

## 論 文

## [2038] 鉄骨鉄筋コンクリート梁の梁主筋の継手部の応力伝達機構

正会員 ○ 上原 広 (大阪工業大学大学院)  
 正会員 可児 長英 (大成建設建築本部設計部)  
 正会員 西村 泰志 (大阪工業大学工学部)  
 正会員 南 宏一 (大阪工業大学工学部)

## 1. 序論

本研究では、先組重ね継手工法<sup>1)</sup>を用いた、SRC梁の弾塑性性状における、重ね継手部の継手長さおよびせん断補強筋量、主筋端部のフックの形状の影響を、実験的に検討することを目的としている。さらに、付着割裂破壊時の重ね継手主筋の理論終局付着強度式を示し、実験値との比較により、その合理性を検証した。なお、継手長さおよびせん断補強筋量の効果について検討するものを実験1、主筋端部のフックの形状の効果について検討するものを実験2とした。実験2では、フックの形状の影響のみを抽出して調べるために、試験体をRC梁とした。

## 2. 実験1

## 2.1 実験計画

実験変数は、重ね継手の継手長さ、せん断補強筋比の2種類である。継手長さは、0(継手なし)、20d、40dの3種類、せん断補強筋比は、0.24%、0.48%の2種類である。

これらを組み合わせ、計4体の試験体を計画した。表1に実験変数の組合せを示す。

図1に試験体の形状寸法および断面を示す。試験体の形状寸法は共通であり、片持梁形式である。主筋は、4-D13( $p_t=0.75\%$ )、せん断補強筋は、6φを用いた。また、重ね継手部分の破壊に先行し、固定部との境界面での曲げ破壊が生じないようにするため、試験体の固定部近傍に補強筋とし、4-D16を配した。鉄骨は、試験体の固定部との境界面より300mmの位置(重ね継手始点)に、溶接による継手を持つ。表2に材料の力学的性質を示す。全試験体に対し、相対部材角Rを制御基準とする正負返し載荷を行った。

## 2.2 実験結果

図2に履歴曲線を示す。縦軸は、荷重P(tf)、横軸は相対部材角R(rad.)である。図中、 $P_u$ は、終局曲げ耐力を示す。 $sP_u$ は、鉄骨部分の終局曲げ耐力である。図3に、最終破壊状況を示す。図4に重ね継手主筋のひずみの推移状況を示す。A1では、R=0.008rad.において、曲げひびわれが発生し、次いで、重ね継手主筋近傍で斜張力ひびわれが生じる。R=0.02rad.で、最大強度を示す。

表1 実験変数(実験1)

試験体名	A1	A2	A3	A4
継手長さ せん断補強筋比	52cm/40d 0.24%	26cm/20d 0.24%	26cm/20d 0.48%	継手なし 0.24%

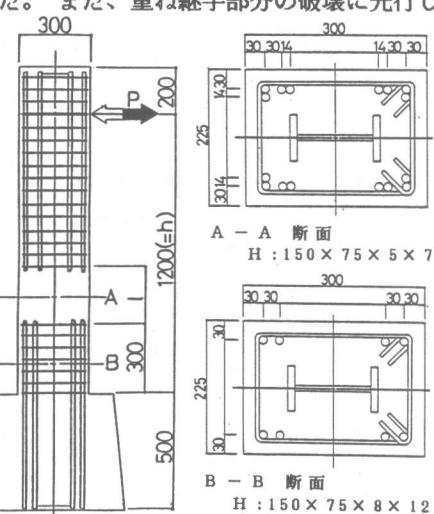
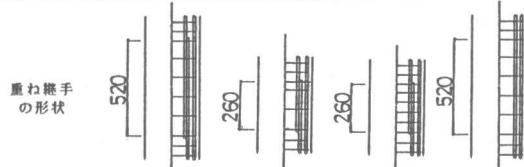


