

## 論文 RC はりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響

菅 満宣<sup>\*1</sup>・中村 光<sup>\*2</sup>・檜貝 勇<sup>\*3</sup>・斉藤 成彦<sup>\*4</sup>

**要旨:** 付着長さおよびかぶり厚を変化させたRC一軸部材の両引き試験を行い、その付着特性を明らかにするとともに、平均付着応力-すべり関係のモデル化を行った。さらに、モデル化した付着特性を、鉄筋とコンクリートのすべりを考慮した有限要素解析に適用し、せん断破壊するRCはりのひび割れ性状やポストピーク挙動をより正確に再現できることを示した。また、付着強度をパラメータとした解析を行い、付着特性の相違がRCはりの挙動に及ぼす影響を検討した。

**キーワード:** 付着応力-すべり関係, 有限要素解析, せん断破壊, ひび割れ性状

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下RCと略記)構造物の有限要素解析において、解析の簡便性のために、多くの場合コンクリートと鉄筋は完全付着として扱われ、付着特性はテンションスティフニング効果を考慮したコンクリートの引張応力-ひずみ関係を用いることで間接的に扱われている<sup>1)</sup>。付着特性は、一般に鉄筋降伏以前のひび割れ性状や変形に影響を与える事が知られている。また、終局域に至るまでに付着劣化が生じている可能性があり、ポストピーク挙動にも影響を及ぼすことも推測される。したがって、RC構造物の挙動をより正確に評価するためには、適切な付着特性に基づきコンクリートと鉄筋のすべりを考慮できる解析が望ましいと考えられる。

そこで本研究では、ひび割れ間隔の異なるかぶりが薄いRCはりの引張側をモデル化したRC一軸部材の両引き試験を行い、平均付着応力-すべり関係のモデル化を試みた。そして、鉄筋とコンクリート間のすべりを考慮できる有限要素解析を用いてせん断破壊するRCはりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響を検討した。

## 2. 解析概要

## 2.1 すべりを考慮した有限要素解析

すべりの考慮は、図-1に示すように、コンクリートを2次元4節点アイソパラメトリック要素で、鉄筋を軸力のみ抵抗するトラス要素でモデル化し、両者の交点に2方向の非線形リンクバネ要素を挿入することで行った。この時、鉄筋の配置をコンクリート要素の分割に依存せずに行えるように、リンクバネ要素をコンクリート要素の任意辺上に配置できるようにモデル化を行った。

## 2.2 材料モデルおよび解析方法

解析に用いた圧縮応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係は、図-2に示すように最大圧縮応力( $f_c$ )まで二次放物線とし、その後応力が直線的に零まで減少するモデルを用いた。ここで、応力零時のひずみ( $\epsilon_m$ )は式(1)で与えられるNakamuraら<sup>2)</sup>が提案した圧縮破壊エネルギー( $G_{fc}$ )を考慮して決定した。また、圧縮強度は、Collinsら<sup>3)</sup>のモデルにより主引張ひずみによって低下させている。

\*1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

\*2 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 博(工) (正会員)

\*3 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

\*4 山梨大学助手 工学部土木環境工学科 博(工) (正会員)

