

論文

[2026] RC 及び SRC 部材に発生する最大ひびわれ幅に関する研究

正会員 三浦 尚 (東北大学工学部)

正会員○瀬本浩史 (東北大学大学院)

1. まえがき

コンクリート部材に引張力がかかると、コンクリートの引張部分に横ひびわれが発生する。このひびわれはコンクリート応力が引張強度に達したときに鉄筋軸直角方向に発生する。この引張部分に発生したひびわれは、設計計算においてコンクリート引張部分を考慮に入れていないことから、耐力等に直接影響を与えないが、ひびわれ幅が大きくなると、そのひびわれからコンクリート部材にとって有害な物質が入り込み易くなり、内部鉄筋の腐食等、部材の耐久性に大きな影響を及ぼすことが考えられる。部材に発生したひびわれの幅はそのひびわれ間隔にほぼ比例することが知られているが、そのひびわれ幅及びひびわれ間隔は、断面形状や荷重状態によって複雑に変化しており、簡単に予測することはできない。

そこで本研究では、耐久性に関する一つの目安としてひびわれ幅の中でも最も耐久性に影響があると思われる最大ひびわれ幅に着目し、引き抜き試験より求まるコンクリートと鉄筋及び鉄骨との付着性状を用いて、両引き供試体及び梁供試体に発生する最大ひびわれ幅を計算して実験値と比較検討をおこなった。

2. 最大ひびわれ幅について

コンクリート部材に発生する横ひびわれはコンクリートの引張応力が引張強度に達したときに発生する。両引き試験についてその状況を考えると、図-1 (a)に示すようにコンクリート応力は端部鋼材引張力の増加にともない徐々に増加していき、供試体中心の引張応力は引張強度へ漸近していき、ある引張力において引張強度に達してひびわれが発生する。このひびわれ直前での供試体の長さが端部鋼材引張力に対する最大ひびわれ間隔であり、これは断面や鋼材応力などによって変化する。この場合、鋼材からコンクリートへの力の伝達は鋼材とコンクリートとの付着によって伝えられる。この付着力は、鋼材とコンクリートとの間のすべりによる機械的作用または摩擦的作用によって発生し、すべり量が大きくなればそれだけ付着力も大きくなると考えられる。両引き試験においては、コンクリート中の応力分布は供試体長即ちひびわれ間隔によって異なる。供試体長が十分長いと、図-1 (b)に示すように、すべりは供試体

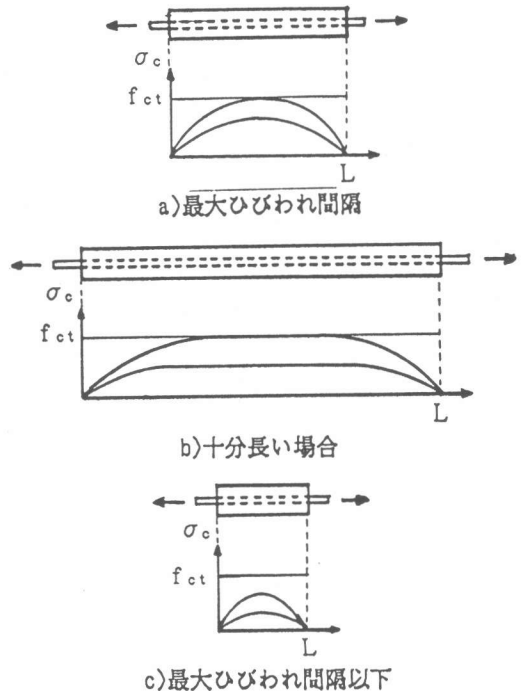


図-1 両引き試験におけるコンクリートの応力状態

端部のみで発生するため供試体中心部ではコンクリート応力は一定となり、応力がある値より大きくなるとこの範囲内のどこかでひびわれが発生することとなる。逆に供試体長が短い場合、供試体端部でのすべりも余り大きくならないため、図-1