図1 試験体の形状寸法および断面

これは、理論曲げ強度に一致する。最大強度以後、重ね継手主筋に沿って、付着割裂ひびわれの発生が認められるものの、最終的な破壊状況は、主筋の引張降伏による曲げ引張破壊の様相を呈した。ここで、重ね継手主筋のひずみ推移状況に着目すれば、主筋間に斜張力ひびわれが発生するとともに、ひずみの値はほぼ一定の値を保持するようになり、やがて、付着割裂ひびわれの発生とともに著しく減少する。これは、主筋の滑動を示唆するものである。A2およびA3は、 $R=0.02\text{rad.}$ で最大強度を示すが、理論曲げ強度には達しない。履歴曲線は、主筋の滑りをともなう逆S字形であり、A1のそれと比較して、エネルギー消費能力の劣化は明らかである。これは、継手長さが、40dから20dと短くなつたためと考えられる。最大強度以後、重ね継手主筋に沿って発生した付着割裂ひびわれが卓越して進展し、最終的な破壊状況は、せん断付着割裂破壊の様相を呈した。A3では、最大強度はA2と比較し、わずかに高い。図4からも明らかだが、各点のひずみは、付着割裂ひびわれの発生以後、主筋の滑動により減少する傾向を見せる。特に、A2においてこの傾向は著しい。これより、継手長さが20dの場合、せん断補強筋量の増加は、主筋の滑動の制止に幾らかの効果をもたらすと考えられるが、その影響は、梁の最大耐力の向上に顕著な効果をもたらす程度ではないと判断できる。A4では、最大強度は、理論曲げ強度より若干高い。また、同一振幅内の繰返し載荷による耐力の劣化は見られない。履歴曲線は、エネルギー消費能力に優れた紡錘形であり、最終的な破壊状況は、曲げ引張破壊の様相を呈した。

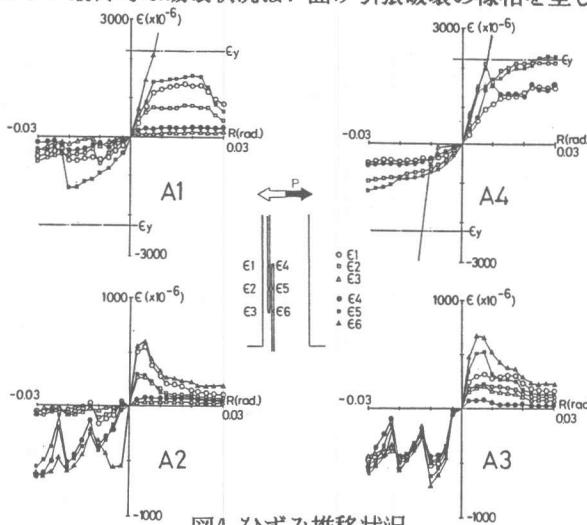


図4 ひずみ推移状況

表2(a) 鋼材の力学的性質

	降伏応力度 (kg f/cm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg f/cm <sup>2</sup> )	破断伸び
6φ D13	2466 3404	3705 3992	0.147 0.175
R -5	3716	4546	0.212
R -7	2946	4356	0.286
R -8	3069	4378	0.265
R -12	2701	3536	0.271

表2(b) コンクリートの力学的性質

圧縮強度 (kg f/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg f/cm <sup>2</sup> )
233	23.1

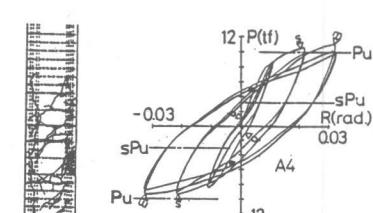
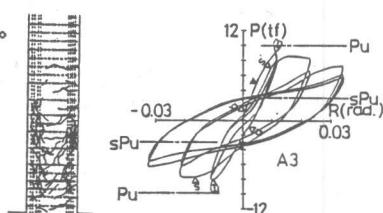
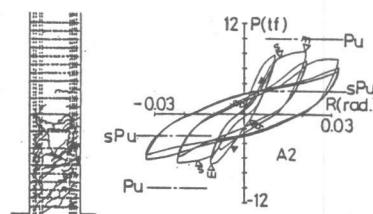
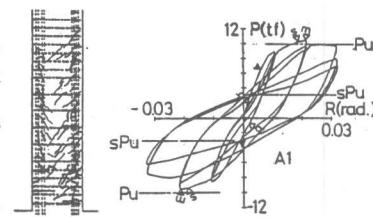


