 $\gamma\sigma_y$ の差を横並びの N 本の主筋が負担すると健全鉄筋の応力 σ_0 は式(2)となる。このときの各鉄筋の応力分布は図-14下を示す。

$$\sigma_0 = \sigma_{ave} + \frac{\sigma_{ave} - \gamma\sigma_y}{N} \quad (2)$$

図-15 は実際の継手破断時の応力分布と応力伝達モデルによる応力分布である。試験体 Sh2-S04, Sh2-S02

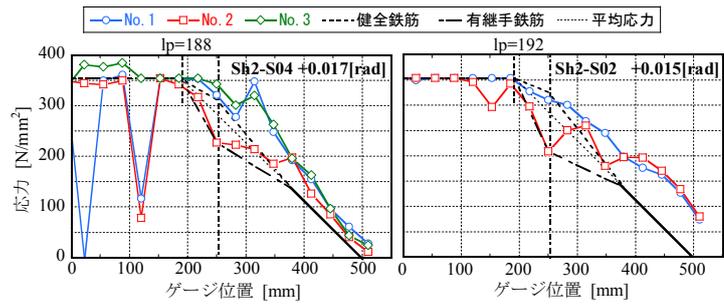


図-15 継手破断時の応力分布モデル

共に降伏領域外での実際の応力分布は線形ではなく伝達モデルの応力分布よりも大きい値をとっているが、両試験体共に健全鉄筋は継手位置で降伏していない。継手破断時の有継手鉄筋の降伏領域は試験体 Sh2-S04, S02 それぞれ $lp=188, 192\text{mm}$ である。このとき、伝達モデルをつくるのに必要な継手部の変形量は $0.05\text{mm}, 0.065\text{mm}$ となる。これは変形能力のそれぞれ 13%, 36%となる。

3.4 節の図-8 で示したように有継手鉄筋と健全鉄筋の降伏領域は概ね一致しており、継手位置から危険断面側の伝達区間での有継手鉄筋の応力差より、この区間の有継手鉄筋の平均付着応力は式(3)で表される。

$$\tau = \frac{(1 - \gamma)\sigma_y A}{(x - lp)\psi} \quad (3)$$

A は主筋 1 本当りの断面積、 ψ は周長である。各試験体の付着応力、継手位置での健全鉄筋の応力を式(2), (3)より求めると Sh2-S04 では $\tau_u = 5.5\text{N/mm}^2$, $\sigma_0 = 312\text{N/mm}^2$, Sh2-S02 では $\tau_u = 6.7\text{N/mm}^2$, $\sigma_0 = 327\text{N/mm}^2$ となる。実際の σ_0 は Sh2-S04 では鉄筋 No.1 が $\sigma_0 = 321\text{N/mm}^2$, No.3 が $\sigma_0 = 342.7\text{N/mm}^2$ であり、Sh2-S04 の No.1 は $\sigma_0 = 310.5\text{N/mm}^2$ である。ここで継手部の変形量は伝達モデルが成立するのに必要な変形量と鉄筋のすべり量を足し合わせたものと考えられるので、シアスパン比 2 の試験体では降伏領域の進展に伴い、付着応力とすべり量が増大し、継手部の変形能力に達したため破断に至ったものと考えられる。

次にシアスパン比 3 の試験体で応力伝達モデルが成り立たなくなる場合を推測する。シアスパン比 3 の試験体では γ が同程度であれば降伏領域が等しい場合、シアスパン比 2 の試験体よりも σ_0 は大きくなる。継手位置の健全鉄筋の応力 σ_0 が降伏応力 σ_y に達するとき、伝達モデルが成り立たなくなり、継手部の変形が進み、破断に至る。式(2), (3)に $\gamma=0.58$, $\sigma_0=\sigma_y$, $L_a=750$ を代入して解くと $lp=169\text{mm}$, $\tau=5.83\text{N/mm}^2$ を得る。シアスパン比 2 の試験体と同様に $\sigma_0=\sigma_y$ となる時、式(2), (3)に γ を各試験体の平均値として $\gamma=0.61$, $\sigma_0=\sigma_y$, $L_a=500$ を代入すると $lp=213\text{mm}$, $\tau=9.8\text{N/mm}^2$ となる。この値はシアスパン比 2 の試験体の継手破断時の τ 及びシアスパン比 3 の試

験体で $\sigma_0 = \sigma_y$ としたときの τ よりかなり大きい。したがって、シアスパン比3の試験体では降伏領域の進展に伴い継手位置での伝達応力が大きくなり、健全鉄筋が降伏することによって継手部の変形が進み破断に至ったものと考えられる。

また、降伏領域は変形角+0.008, +0.011radで $lp=169\text{mm}$ となるので、シアスパン比2の試験体と比較して降伏領域の進展が早かったものと推察される。

5.2 継手部変形能力と継手破断時の変形角の関係

シアスパン比2の試験体における降伏領域と付着応力との関係は式(3)中の γ を $\gamma=0.61$ とすれば図-16となる。この付着応力に応じてすべり量が図-17中の実線のように2次剛性を持つ関係になると仮定すると、付着応力がある値以上ですべり量の増加が大きくなる。ここで図中の点線は森田ら²⁾による付着応力-すべり量の関係式を $\tau_{\max}=7.25\text{N/mm}^2$, $S_{\max}=0.6\text{mm}$ としたものである。また、図-18に歪分布を測定した試験体の有継手鉄筋である鉄筋 No.2 が破断するまでの各ループ最大変形角時の降伏領域を示す。図中の実線は2次曲線でプロット間を近似したものであり、これをシアスパン比2の試験体における降伏領域-材端部変形角関係とする。

