

# 論文 鋼板接着されたRC部材の引張破壊挙動解析

安東 祐樹<sup>\*1</sup>・山本 健太<sup>\*1</sup>・佐野 正<sup>\*2</sup>・松田 浩<sup>\*3</sup>

**要旨:** 鋼板接着端部のはく離現象において、接着幅がコンクリート断面と同幅になると破壊強度が低下する。この要因について、両引き試験後の各試験体の破壊状況および全視野ひずみ計測にてコンクリート側面のひび割れ進展状況を比較した結果、接着幅が大きくなるにつれ破壊形態が鋼板のはく離からかぶりコンクリートの破壊となることが分かった。この結果を受け、コンクリートと樹脂接着界面にコンクリートと内部の鉄筋ないしスパイラル筋との付着の影響を考慮した限界応力を鋼板の接着幅に応じて定義することによって、鋼板先端部のはく離現象を概ねシミュレートできることが分かった。

**キーワード:** 鋼板接着, はく離現象, 接着幅, 非接触全視野ひずみ計測, 付着力, 3次元有限要素解析

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の補修・補強技術への期待が高まる中、補強材（鋼板、炭素繊維、アラミド繊維など）をコンクリート表面に接着させて耐荷力向上を図る工法は、施工の容易さも相まって数多く適用されている。しかしながら、これらの接着工法では、時として、十分な接着面積が得られないと、必ず補強材を接着したコンクリート端部引張側からはく離を生じる。そのため、接着端部の破壊メカニズムを解明することは、これら接着工法の最適設計を行う上で重要な課題である。筆者らも、これまでに鋼板接着を中心として、接着長さおよび幅方向に着目して鋼板端部のはく離現象について様々な検討を行ってきた<sup>1)~3)</sup>。しかしながら、接着幅がコンクリート断面幅に近づくと、解析では、はく離荷重が大きくなり、試験結果を精度良くシミュレートできない。さらに、接着幅がコンクリート断面より小さくなった場合についても検討例が少なく、その影響を見出すことができていない。そこで、本研究では、鋼板の接着幅をパラメータとして両引き試験を行った結果を基に、鋼板接着端部のはく離現象に及ぼす影響について、解析的観点および非接触全視野ひずみ計測により検討を行った。

## 2. 接着幅が異なる場合のはく離挙動

### 2.1 試験概要

接着幅が鋼板先端側ではく離現象に及ぼす影響を簡易的に評価するため、文献1)~3)にならい、両引き試験により鋼板接着先端部のはく離を再現する試験を行った。試験体は、図-1に示すようなコンクリートブロックに鋼板（幅 B:30mm~100mm）をエポキシ樹脂にて接着長 100mm 一定として両側に接着し、反対側をボルトで固定したものである。この試験体に対し、表-1に示すような、鋼板接着幅 B、コンクリート強度、コンクリート内部のスパイラル筋の有無をパラメータとして両引き試験を行い、これらの違いがはく離現象に及ぼす影響を確認することとした。用いた試験体の物性を、表-2~4に示す。試験は、300kN 万能試験機に供試体の両端を固定し、試験体が破壊するまで载荷を行った。さらに、鋼板に発生するひずみとコンクリートに発生するひび割れの進展状況について、デジタル相関法による非接触全視野ひずみ計測を行った。計測範囲は、図-1中の RC 供試体側面の着色部とした。

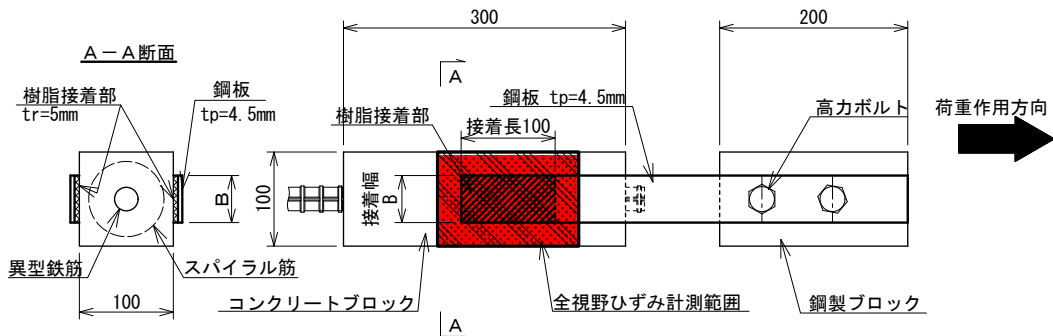


図-1 供試体概要図 (単位 mm)