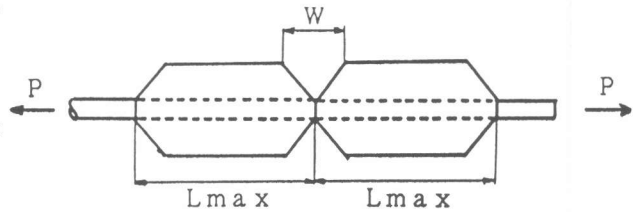


図-2 両引き試験におけるひびわれ幅

(c)に示すように、コンクリートの引張応力が引張強度に達しない。そして、ひびわれが発生している一般の部材の場合そのひびわれは図-1(a)または(c)の様な状態にある。そして、最大ひびわれ間隔の場合ひびわれ間のコンクリート応力の分布は付着性状が一定であれば、ひびわれ間中央のみで引張強度に等しくなるほぼ一定の分布となるものと考えられる。また、付着がよい程分布曲線は急になり、悪い程なめらかになると考えられる。一方、図-2に示されるようにひびわれ幅は、ひびわれ面でのひびわれ間中央から鋼材とコンクリートの伸び量の差の2倍であると考えられる。つまり、ひびわれ面での鋼材の伸びを $\delta_s$ 、コンクリートの伸びを $\delta_c$ とすれば、ひびわれ幅 $W$ は次のように仮定できる。<sup>1)</sup>

$$W = 2 \cdot (\delta_s - \delta_c) \quad (1)$$

そして、最大ひびわれ間隔に発生するひびわれ幅が最大ひびわれ幅であると考えられる。引き抜き試験において、自由端すべり量と載荷端すべり量がほぼ等しいことが予備実験及び文献2)によって確かめられ、また、付着応力度とすべり量との間に相関があると考えられるため、引き抜き試験から求まる付着応力度とすべりとの関係は両引き試験等の局部での付着応力度やすべりに対応できると考えられる。そして、コンクリートの横ひびわれは、鋼材とコンクリートとの付着と深く関係があるため、引き抜き試験から求まる付着応力度とすべりとの関係を用いることによって、最大ひびわれ幅や最大ひびわれ間隔を推定することができると考えられる。

### 3. 実験材料

セメントは市販の早強ポルトランドセメント（比重3.13）、細骨材は宮城県白石川産川砂（比重2.56）、粗骨材は宮城県丸森産碎石（比重2.87）を使用し、混和剤としてリグニンスルホン酸塩を主成分とするAE減水剤を使用した。コンクリートの配合は $W/C=53\%$ 、 $s/a=38\%$ 、 $W=194\text{kg}$ とし目標圧縮強度は $380\text{kgf/cm}^2$ 、引張強度は $27\text{kgf/cm}^2$ とした。また、鋼材には、異形鉄筋D13、D25（いずれもSD30）、そして、平鋼（SS41）そして、平鋼の付着性能を向上させるために表面に突起をつけた異形鉄骨（SS41）を使用した。その異形鉄骨の形状を図-3に示す。

### 4. 実験方法及び供試体

#### 1) 引き抜き試験

各鋼材とコンクリートの付着性能を調べるために、日本コンクリート工学協会にて提案されている引き抜き試験法に従い、異形鉄筋D25、D13、そして、鉄骨について、各鋼材の付着応力度と自由端すべり量との関係を求めた。その供試体形状を図-4に示す。各供試体は、かぶりが等しくなるように作製し、平鋼をのぞいて $\phi 6\text{mm}$ の丸鋼により4cmのピッチでスパイラル補強した。また、全供試体とも、コンクリートが反力を受

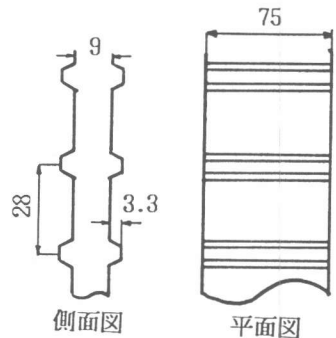


図-3 異形鉄骨の形状

ける側に、供試体高さの半分の非付着区間を設けている。すべりは、精度1/1000のダイヤルゲージで測定した。

## 2) 付着応力度分布測定試験

最大ひびわれ間隔における付着応力度の傾向をつかむためにRC及びSCについて以下の手順に従って付着応力度分布を測定した。各鋼材に供試体の中心から端部まで歪みゲージを埋め込んで载荷をおこない、各荷重に対する鋼材の歪を測定した。その歪を用いて各測点での鋼材応力を求め、その変化から付着応力度を計算した。それぞれの供試体の断面を図-5に示す。歪の測定には、デジタル歪計を用いた。