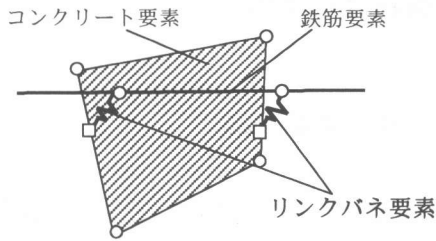


図-1 リンクバネ要素

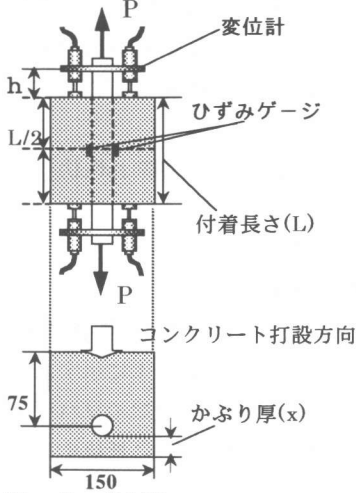


図-3 供試体

$$G_{fc} = 8.8\sqrt{f_c'} \quad (\text{MPa} \cdot \text{mm}) \quad (1)$$

引張応力下のコンクリートの挙動は、引張強度( $f_t$ )までは直線的に応力が増加するものとし、軟化域については、コンクリートの引張応力-ひび割れ幅関係および引張破壊エネルギーを用いて定めた。ここで、引張応力-ひび割れ幅関係は、3乗モデルを用い、引張破壊エネルギー( $G_{fc}$ )は式(2)<sup>2)</sup>で決定した。

$$G_{fc} = \frac{G_{fc}'}{250} \quad (\text{MPa} \cdot \text{mm}) \quad (2)$$

なお、破壊エネルギーを考慮したモデルを用いる場合、要素の等価長さ( $l_{eq}$ )が必要になるが、本解析では交点長さ<sup>4)</sup>を等価長さ<sup>5)</sup>に用いた。

鉄筋の応力-ひずみ関係は、降伏点以降の勾配を初期剛性の1/100としたバイリニアモデルとした。

解析は、最大荷重点以降の軟化挙動を捉えるために変位制御型の増分解析とし、

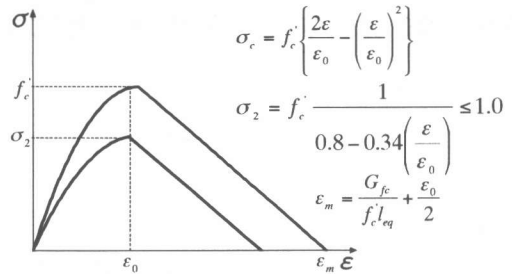


図-2 圧縮応力-ひずみ関係

表-1 供試体の諸元

NO.	L(mm)	X(mm)	$f_c'$ (MPa)	$f_t$ (MPa)
1-10	100	10	33.8	2.52
3-10		30		
5-10		50		
1-15	150	10	30.6	2.71
3-15		30		
5-15		50		
1-20	200	10	31.5	2.54
3-20		30		
5-20		50		

表-2 鉄筋の性質

呼び名	D(mm)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$f_y$ (MPa)	$E_s$ (MPa)
D25	25.4	506.7	377	$1.82 \times 10^5$

Newton-Raphson 法により収束計算を行った。また、コンクリートのひび割れモデルは、ひび割れ面でのせん断伝達モデルを考慮する必要のない回転ひび割れモデルを用いた。

### 3. RC部材の両引き実験

#### 3.1 実験概要

ひび割れが発生し、かぶりが薄い鉄筋コンクリート部材の付着性状を知るために、RCはりの引張側をモデル化した図-3に示す両引き試験供試体を作成した。供試体寸法は、3方向のかぶりを等しくし、一つの面のかぶりを10,30,50mmに、付着長さを100,150,200mmに変化させた。このとき、コンクリートはかぶり面を打ち込み底面として打設した。実験に用いた供試体の諸元および鉄筋の性質を表-1と表-2に示す。実験は各ケースに対して三体ずつ行った。供試体は、比較的小さい付着長さが短いものであるが、これはRC部材に生じるひび割れ間の