\*1 長崎大学 大学院 生産科学研究科 (正会員)

\*2 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 博士(工学) (正会員)

\*3 長崎大学 工学部 構造工学科教授 工博 (正会員)

表-1 試験パラメータ

タイプ	接着幅 B (mm)	接着長 L (mm)	圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	スパイラル筋
fc36.9_spr	30,40,50 70,100	100	36.9	あり
fc36.9_nonSpr	30,50 100			なし
fc15.7_Spr	30,40,50 70,100		15.7	あり

表-2 コンクリートの物性

圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu_c$
15.7	1.44	$1.40 \times 10^4$	0.17
36.9	2.55	$2.77 \times 10^4$	0.16

※ 引張強度  $\sigma_t$  は  $0.23 \cdot f_c^{2/3}$  より算出

表-3 鋼材の物性

鋼材	降伏点 $f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_{su}$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
鉄筋 D25	405	595	$1.93 \times 10^5$
鋼板 $t=4.5\text{mm}$	347	443	$1.88 \times 10^5$
スパイラル筋	390	575	$1.90 \times 10^5$

表-4 接着材 (エポキシ樹脂) の物性 (材齢 7 日)

圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_{et}$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張せん断強度 $\tau_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu_e$
78.6	57.9	13.7	2800	0.42

## 2.2 解析概要<sup>3)</sup>

試験と併せて、3次元非線形解析により接着幅の違いを検討した。モデルは、図-2に示すように3次元の立体要素で構築された両引き試験体モデルである。なお、コンクリートブロック内の異型鉄筋は立体要素で構築し、スパイラル筋は立体要素で構築するとモデル化が複雑になるため、埋込み要素にて構築した。

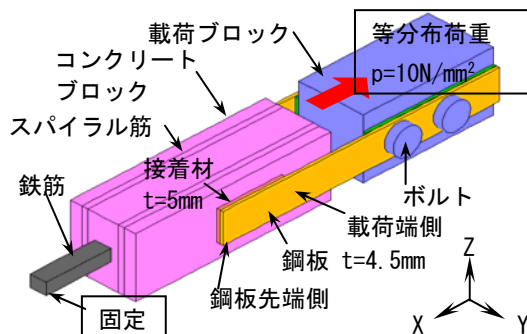


図-2 解析モデル概要図

材料物性は、表-2~4を用いた。コンクリートの構成則は、圧縮域を山谷らの破壊エネルギー則<sup>4)</sup>(以下、破壊エネルギー則)とし、引張域を最大強度直後に脆的に破壊させるものとした。鋼材および接着材の構成則は、材料試験の結果を基に決定した(図-3参照)。

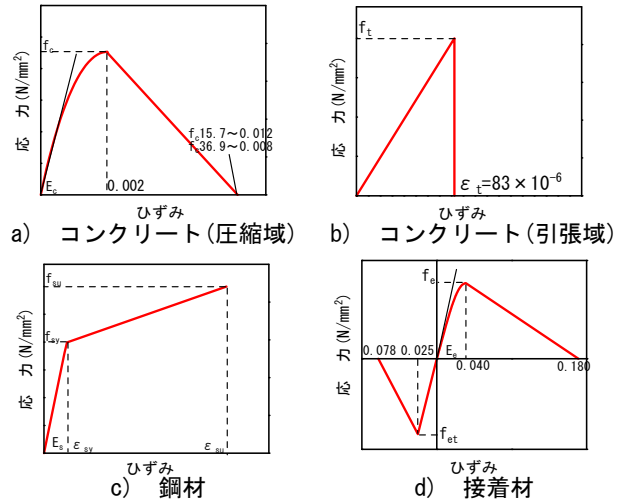


図-3 材料構成則

境界条件は、鉄筋先端の変位を完全固定し、荷重ブロック側面(100mm×100mm)のコンクリート側に等分布荷重( $p=10\text{N/mm}^2$ )を単調荷重した。