## 3) 最大ひびわれ幅 最大ひびわれ間隔測定試験

RC、SC、SRC供試体について、両引き試験を以下の手順でおこない、最大ひびわれ幅及び最大ひびわれ間隔を測定した。実験では供試体内にあらかじめ間隔を変化させたノッチを設けて载荷をおこない、ノッチ断面以外にひびわれが生じたひびわれ間隔の最小値とノッチ断面以外にひびわれが生じないひびわれ間隔の最大値との間にある間隔を最大ひびわれ間隔とし、最大ひびわれ間隔において発生したひびわれ幅を最大ひびわれ幅とした。断面を図-6に示す。ひびわれ幅は、供試体表面にコンタクトポイントを設置しておき、精度1/1000のコンタクトタイプのひずみ計を用いて測定した。

1)2)3)の各供試体とも材令1日で脱型後、実験日まで水中養生をおこない、材令7日で試験をおこなった。試験には、60ton 引張試験機を用いた。

## 4. 実験結果及び考察

### 1) 引き抜き試験結果

引き抜き試験より求まる各鋼材の付着応力度と自由端すべり量の関係を図-7に示す。

なお、それぞれの値は供試体4本の平均値である。異形鉄筋、異形鉄骨の供試体は、コンクリートが割裂し、平鋼の供試体は、コンクリート中から平鋼がすべり出て破壊した。図-7より、異形鉄筋D13、D25、そして、異形鉄骨は、表面に突起のついていない平鋼に比べて、優れた付着性能を持っており、平鋼はすべり量が増加しても付着応力の増加が余りない事がわかる。

### 2) 付着応力度分布測定試験

図-8、図-9にRC及びSCの最大ひびわれ間隔の供試体中心から供試体端部までの付着応力度分布の一例を示す。RC供試体において付着応力度は、供試体中心から一様に増加し、ある

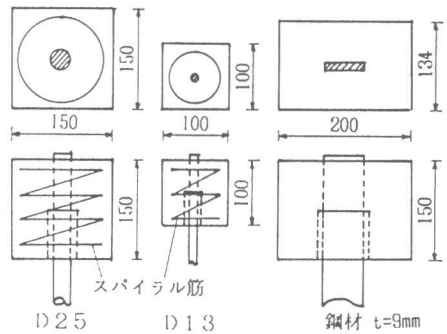


図-4 引き抜き供試体 (単位mm)

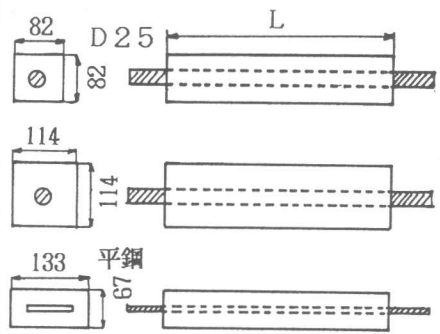


図-5 付着応力度分布測定供試体

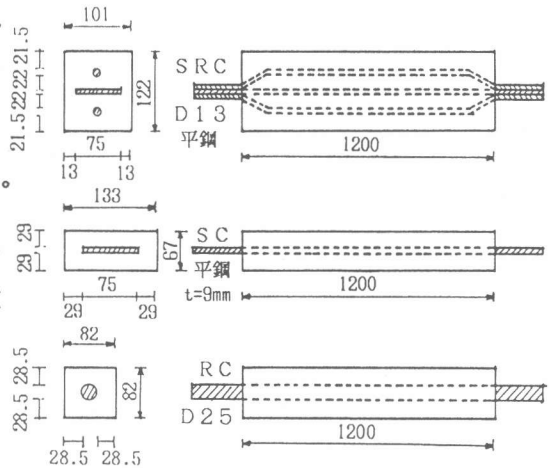


図-6 ひびわれ分散性測定供試体

点で減少に転じている。これは、異形鉄筋のフシの作用により発生した内部ひびわれが進展したことにより供試体端部で付着の乱れが生じたために付着応力度が減少したと思われる。この減少の始まる位置は、鉄筋の付着性状によって多少は変化すると考えられるが数種の実験データから、最大ひびわれ間隔においては供試体端部から供試体長の20%程度の長さとなっている事がわかった。一方、SC供試体の付着応力度分布は、RCに比べて値はかなり小さく、また、供試体端部で付着応力度の減少を示していない。これは引き抜き試験で示されるように付着が弱く、平鋼には異形鉄筋のようなフシの作用が働かないため供試体端部で付着の乱れが生じないためと思われる。