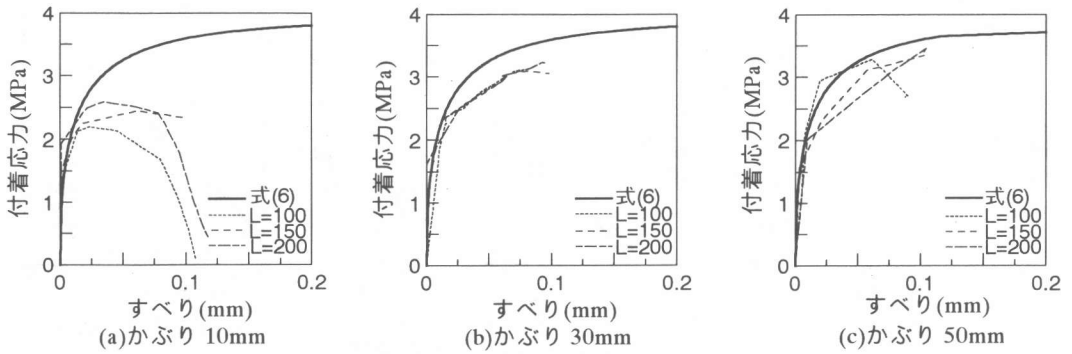


図-4 平均付着応力-すべり関係

付着挙動のモデル化を目的としたためである。なお、実験は鉄筋降伏によりすべて終了している。

### 3.2 平均付着応力-すべり関係

図-3に示すように、変位計は鉄筋に固定するため、変位の測定値には供試体端部から変位計固定位置までの鉄筋の伸び量も含まれる。そのため、コンクリートからの鉄筋のすべり量を次式により求めた。

$$s = x - \left( \frac{P}{E_s A_s} \right) \times h \quad (3)$$

このときのすべり量は両引き試験であることより、両端のすべり量の平均とした。また、平均付着応力( $\tau_0$ )は次式により算出した。

$$\tau_0 = \frac{P - A_s E_s \varepsilon}{u \cdot l / 2} \quad (4)$$

ここで、

$x$  : 変位計により測定された変位量、

$u$  : 鉄筋周長,  $A_s$  : 鉄筋断面積

$E_s$  : 弾性係数,  $l$  : 付着長さ,  $P$  : 荷重、

$h$  : 供試体端部から変位計固定位置までの距離

$\varepsilon$  : 供試体中央での鉄筋ひずみゲージの値

### 3.3 実験結果

実験より得られた平均付着応力-すべり関係を図-4に示す。図中、点線が付着長さ 100mm、破線が付着長さ 150mm、一点鎖線が付着長さ 200mm の実験値を示している。

かぶり厚さが 10mm の供試体では、初期段階では付着長さによらず、平均付着応力-すべり関係はほぼ同一であった。しかし、いずれの付

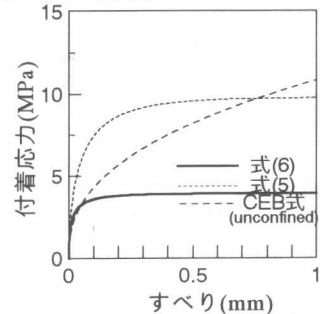


図-5 既往のモデルの比較

着長さの場合も、早い段階で付着応力のピークを迎えて、ピーク以後の付着応力は低下もしくは頭打ちとなる挙動を示した。

一方、かぶり厚さが鉄筋径以上となる 30、50mm の場合は、付着長さに関わらず平均付着応力-すべり関係はほぼ同じであった。しかし、付着長さが短い場合に、早い段階でピークを迎える傾向がみられた。

なお、今回の実験は、鉄筋の降伏により実験を終了しているため、付着応力のピークを示したかぶり 10mm 以外は、最大付着応力が求められていないことに注意する必要がある。

## 4. 平均付着応力-すべり関係

### 4.1 平均付着応力-すべり関係のモデル化

図-4に示す実験より得られた平均付着応力-すべり関係を既往のモデル<sup>5)6)</sup>と比較したところ、いずれのモデルも実験値を過大に評価するとともに、すべり量の少ない場合の曲線のたがりがうまく表現できていないことがわかった。そこで、本研究では島ら<sup>5)</sup>の提案式(式(5))