また、本解析では、はく離をシミュレートするため、各部材間にクーロン摩擦の接触モデルを用いた。これは、各部材の接触界面の節点を独立させ、部材間の滑りや接着を考慮するものである。ここで、鋼材間に滑りがある箇所では、荷重直後から滑り摩擦係数( $\mu=0.25$ )にて相対運動させ、鋼板、コンクリートが樹脂で接着される箇所では、接触する部材の節点間の相対運動を規定した応力(以下、限界応力)まで拘束し、その後、節点を開放することとした。ここで、各部材間の限界応力は、コンクリート-接着材では接線・法線ともコンクリート引張強度、鋼板-接着材では、法線方向を接着材の引張強度、接線方向を接着材の引張せん断強度とした。なお、他の部材間では、節点を共有させ完全結合状態とした。

## 2.2 試験結果と解析結果の相違

試験パラメータ毎の破壊荷重および平均はく離強度(破壊荷重/接着面積)との関係を、図-4, 5に示す。破壊荷重は、試験ではスパイラル筋の有無にかかわらず、接着幅 50mm まで線形的に大きくなり、50mm を超えるとほぼ横ばいとなったが、解析では、接着幅が大きくなると総じて大きくなる傾向にあった。つぎに、平均はく離強度は、試験では接着幅が小さくなると大きくなったが、解析では接着幅 50mm で横ばいになった。さらに、圧縮強度が大きくなるとこの影響が顕著になった。

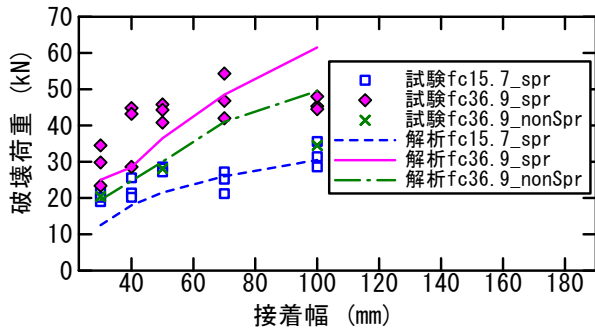


図-4 接着幅と破壊荷重の関係

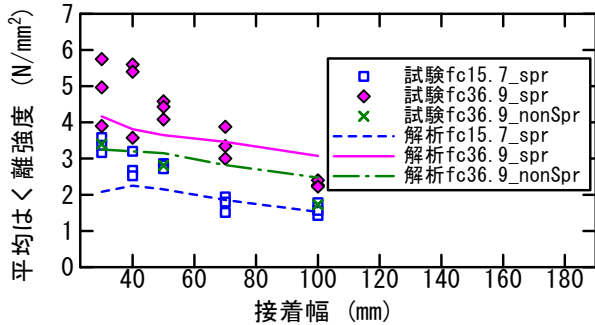


図-5 接着幅と平均はく離強度の関係

一方、試験体の破壊状況は、写真-1～2に示すように、接着幅が50mmより小さいと接着界面のコンクリート表层で破壊し、接着幅が50mmより大きくなるとコンクリート側面のひび割れが顕著となって破壊している。さらに、スパイラル筋が無いと接着幅にかかわらず側面のひび割れが顕著となって破壊しており、明らかにコンクリートの抵抗断面の違いが現われている。

以上より、試験結果と解析結果との相違は、解析では、接着部のはく離判定を、コンクリートと接着材の接触面内にある節点のみが限界応力に達した際にはく離するものとしていたことに起因する。