図3 破壊状況

図2 履歴曲線

### 3. 実験2

#### 3.1 実験計画

実験変数は、重ね継手主筋端部のフックの形状である。フックの折り曲げ角は、 $180^\circ$ 、 $45^\circ$ および $0^\circ$ (フックなし)であり、計3体を計画した。また、主筋の定着強度が、フックの定着強度のみで決まるよう、重ね継手区間のコンクリートのかぶりを除去した。これは、梁の出隅部分での火災時のコンクリートのはく離を想定し、フックの有効性を調べるためにある。表3に実験変数の組合せを示す。図5に試験体の形状寸法および断面を示す。主筋には、6-D13(重ね継手側主筋比 $p_t$ は0.38%)を用い、せん断補強筋には6φを用い、50mm間隔( $p_w=0.25\%$ )で配筋した。B1では、重ね継手区間に付着補強筋として、2-D13を配した。図6に付着補強筋の配置状況を示す。梁主筋の非対称性は、スラブを想定したためである。

#### 3.2 実験結果

図7に履歴曲線を示す。縦軸は荷重 $P(\text{tf})$ 、横軸は相対部材角 $R(\text{rad.})$ である。図中、一点鎖線は、終局曲げ耐力 $P_u$ である。履歴曲線が非対称であるのは、梁主筋の鉄筋量が非対称なためである。各試験体とも、履歴性状に差はほとんどない。いずれの試験体とも、 $R=0.01\text{rad.}$ で、理論曲げ強度に達し、以後変位振幅の漸増とともに、強度は徐々に上昇する。繰返し載荷による強度の低下は見られない。やがて、固定部との境界面で曲げひびわれが著しく進展し、最終的には、曲げ引張破壊の様相を呈した。図8に重ね継手主筋のひずみ推移状況を示す。B2とB3との間に、ほとんど差異は見られず、共に主筋は引張降伏している。また、主筋端部には、B1と異なり、幾らかひずみが生じている。これは、フックの効果である。だが、B2とB3での主筋端部の挙動に変化があまりないことから、フックの折り曲げ角の差異によ

表3 実験変数(実験2)

試験体名	B1	B2	B3
フックの折り曲げ角 付着補強筋	$0^\circ$ 2-D13	$45^\circ$ なし	$180^\circ$ なし

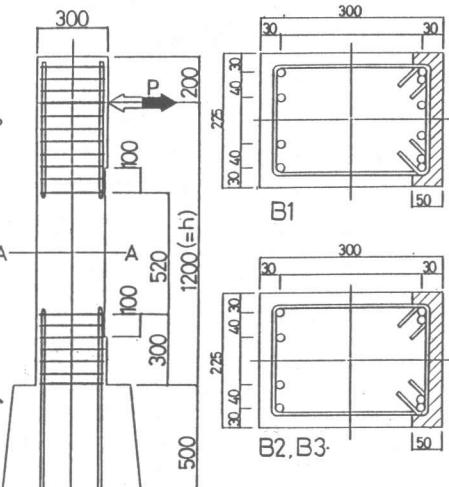
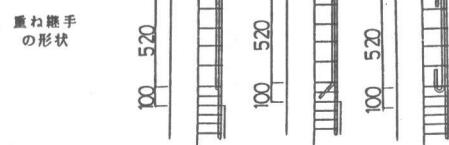