### 3) ひびわれ分散性測定試験結果

ひびわれ面での鋼材応力度が1400kgf/cm<sup>2</sup>に対する両引き供試体の最大ひびわれ幅、最大ひびわれ間隔を表-1に示す。なお、この値はノッチ間隔を変化させたそれぞれ5~10組の結果から総合的に判断したものである。表-1に示されるようにSC供試体の最大ひびわれ幅及び最大ひびわれ間隔は同一鉄筋比においてRC供試体よりもかなり大きい値を示している。これは、平鋼の付着能力が引き抜き試験の結果からも示されるように異形鉄筋に比べかなり劣っているためと思われる。また、同一の鋼材において、鉄筋比が小さくなると最大ひびわれ幅及び最大ひびわれ間隔とも大きくなっている。これは鉄筋比が小さくなるとコンクリート断面が増え、ひびわれが発生しにくくなるためと思われる。

### 4) ひびわれ幅の検討

以上の実験結果を用いて、RC、SCの最大ひびわれ間隔における付着応力度分布の推定をおこなった。<sup>3)</sup>

RC及びSCの付着応力度の増加部については引き抜き試験より求まる各鋼材の自由端すべり量(s)と付着応力度( $\tau$ )との関係を用いた。

$$\tau = f(s) \quad (2)$$

さらに、RCにおける供試体端部での付着応力度の減少部については、数種の実験データからその減少の始まる位置を供試体端部から供試体長の20%の長さの位置とすることとし、その曲線を上に凸の2次曲線で近似することとした。

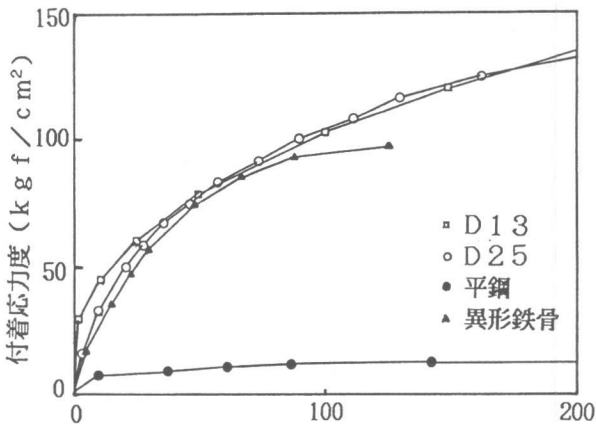


図-7 各鋼材の自由端すべり量と付着応力度の関係

(D25)

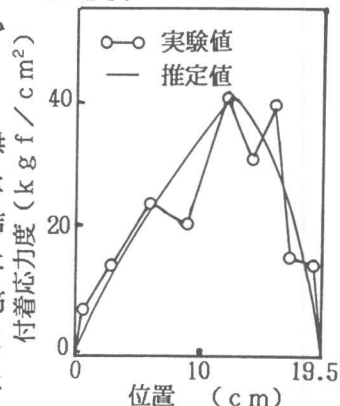


図-8 両引き供試体の付着応力度分布

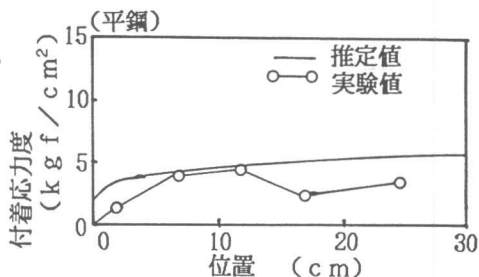


図-9 両引き供試体の付着応力度分布

$$\tau = p \cdot x^2 + q \cdot x + r \quad (3)$$

供試体端部でのすべり量を仮定し、第1回目の近似として位置とすべりの関係を直線とした。

$$s = g(x) = (2 \cdot x / l) s_0 \quad (4)$$

この位置とすべりの関係(式(4))を式(2)に代入して付着応力度分布( $\tau(x)$ )を求め、RCについては式(3)を利用して付着応力度の減少部を考えた。この求まった付着応力度分布から力の釣合を考えることにより、鋼材応力( $\sigma_s(x)$ )、コンクリート応力( $\sigma_c(x)$ )を求めた。