写真-1 スパイラル筋あり試験結果 ( $f_c=36.9\text{N/mm}^2$ )

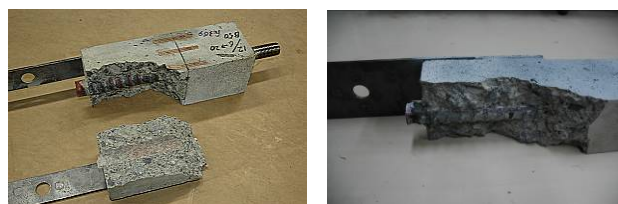


写真-2 スパイラル筋なし試験結果 ( $f_c=36.9\text{N/mm}^2$ )

### 2.3 コンクリートの破壊挙動

接着幅が異なる場合の破壊メカニズムを解明するため、非接触全視野ひずみ計測による  $f_c=36.9\text{N/mm}^2$  試験体側面のひび割れの進展を比較した。図-6～8より、スパイラル筋ありの接着幅50mmでは、最初にコンクリート断面方向にひび割れが発生し、それが試験体軸方向に進展し破壊した。つぎに、接着幅70mmの時のひび割れの発生および進展は、接着幅50mmの時と同傾向であるが、終局時にはスパイラル筋から上のかぶりコンクリートが破壊した。一方、スパイラル筋がない時は、断面方向のひび割れが鉄筋位置まで進展した後に、そのひび割れが顕著となって軸方向に進展し、かぶりコンクリートが破壊している。これらより、接着幅が異なる場合の鋼板先端部のはく離現象は、被着体であるコンクリートの物性および内部の配筋に左右されると推察される。

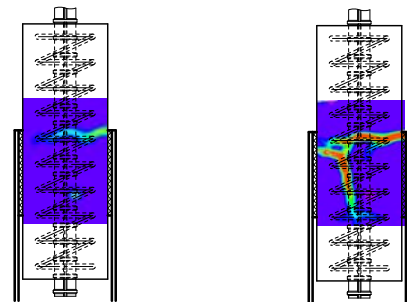


図-6 接着幅50mm-スパイラル筋あり

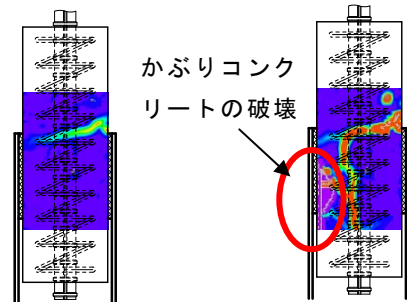


図-7 接着幅70mm-スパイラル筋あり

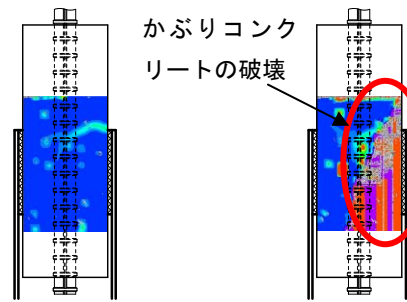


図-8 接着幅100mm-スパイラル筋なし

### 3. 接着幅が異なる場合の破壊パラメータの検討

本試験により、接着幅が異なると鋼板先端部の破壊メカニズムが異なることが分かった。実際の破壊挙動は、被着体であるコンクリートの物性および内部の配筋状態によって大きく異なり、接着界面内の節点のみではなく離判定させるモデルでは限界がある。そこで、本節では、実際の破壊挙動に影響を及ぼすコンクリート構成則および接触条件を比較検討し、適切な解析モデルの構築を検討することとした。

#### 3.1 コンクリート構成則の検討

##### (1) 圧縮軟化域

コンクリートの構成則は、星隈ら<sup>5)</sup>が示した内部鉄筋の拘束効果を考慮した構成則を用いることとした。

- ・ 応力上昇域 ( $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}$ )

$$f_c = E_c \cdot \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left[ \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right]^{n-1} \right\}, \quad n = \frac{E_c \cdot \varepsilon_{cc}}{E_c \cdot \varepsilon_{cc} - f_{cc}} \quad (1)$$