これら図-16, 図-17, 図-18から継手部の変形能力と継手破断時の材端部変形角関係は図-19中の実線のようになる。図中のプロットは既往研究の結果も含めて、試験結果を示したものである。歪を測定した2体の試験結果については変形能力と破断時の変形角の関係が対応している。

シアスパン比3の試験体の降伏領域-材端部変形角関係は不明ではあるが、変形角+0.005radでは試験体は弾性であるとし、継手位置の健全鉄筋が降伏する時の降伏領域 $lp=169\text{mm}$ にSh3-S02の継手破断時の変形角+0.011rad

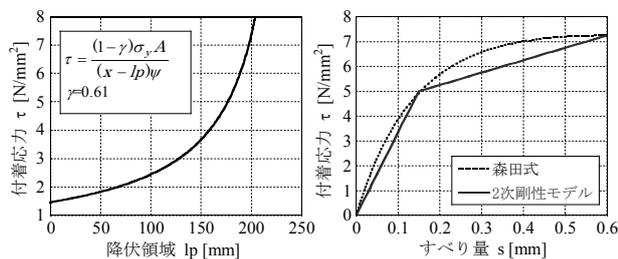


図-16 降伏領域-付着応力関係

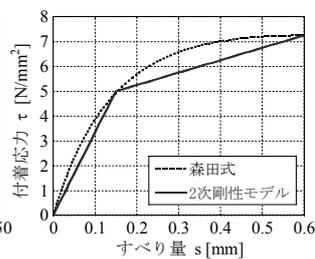


図-17 付着応力-すべり量関係

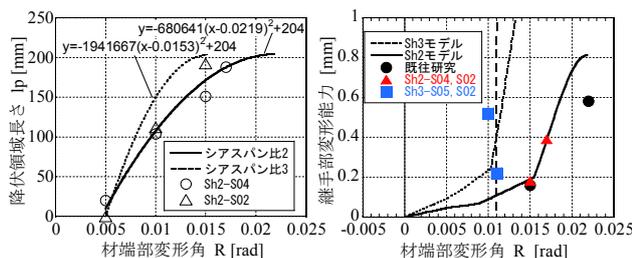


図-18 降伏領域-変形角関係

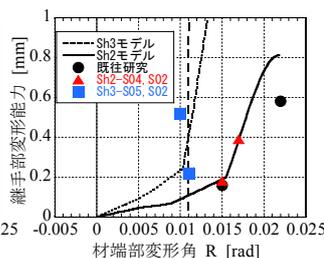


図-19 継手部の変形能力-破断時変形角関係

で達し、シアスパン比2の場合の降伏領域-材端部変形角関係の頂点をx軸方向に移動させた図-18中に点線で示す放物線とした。この関係と図-17の付着応力-すべり量関係及び式(3)から同様に継手部の変形能力-破断時の変形角関係を図示すると図-19中の点線となる。変形角が継手位置の健全鉄筋が降伏するときの変形角(図中の破線)に達すると、継手部の変形が大きく進み破断に至る。このとき、図に示すように破断する変形角の変形能力に対する依存性はなくなる。以上より、付着応力-すべり量関係を仮定することによって試験結果の継手破断時の変形角と継手変形能力の関係の概略を示せた。

6. 結論

継手不良部を有する RC 梁部材の繰り返し曲げせん断荷試験として主筋歪分布測定試験とシアスパン比を3とした試験を行い、試験結果より以下の知見を得た。

- 1) 継手不良部を有する鉄筋と横並びの健全鉄筋では降伏領域が概ね一致する。
- 2) 健全鉄筋と継手部を有する鉄筋の応力分布では継手部を中心に負担する応力に差が生じる区間があり、継手部より危険断面側ではこの区間は降伏領域の進展により短くなる。
- 3) シアスパン比3の試験体では継手部が破断する変形角と変形能力に相関性が見られない。

試験結果を基に継手不良部から健全な鉄筋へと応力が伝達するモデルを提案した。このモデルが成り立たなくなると、継手部が破断する。継手部の破断に関して提案したモデルより以下のことが明らかとなった。

- 4) 継手部が破断する場合として、継手部の付着応力の増大に伴うすべり量の増大で決まる場合と、継手部と同一断面で継手部を有する鉄筋と横並びの鉄筋が降伏することにより決まる場合がある。
- 5) 付着応力が増大し継手部が破断する場合、付着応力-すべり量関係が2次剛性を持つ形に仮定すると、試験結果の継手部の変形能力-継手破断時の材端部変形角関係を説明できる。
- 6) 継手部と同一断面の健全鉄筋が降伏し、継手部が破断する場合、健全鉄筋の降伏と共に継手部の変形が大きく進み、継手部の破断に至るため継手部の変形能力への依存性がなくなる。

参考文献

- 1) 堀田久人, 浅野貴文: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.607-612, 2009
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, p.47, 1987