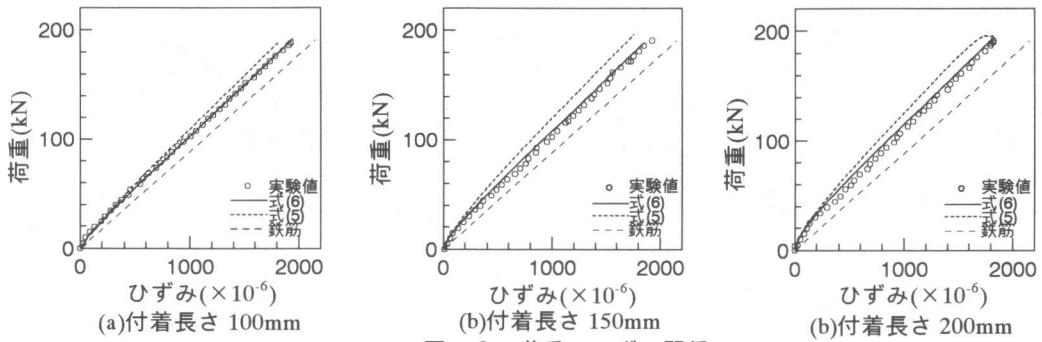


図-6 荷重—ひずみ関係

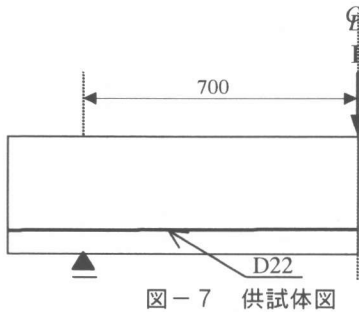


図-7 供試体図

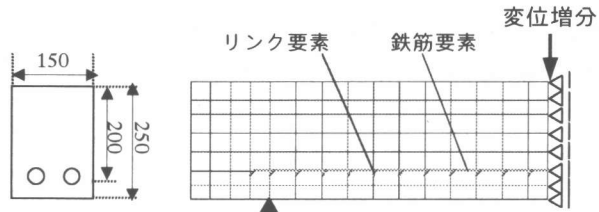


図-8 要素分割図

を参考にして、式(6)のように平均付着応力—すべり関係をモデル化した。式(6)は実験値を妥当に評価するように鳥らの提案式の付着強度を40%に低下させ、曲率を変化させたものである。

$$\tau = 0.90(f_c')^{\frac{2}{3}} \left( 1 - \exp\left(-40\left(\frac{s}{D}\right)^{0.6}\right) \right) \quad (5)$$

$$\tau = 0.4 \times 0.90(f_c')^{\frac{2}{3}} \left( 1 - \exp\left(-40\left(\frac{s}{D}\right)^{0.5}\right) \right) \quad (6)$$

ここで、 $s$ ：すべり量(mm)、 $D$ ：鉄筋径(mm)

式(6)で与えられる付着応力—すべり関係を図-4の実線で示す。また、既往のモデルとの比較を図-5に示す。なお、各モデルは  $f_c' = 33.8 \text{ MPa}$  とした時の結果を示している。各モデルは実験条件が異なるために直接比較する対象とならないかもしれないが、今回の実験結果から得られたモデルがすべり量が小さい範囲から付着応力が低下するものであることがわかる。

#### 4.2 荷重—ひずみ関係

式(6)の付着応力—すべり関係を用い、有限要素解析により実験結果の再現を試みた。

図-6にかぶり厚50mmの荷重—部材中心位置の鉄筋ひずみ関係を示す。図中、丸印が実験

値、実線が式(6)で示すモデルを考慮した解析値である。また、比較のため、鉄筋単体の挙動を破線で、付着応力—すべり関係の例として式(5)を用いた場合の解析結果を点線で示す。

式(6)を用いた解析結果は実験値とよく一致し、テンションスティフニング効果を妥当に評価していることがわかる。一方、付着応力を本モデルより大きく評価している式(5)を用いた解析では、実験値を過大に評価し、今回の実験結果を妥当に再現できないことがわかる。なお、かぶり10mmならびに30mmの場合も同様な結果が得られている。

### 5. せん断破壊するはりの解析

#### 5.1 解析モデル

解析の対象としたRCはりには、図-7に示すように有効高さ200mm、せん断スパン比3.5、引張鉄筋比2.58%の単純はりである。材料の諸元は、コンクリートの圧縮強度36.8(MPa)、引張強度3.04(MPa)であり、鉄筋の降伏強度358.0(MPa)、ヤング係数  $1.90 \times 10^5 \text{ (MPa)}$  である。このRCはりの破壊モードは、斜めひび割れ発生により急激に耐力が低下する斜め引張破壊