- ・ 応力下降域 ( $\varepsilon_{cc} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$ )

$$f_c = f_{cc} - E_{des} \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}), \quad \varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} + \frac{f_{cc}}{2E_{des}} \quad (2)$$

ここに、 $f_{cc}$ : 最大圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon_{cc}$ : 最大圧縮応力時のひずみ,  $\varepsilon_{cu}$ : 終局ひずみ

$E_c$ : 初期弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>),  $E_{des}$ : 下降勾配 (N/mm<sup>2</sup>)

本構成則では、帯鉄筋などの横拘束筋でコンクリートが十分に拘束されると、破壊エネルギー則を用いた場合(図-8a)より、最大荷重および変形性能が向上し(図-8b)、エネルギー吸収量が增大する。なお、構成則のパラメータは式(3)~(6)によって表わされる。

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} + \frac{kf_{cc}}{E_{des}} \quad (3), \quad f_{cc} = f_c + 3.8\alpha\rho_s f_{yh} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033\beta \frac{\rho_s f_{yh}}{f_c} \quad (5), \quad E_{des} = 11.2 \frac{f_c^2}{\rho_s f_{yh}} \quad (6)$$

ここに、

$\rho_s$ : 帯鉄筋体積比,  $f_c$ : コンクリート強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{yh}$ : 帯鉄筋降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$k$ : 終局限界係数 ここでは、0.4

$\alpha, \beta$ : 断面補正係数 ここでは、 $\alpha: 1.0, \beta: 1.0$

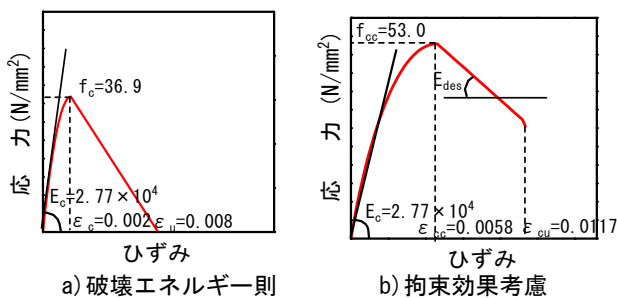


図-8 コンクリート圧縮域の構成則

##### (2) 引張軟化域

十分に配筋されたコンクリート部材の引張領域では、内部鉄筋の付着効果によって、ひび割れ発生後もその応力を負担するテンションスティフニング効果が成立する。そこで、本モデルでもこの効果を考慮し、図-9に示すスパイラル筋位置を境界面とする領域に、この効果を考慮した構成則を適用することとした。構成則の決定にあたっては、島ら<sup>6)</sup>の構成則を参考とし、

図-10とした。

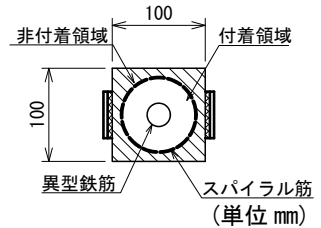


図-9 引張軟化域

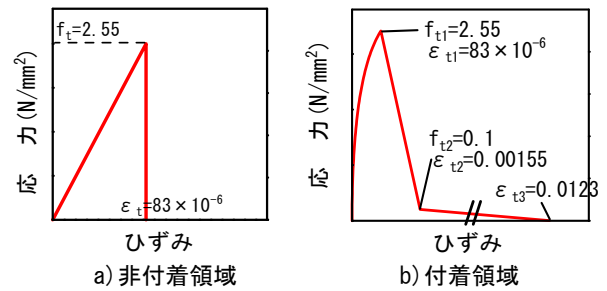


図-10 コンクリート引張域の構成則

#### 3.2 接触条件の検討

鋼板先端部のはく離現象のシミュレートにあたっては、コンクリートと樹脂の接着界面内の節点を、法線・接線方向の限界応力まで拘束するモデル(以下、**限界応力モデル**)としていた。しかしながら、実際のはく離挙動は、コンクリートの抵抗幅の影響を受け、接着面積より広い範囲でコンクリートが破壊しながら破壊する。そこで、この影響を考慮するため、以下の仮定に基づいたモデルにて比較を行い、接着界面の適正化を図った。