$$\sigma_s(x) = \sigma_s(x + \Delta L) - \tau(x) \cdot l \cdot \Delta L / A_s \quad (5)$$

$$\sigma_c(x) = A_s (\sigma_s(L/2) - \sigma_s(x)) / A_c \quad (6)$$

ここで、 $l$ : 鉄筋周長  $A_s$ : 鉄筋断面積

$\Delta L$ : 軸方向間隔  $A_c$ : コンクリート断面積

さらに求まる両者の歪から両者の各位置での相対すべり量 $g(x)$ を求めた。

$$s = g(x) = g(x - \Delta L) + (\sigma_s(x) / E_s - \sigma_c(x) / E_c) \cdot \Delta L \quad (7)$$

ここで、 $E_s$ : 鋼材のヤング率  $E_c$ : コンクリートのヤング率

そして、このときのひびわれ幅 $W$ は供試体長を $L$ とすれば次式で与えられる。

$$W = 2 \cdot g(L/2) \quad (8)$$

この新たに求まった位置とすべりの関係を用いて2回目以降同様の方法で付着応力度分布を推定し、同様の解析をある精度以下に収束するまでおこなった。

その解析の結果、RCの付着応力度分布は精度良く推定することができたが(図-8参照)、SCについては推定値と実験値にかなりの開きがあった。これは、今回行った引き抜き試験方法ではコンクリートに圧縮力がかかり鋼材を締め付けるような作用をすることになり、主として摩擦力によって付着力が発揮される平鋼においては、コンクリートに引張が作用している場合と比べて付着力がおおきくなる結果となったと思われる。そこで、平鋼の表面形状は均一であり、また、平鋼の付着能力に及ぼすコンクリート強度の影響が小さいことが実験より確かめられたため、引き抜き試験のデータに修正係数として一定値を用いることができると考え、推定するための修正係数として1/2を乗じて付着応力度を推定することとした。その結果、推定値と実験値は十分な一致をみた。(図-9参照)

以上の結果より付着応力度分布を精度良く推定することが可能となったので、ひびわれ直前での付着応力度分布を考えることにより、RC、SC、SRCの最大ひびわれ幅、最大ひびわれ間隔を推定した。その

表-1 最大ひびわれ幅と最大ひびわれ間隔

	鋼材比 (%)	Lmax (cm)		Wmax (10 <sup>-3</sup> mm)	
		推定値	実験値	推定値	実験値
RC	8.2	15.8	18	81.4	93
	6.1	19.8	20	96.1	103
	4.1	28.7	28	120.1	107
SC	8.2	59.9	55	308.6	309
SRC	8.2	18.6	23	96.5	115
	6.1	23.9	28	116.0	121
	4.1	35.8	40	148.2	177

解析結果を表-1に示す。この値は、供試体端部での鋼材応力度が1400kgf/cm<sup>2</sup>・コンクリートの引張強度が27kgf/cm<sup>2</sup>の時の最大ひびわれ幅と最大ひびわれ間隔を示している。この表よりRC、SCの最大ひびわれ幅、最大ひびわれ間隔については、推定値と実験値は十分な一致をみているが、SRCにおいては、最大ひびわれ幅、最大ひびわれ間隔とも実験値よりも推定値が小さくなっている。これは、本解析では、付着が完全に発揮されている状態を想定している