である。

解析は、付着特性として式(6)を用いてすべりを考慮したもの、完全付着としたもの、鉄筋をコンクリート要素内に平均的に取り扱うRC要素としたものの3通りを行った。解析モデルは図-8に示す対称1/2モデルとして取り扱った。

## 5.2 解析結果

図-9に実験および解析における荷重-載荷点変位関係を示す。図中、丸印が実験値、実線がすべりを考慮した解析、破線が完全付着とした解析、点線がRC要素による解析結果を示している。

荷重-変位関係において、斜めひび割れが発生して急激な荷重低下をするまでは、すべりを考慮した解析の変形が若干大きくなるが、いずれの場合もほぼ同様の結果を示し、実験値を妥当に評価していることがわかる。しかし、斜めひび割れ発生後の挙動は大きく異なり、完全付着ならびにRC要素を用いた場合は、斜めひび割れ発生後、タイドアーチ的耐荷機構が形成されたと推測され、荷重が増加した後、載荷点下のコンクリートの圧縮破壊によって最大荷重を迎えた。それに対し、すべりを考慮した結果は、若干荷重増加が認められるが、早期に荷重が急激に低下し実験値をより正確に評価していることがわかる。

図-10に実験終了時のひび割れ状況と解析におけるピーク後の変位4mm付近のひび割れ図を示す。なお、解析におけるひび割れ図は各Gauss点での主引張ひずみと方向により、ひび割れの幅と方向を表示している。

ひび割れ図では、いずれの結果も局所化した斜めひび割れの発生が認められる。しかし、完全付着ならびにRC要素を用いた場合のひび割れ図は、斜めひび割れは載荷点に近い位置に発生する傾向を示し、実験結果と異なっている。それに対し、式(6)を用いてすべりを考慮した場合には、曲げひび割れの発生位置や斜めひび割れの発生位置をより実験のひび割れに近い形で再現している。

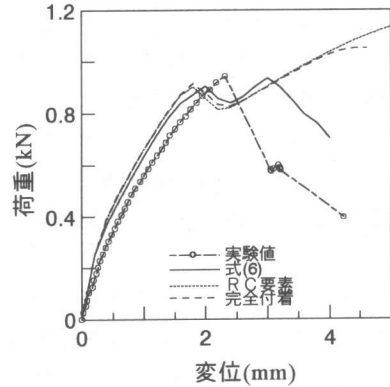


図-9 荷重-載荷点変位関係

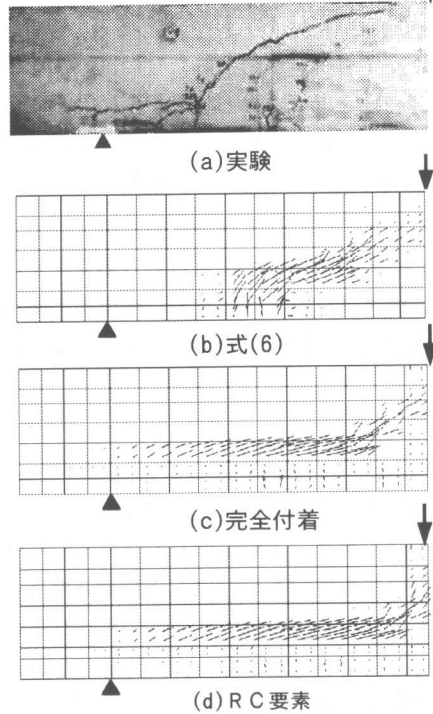


図-10 ひび割れ図

付着特性は、ひび割れ性状やポストピーク挙動に大きな影響を及ぼすことが示され、実験結果を妥当に再現するためにも、付着特性の適切な評価が重要であることがわかる。

## 5.3 付着特性がRCはりに及ぼす影響

図-8に示すRCはりを対象として、付着強度の相違がRCはりの挙動に及ぼす影響を検討した。解析において、付着強度を式(6)の1/2倍( $\tau_{\max}=2.06\text{MPa}$ )および1/50倍( $\tau_{\max}=0.5\text{MPa}$ )に