- ・ 接着界面で剥離させないモデル (**完全結合モデル**)。
- ・ 試験結果の平均はく離強度から、接着幅ごとの補正係数を算出し、これを**限界応力モデル**の法線方向の限界応力に乗じたモデル (**限界応力補正モデル**)。

なお、**限界応力補正モデル**では、図-11に示すように、試験結果から得られた(接着幅毎の平均はく離強度/コンクリートの引張強度)と(接着幅/コンクリート断面幅)の関係より近似直線を算出し、その直線を補正係数として式(7)のように法線方向の限界応力を定めた。

$$\sigma_n' = \left( -1.667 \cdot \frac{B_c}{B_p} + 2.598 \right) \cdot f_t \quad (7)$$

ここに、 $\sigma_n'$ : 法線方向の節点限界応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_t$ : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$B_c$ : コンクリートの断面幅 (mm)

$B_p$ : 鋼板の接着幅 (mm)



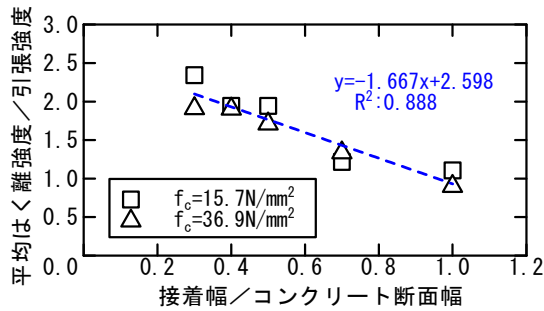


図-1.1 試験結果からの補正

### 3.3 解析パラメータ

前節のコンクリート構成則と接触条件を用いて表-5に示す解析パラメータにて  $f_c=36.9\text{N/mm}^2$  の試験結果のシミュレートを行った。また、Case0 は、2節のモデルである。なお、Case1~3のコンクリートの引張軟化域は、図-1.0の構成則としている。

表-5 解析パラメータ

パターン	圧縮域の構成則	接触条件
Case0	図-8 a)	限界応力モデル
Case1	図-8 b)	限界応力モデル
Case2	図-8 a)	完全結合モデル
Case3	図-8 b)	限界応力補正モデル

### 3.4 解析結果

図-1.2より、Case1では、接着幅が小さくなくても、平均はく離強度は大きくなり、Case0と同様の傾向であった。つぎに、Case2では、試験結果より総じて大きくなったが、平均はく離強度は、試験結果と同様に接着幅に応じて変化する傾向となった。これに対しCase3では、試験結果をほぼシミュレートできている。

以上より、鋼板端部のはく離現象は、コンクリートの抵抗断面と物性およびその内部の鉄筋ないし横拘束筋の影響を受けることが分かった。さらに、これらの影響を接着界面の節点の法線方向の限界応力に加味すれば、接着幅の違いをシミュレートできることが分かった。

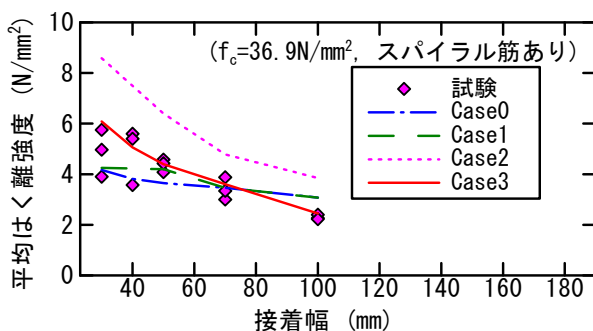


図-1.2 パラメータ解析結果

## 4. 内部鉄筋の付着を考慮したはく離挙動解析

これまでの検討によって接着界面の限界応力に内部鉄筋の付着と接着幅の影響を考慮すれば、試験結果をシミュレートできることが分かった。そこで、ここでは、内部鉄筋の影響を考慮した限界応力の検討を行う。