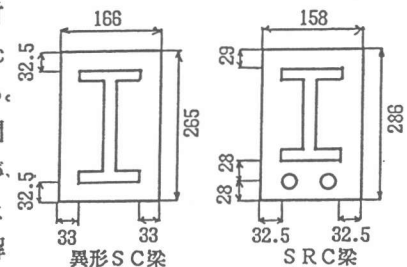


図-10 梁の断面

ため、ブリージングの影響の大きいSRCにおいて推定値が実験値よりもひびわれ分散性のよい結果となったと思われる。

このように両引き供試体の最大ひびわれ幅及び最大ひびわれ間隔を精度良く推定することができたため、同様の解析を図-10に示した梁供試体に対してもおこなった。梁においてはモーメントの釣合を考え、計算を簡素化するため、中立軸の位置をひびわれ面とひびわれ間中央にかけて直線的に変化させ、すべり量は縦方向に中立軸から直線的に変化すると仮定し、ウェブは梁の中立軸以下の引張側のみを考慮して推定をおこなった。この解析の結果を表-2に示す。この値は引張フランジレベル、鉄筋レベルでの鋼材応力度が1400kgf/cm<sup>2</sup>の時の値である。

以上の結果から、本解析法が両引き及び曲げ供試体の最大ひびわれ幅、最大ひびわれ間隔を推定するのに有効な1手段であると考えられる。

この解析法を使って、RC、SRCの両引き試験とSRC梁、異形SC梁の曲げ試験におけるひびわれ部分の各鋼材応力度に対する最大ひびわれ幅、最大ひびわれ間隔の変化をそれぞれ図-11, 図-12に示す。この図で、実線は最大ひびわれ間隔、点線は最大ひびわれ幅を示している。この図から最大ひびわれ幅は鋼材応力度の増加に伴いほぼ比例的に増加し、最大ひびわれ間隔は単調に減少しある値に収束していくことがわかる。そして、平鋼部分を多く持つ部材は、平鋼が引き抜き試験の結果からも明らかのようにすべりが増加しても付着応力度の増加がほとんど見られないので鋼材応力の増加に伴い最大ひびわれ幅の増加量が異形鉄筋を持つ部材に比べて大きくなっていることが判断できる。

5. 結論

使用鋼材の付着性状を引き抜き試験より求めることによって、コンクリート部材の最大ひびわれ幅、最大ひびわれ間隔を推定することができることがわかった。

[参考文献] 1) 三浦 尚、佐野 正、田中克人：鉄骨鉄筋コンクリートのひびわれ分散性に関する研究、セメント技術年報、昭和58年、pp.455~458  
 2) D.Watsttain : Distribution of Bond Stress in Concrete Pull-out Specimens, J.of ACI VOL.18,NO18 MAY 1947  
 3) 三浦 尚、瀬本浩史、岩城一郎：鉄筋コンクリート及び鉄骨鉄筋コンクリート部材に発生するひびわれに関する研究、土木学会年次講演会,1988,pp304~305

表-2 推定結果(梁)

	Lmax	Wmax
SRC	25.1	124.8
異形SC	25.4	128.0

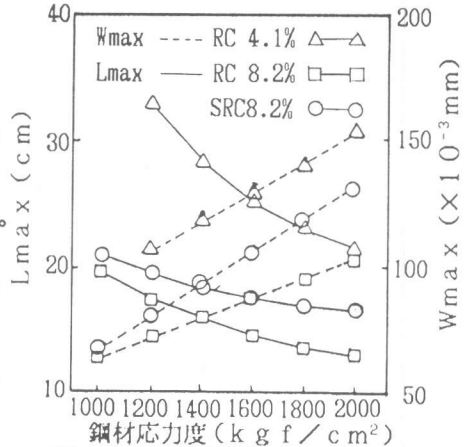


図-11 両引き試験のひびわれ分散性の推移

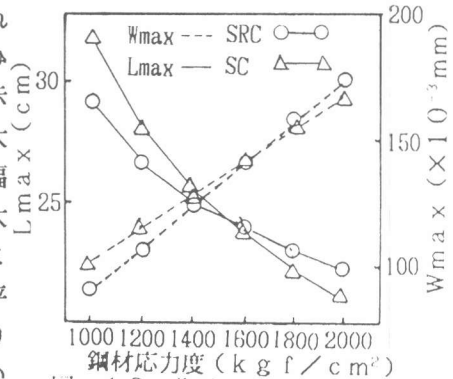


図-12 曲げ試験のひびわれ分散性の推移