図5 試験体の形状寸法および断面

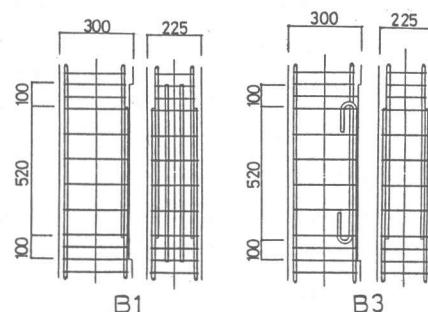


図6 付着補強筋の配筋状況

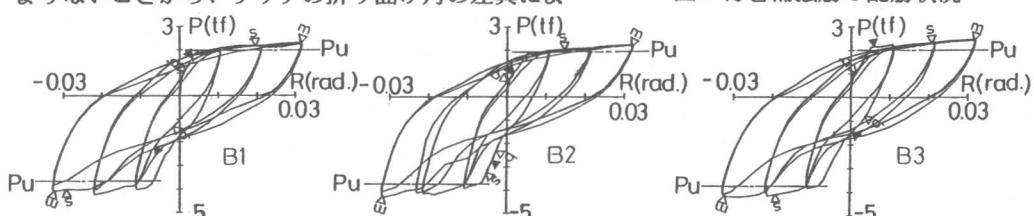
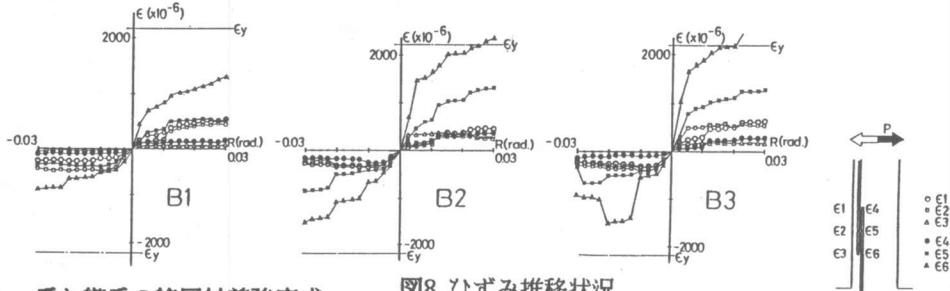


図7 履歴曲線

る効果は、あまりない。また、B1とB2、B3との間には明らかな違いが観察される。すなわち、B1では主筋のひずみは、降伏ひずみの半分程度しか達しない。これは、主筋に沿い、付着補強筋を配したため、重ね継手主筋が負担する力が分散されたためである。



#### 4. 重ね継手の終局付着強度式

##### 4.1 重ね継手の破壊機構

継手長さが、十分に確保されない場合、重ね継手区間で付着割裂破壊が卓越し、最終破壊状況は、せん断付着割裂破壊の様相を呈する。これは、異形鉄筋のくさび作用により、近傍のコンクリートで、主筋の滑動を許容する破壊が引き起こされるためである。そこで、梁主筋の重ね継手区間に、鉄筋の付着区間と考え、引抜きを受ける異形鉄筋の定着の問題として、Ferguson<sup>2)</sup>のモデルに基づき、くさび作用による割裂力Bと割裂線上のコンクリートの引張応力との釣合を求め、重ね継手の理論終局付着強度を検討する。すなわち、図9より、

$$(1-nD) \cdot \alpha \cdot F_t = n \cdot B \quad (1)$$

を得る。鉄筋とコンクリートとの間の応力伝達は、横ふしの機械的な作用のみによるものとする。

##### 4.2 重ね継手の終局付着強度式

図10に、局部的なレベルでの、重ね継手近傍の割裂パターンを示す。主筋の配置状況等により、さらに多くの破壊パターンが想定されるが、耐力の決定に支配的な割

表4 重ね継手の終局付着強度式

破壊形式	理論終局付着強度式	破壊パターン
コナー・スプリット	$c \tau_u = (1.42 C/D + 0.354) \cdot F_t$	図10(a)
V・スプリット	$v \tau_u = (C/D + 0.5) \cdot \tan 30^\circ \cdot F_t$	図10(b)
サイド・スプリット	$s \tau_u = (b/(nD)-1) \cdot F_t$	図10(c)
主筋の引張降伏	$b \tau_u = (\sigma_y \cdot a_t) / (\psi \cdot l_b)$	