### 4.1 内部鉄筋の付着を考慮したはく離限界応力

全視野ひずみ計測による結果、鋼板端部のはく離現象は、図-1.3に示すように鋼板端部に発生するひび割れがコンクリート内部に進展し、スパイラル筋ないし内部鉄筋の位置に達した後に発生している。そこで、鋼板先端部に発生する鉛直応力  $\sigma_n$  とコンクリート内部のスパイラル筋ないし鉄筋の節位置に発生する鉛直応力  $\sigma_{spr}$  の釣り合い条件から限界応力を定義することとした。

まず、 $\sigma_{spr}$  は、図-1.4に示すような応力状態にあり、式(8)が成立する<sup>7)</sup>。この時、試験体が破壊する荷重  $P$  は、有効接着長内の  $\sigma_{spr}$  がコンクリートの引張強度に達したときであり、式(9)となる。さらに、鋼板に作用する力  $T$  は、 $\sigma_n$  と鋼板の断面積により式(10)で表わされる。鋼板は両側面に接着してあることから、 $T$  と  $P$  の間には式(11)が成立し、この式に式(8)~(10)を代入すると式(12)が成立することとなる。

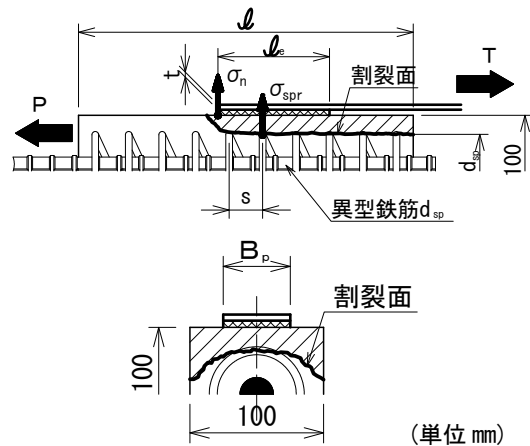


図-1.3 限界応力の定義

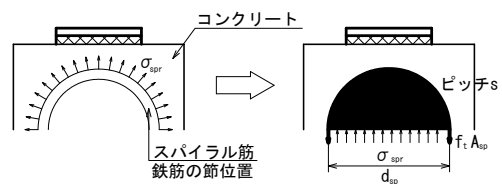


図-1.4 コンクリートに作用する鉛直応力

$$\sigma_{spr} = \frac{2 \cdot f_t \cdot A_{sp}}{d_{sp} \cdot S} \quad (8)$$

$$P = \sigma_{spr} \cdot \pi \cdot d_{sp} \cdot \ell_e \quad (9)$$

$$T = \sigma_n \cdot B_p \cdot t \quad (10)$$

$$T = P/2 \quad (11)$$

$$\sigma_n = \frac{A_{sp} \cdot \pi \cdot \ell_e}{s} \cdot \frac{1}{B_p \cdot t} \cdot f_t \quad (12)$$

$\sigma_{spr}$ : スパイラル筋周長方向に作用する力 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $A_{sp}$ : スパイラル筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $d_{sp}$ : スパイラル筋の径または鉄筋のフシ高さ (mm)  
 $s$ : スパイラル筋ピッチまたは鉄筋のフシ間隔 (mm)  
 $l_e$ : 有効範囲内の定着長 (鋼板接着長) (mm)  
 $f_t$ : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_n$ : 鋼板端部に作用する鉛直応力 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $B_p$ : 鋼板接着幅 (mm)  
 $t$ : 鋼板厚さ (mm)