変化させ、その影響を調べた。図-11に、解析より得られた荷重-載荷点変位関係を示す。図において、丸印が実験値、実線が式(6)を用いた解析、点線が付着強度を1/2倍としたもの、破線が付着強度を1/50倍したものを示している。また、参考のために、曲げ耐力 $V_u$ 、二羽式より算出した斜め引張耐力 $V_c$ をあわせて示している。

付着強度を低下させた場合、斜め引張耐力を越えても、荷重が増加し、曲げ耐力あたりで最大となる挙動を示すことがわかる。また、付着強度がゼロに近い場合には、曲げひび割れ発生後、急激に剛性が低下する挙動を示す。

図-12に解析より得られたひび割れ図を示す。付着応力を低下させることで斜めひび割れは発生せず、載荷点近傍の曲げひび割れのみが発生し、明らかに破壊モードが変化している。

このように、付着特性は部材の破壊モードや破壊モードの変化に伴う耐荷力にも影響を及ぼすため、例えば付着劣化した既存構造物の解析を行う場合は、注意する必要があると言える。

## 6. 結論

付着長さおよびかぶり厚を変化させたRC一軸部材の両引き試験を行い、その付着特性を明らかにした。また、実験結果および有限要素解析の結果の比較検討を行い以下の結論を得た。

(1) 付着長さおよびかぶり厚を変化させたRC一軸部材の両引き試験を行い、平均付着応力-すべり関係のモデル化を行った。今回の実験で対象とした付着長さが比較的短くかぶりが薄い場合の付着応力は既存の結果よりかなり小さな値を示す。

(2) モデル化した平均付着応力-すべり関係を用いた有限要素解析を行うことで、完全付着を仮定した解析を行う場合よりもせん断破壊するRCはりのポストピーク挙動を妥当に評価できるとともに、実験の斜めひび割れ性状をより正確に再現できることを示した。

(3) RCはりの力学的挙動に及ぼす付着特性の

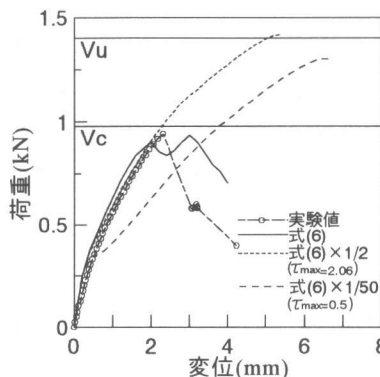


図-11 荷重-載荷点変位関係

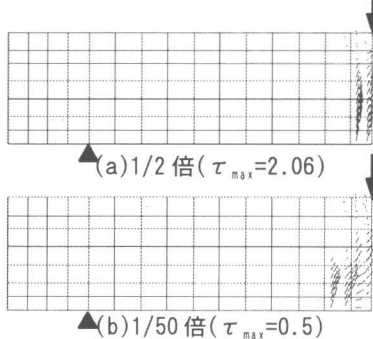


図-12 ひび割れ図

影響として、付着応力-すべり関係が破壊モードならびに耐荷力に及ぼす影響が認められた。

## 参考文献

- 岡村甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂
- Nakamura, H. and Higai, T :Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete , Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, pp.259-272,1999, JCI
- M.P. Collins, and D. Mitchell : Prestressed Concrete Basics, Canadian Prestressed Concrete Institute,1987
- 山谷敦, 中村光, 足立正信, 檜貝勇：破壊エネルギーを考慮した有限要素法解析における要素形状の検討，コンクリート工学年次論文報告集，vol.19, No.2, pp.57-62,1997
- 島弘, 周礼良, 岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集第 387 号，土木学会，pp165-174, 1987. 2
- CEB-FIP MODEL CODE 1990 First Draft, 1990