裂パターンは、これらのいずれかである。ここで、割裂線上のコンクリートの引張応力には、引張強度 $F_t$ を低減せず用いる。これは、本式が、極限解析における下界定理に基づくためである。V・スプリット破壊時の、割裂面の傾斜角 $\theta$ は、角の2次元有限要素解析<sup>3)</sup>でも指摘されているように、近傍コンクリートのはり作用を考慮して、 $\theta=30^\circ$ とした。また、コーナー・スプリット破壊時の割裂面の傾斜角は $45^\circ$ とした。表4に重ね継手の理論終局付着強度式を示す。実験値には、実験1で得られたものを用いている。図11に、予想されるSRC断面の割裂パターンを示す。表5に理論値と実験値の比較を示す。 $\tau_m$ は、主筋に貼付されたひずみゲージより得た付着応力である。

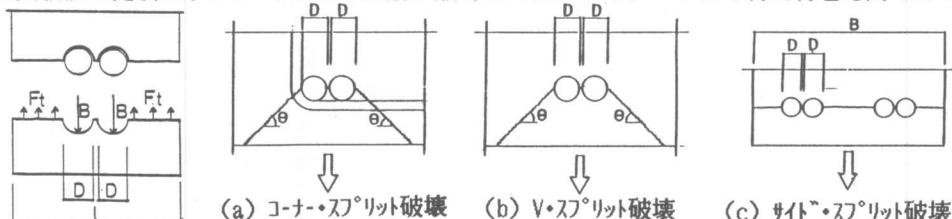


図9 重ね継手の破壊モデル

図10 重ね継手の割裂パターン

これより、割裂破壊による重ね継手の終局付着強度は、V・スプリット破壊によって決まると考えられる。ここで、実験値と理論値は、概ね一致している。なお、断面内に鉄骨が内在することに起因し、割裂パターンは幾つか想定されるものの、破壊の決定へつながることはない。これらの割裂パターンでは、割裂線が部材断面を縦断することになり、その長さが長大になるためである。

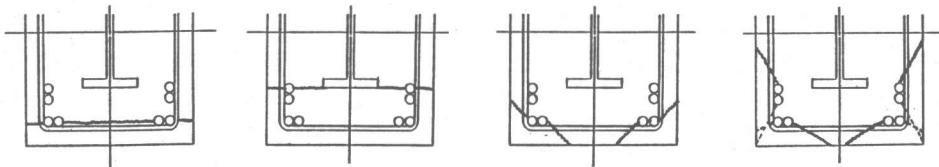


図11 予想される破壊パターン

表5 実験値と理論値の比較(実験1)

	$b\tau_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$c\tau_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$v\tau_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$s\tau_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{se}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{se}/\tau_{th}$	破壊モード
A1	20.8	69.9	31.8	79.9	20.8	1.00	曲げ引張破壊
A2	41.6	69.9	31.8	79.9	24.8	0.75	付着割裂破壊
A3	41.6	69.9	31.8	79.9	31.5	0.99	付着割裂破壊

#### 4.3 横補強筋の効果による重ね継手の終局付着強度式

ここで、横補強筋は、重ね継手主筋の付着強度の向上に貢献するのではなく、コンクリートの割裂破壊以後、割裂力Bと釣合い系を形成すると仮定して取り扱う。したがって、割裂力Bと横補強筋に生じる引張力との釣合系より、横補強筋を評価すれば、重ね継手主筋の終局付着強度は、

$$\tau_u = \min(b\tau_u, conc\tau_u, st\tau_u) \quad (2)$$

で与えられる。次に、V・スプリット破壊を想定し、補強筋で決まる終局付着強度を求める、図12より、

$$st\tau_u = (n_w \cdot a_w \cdot \sigma_y) / (2D \cdot l_b) \quad (3)$$

となる。次に、実験2での結果を用いて、理論

式を検証する。実験2では、かぶりコンクリートを除去しているため、付着強度は、横補強筋のみで決まることになる。表6に、実験値と理論値の比較を示す。得られた重ね継手の終局付着強度は、主筋の引張降伏時の終局付着強度より高い。したがつて、部材の破壊は、主筋の引張降伏により決まると考えられ

る。図13に、B2、B3の実験値と理論値の比較を示す。実験値は、理論値と比べやや低い。これは、主筋の定着力の一部が、フックの機械的な定着機構によることを示唆するものである。