この式(12)により導かれた $\sigma_n$ を接着界面の法線方向の限界応力として、再度、試験結果をシミュレートした(表-6参照)。

表-6 解析パラメータ

タイプ	fc15.7_Spr	fc36.9_Spr	fc36.9_nonSpr
圧縮強度	15.7 N/mm <sup>2</sup>	36.9 N/mm <sup>2</sup>	
接着幅 (mm)	30,40,50,70,100		
スパイラル筋	あり		なし
構成則	圧縮	拘束効果考慮	
	引張	テンションスティフニング効果考慮	
限界 応力	法線	式(12)による補正	
	接線	コンクリート引張強度	

#### 4.2 解析結果

結果は図-15に示すように、接着幅が50mmより小さくなくても、平均はく離強度が横ばいにならず、接着幅に応じて大きくなっている。さらに、接着幅とコンクリート断面幅が同等なると、これまでの接着界面内のコンクリートと樹脂の付着力のみではく離させるモデルでは、試験値より大きくなる傾向にあったが、接着界面に内部鉄筋の付着を考慮したモデルでは、試験結果とほぼ同値となった。これらより、接着幅が異なる場合の鋼板先端部のはく離現象は、内部鉄筋の付着力と接着部のコンクリート抵抗断面の影響を考慮することが重要な要素であることが分かった。

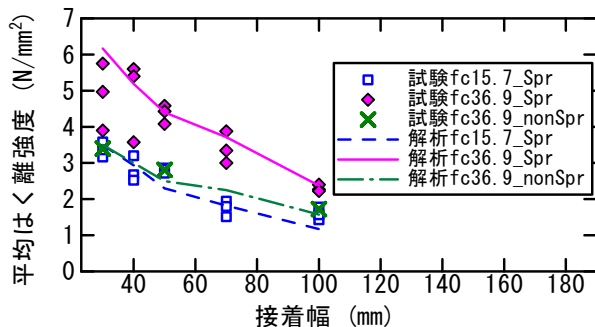


図-15 内部鉄筋の影響を考慮した解析結果

#### 5. まとめ

接着幅が異なる場合の鋼板接着のはく離現象に関する検討結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 接着幅が小さくなると、平均はく離強度が大きくなり、接着幅が大きくなると逆に小さくなる。
- (2) 試験体の破壊形態と全視野ひずみ計測によるひび割れ進展から、接着幅毎で破壊メカニズムが異なり、内部鉄筋の付着力がはく離強度に依存している。
- (3) コンクリートと樹脂接着界面にコンクリートと内部の鉄筋ないしスパイラル筋の付着力の影響を考慮した限界応力を鋼板の接着幅に応じて定義することによって、鋼板先端部のはく離現象を概ねシミュレートできる。

#### 6. おわりに

本研究は、接着幅が異なる場合の鋼板先端部の破壊メカニズムを明らかにでき、接着界面のはく離現象をモデル化できたと考える。今後は、この解析モデルを梁試験体に応用し、さらなる検討を行う予定である。なお、本研究は平成20年度科学研究費補助金、基盤研究(B)(2)(課題番号:19360205)の一部により行われた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 佐野正, 三浦尚: 鋼板接着によるコンクリート部材の補強設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.555/V-33, pp.117-pp129, 1996.11
- 2) 佐野正, 三浦尚, 小俣富士夫: RC 部材引張縁に接着された鋼材のはく離挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.16, No.1, pp.1019-1024, 1994.6
- 3) 安東祐樹, 浦田美生, 山本健太, 松田浩: 鋼板の接着幅が端部ではく離現象に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.1603-1608, 2008.6
- 4) 山谷敦, 中村光, 檜貝勇: 回転ひび割れモデルによるRCはりのせん断挙動解析, 土木学会論文集, No.620/V-43, pp.187-pp199, 1999.5
- 5) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の調査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, V-28, No.520, pp.1-11, 1995.8
- 6) 篠原賢至, 島弘: 一軸鉄筋コンクリート部材におけるひび割れ発生過程および引張剛性の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.11, No.2, pp.159-164, 1989.6
- 7) 田辺忠顕ほか: コンクリート構造, 朝倉書店, 1992.6