表6 実験値と理論値の比較(実験2)

	$b\tau_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$v\tau_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{se}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{se}/\tau_{th}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	破壊モード
B1	10.4	31.4	12.6	1.21	曲げ引張破壊
B2	20.8	31.4	17.0	0.82	曲げ引張破壊
B3	20.8	31.4	17.7	0.85	曲げ引張破壊

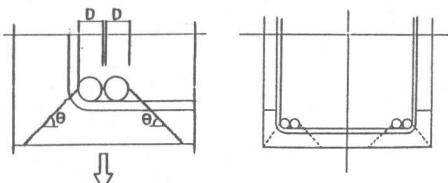


図12 予想される破壊パターン

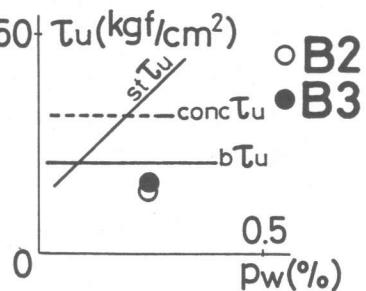


図13 実験値と理論値の比較

## 5. 結論

先組重ね継手工法を用いたSRC梁において、重ね継手の継手長さは、梁部材の曲げ変形能力に對して極めて支配的な影響を与える。すなわち、継手長さが短くなるとともに、破壊状況は、曲げ破壊系より、重ね継手区間で付着割裂破壊が卓越する、せん断付着割裂破壊に移行する。また、継手長さが20dの場合、本実験程度のせん断補強筋量の増加を行っても、最大耐力の向上に顯著な効果を与えるには至らない。フックの折り曲げ角の差は、本実験ではほとんど見られなかった。

さらに、フックを省略しても、付着補強筋を施すこと、フックを持つ場合と同等な曲げ変形能力を示す。実験1では、求められた重ね継手主筋の理論終局付着応力度式は、実験値と良好な一致を見せ、ここでの理論的アプローチの合理性が検証された。実験2では、部材の破壊状況が、曲げ破壊系であるため、理論式による評価対象の範囲にないため、横補強筋の拘束効果についての理論的アプローチを示すのみにとどめる。

### 〔主要な記号〕

D : 重ね継手主筋の直径 (cm)	b : 対象部材断面の梁幅 (cm)
c : 主筋のかぶり厚さ (cm)	$\theta$ : 割裂面の傾斜角 (deg.)
$l_b$ : 継手長さ (cm)	$F_t$ : コンクリートの引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
n : 割裂線上の主筋数	$a_t$ : 重ね継手主筋の断面積 (cm <sup>2</sup> )
$\sigma_y$ : 主筋の降伏応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\psi$ : 主筋の周長 (cm)
$a_w$ : 横補強筋の断面積 (cm <sup>2</sup> )	$w\sigma_y$ : 横補強筋の降伏応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
$n_w$ : 割裂面中の横補強筋数	$\alpha$ : コンクリートの引張応力の低減係数
$b\tau_u$ : 曲げ破壊時の終局付着応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
$v\tau_u$ : v・スプリット破壊時の終局付着応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
$c\tau_u$ : コーナー・スプリット破壊時の終局付着応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
$s\tau_u$ : サイド・スプリット破壊時の終局付着応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	

### 〔謝辞〕

本実験を行うにあたって、大成建設(株)より多大なる御協力を戴いた。ここに記して深甚の謝意を表します。

### 〔参考文献〕

- 1) 上原 広・吉田 力・富島 誠司・西村 泰志・南 宏一：SRC梁の梁主筋の継手部の応力伝達機構に関する実験的研究（その1, その2），昭和62年日本建築学会大会学術講演梗概集構造II，昭和62年10月，pp.1185-1188.
- 2) Ferguson, M.P. : Reinforced Concrete Fundamentals, 3rd Ed., John Wiley & Sons, 1972. p.185.
- 3) 角 徹三：異形鉄筋の付着特性とその鉄筋コンクリート部材の変形性状に及ぼす影響に関する研究，京都大学学位論文，昭和53年8月，第4章。