

論文

[1169] RC部材引張縁に接着された鋼板のはく離現象に関する研究

佐野 正^{*1}・三浦 尚^{*2}・小俣富士夫^{*3}

1. はじめに

鋼板接着工法は、既設RC構造物の表面にエポキシ樹脂を用いて鋼板を接着し、部材断面内の鉄筋量の不足を外部から補おうとする工法である。わが国では道路橋RC床版の補強工法として発達してきたが、桁やりを補強対象とした体系的な研究は少なく、補強効果や終局に至るまでの破壊現象等については不明な点が残されている。

筆者らは、これまでにRCはり供試体に長さおよび厚さの異なる鋼板を接着し、曲げに対する補強効果や破壊現象を検討してきた[1]。その結果、鋼板の接着長がスパンの95%と長い場合、鋼板を接着していない供試体と比較して曲げ剛性や降伏荷重、圧壊荷重が高まるといった補強効果が確認された。これに対し、鋼板の接着長がスパンの47%と短い場合、鋼板の端部付近ではく離を生じた。ただし、鋼板のはく離する以前においては曲げ剛性が高まるといった効果が認められ、十分な補強効果を発揮させるためには鋼板をはく離させないようにすることが重要であることが確認された。

本研究は、このような鋼板のはく離を鋼板とコンクリートとの接着性に関する現象と考え、RC部材の引張部をモデル化したRC両引き供試体に長さ、幅の異なる鋼板を接着し、鋼板のはく離現象について検討したものである。

2. 実験概要

供試体の形状寸法を図-1に示す。鋼板を接着するRC両引き供試体は、断面10cm×10cm、長さ30cmである。鋼板はRC供試体の両側面に接着し、端部を高力ボルトで鋼製ブロックに固定した。実験要因を表-1に示す。今回の実験では鋼板の厚さは4.5mmで一定とし、鋼板の幅および長さ、接着樹脂の厚さを変化させた。鋼板厚4.5mmおよび樹脂厚5mmは、RC床版の補強で一般的に採用されている厚さである。実験に使用したエポキシ樹脂および鋼材の物性を表-2および表-3に示す。実験は各タイプとも2体を一組として行い、図-2に示すような方法で载荷した。測定項目は鋼板のはく離荷重、鋼板のひずみ等である。

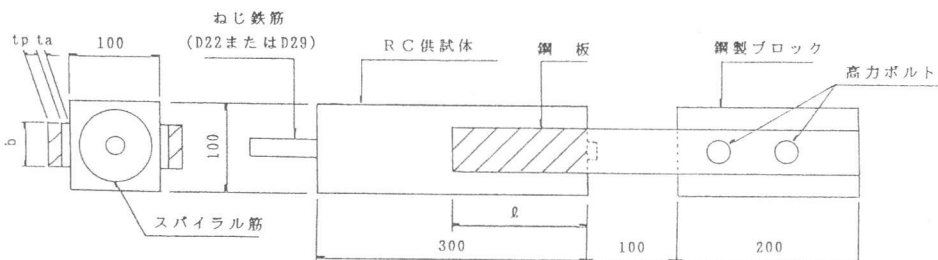


図-1 両引き供試体の形状寸法(単位mm)

- *1 東北大学大学院博士課程後期課程(ショーボンド建設(株)土木研究所勤務)、工修(正会員)
- *2 東北大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)
- *3 ショーボンド建設(株)土木研究所(正会員)

表-1 両引き供試体実験要因(単位mm)

供試体 No.	鋼板(SS400)			樹脂	fc'	ft	弾性係数 (kgf/cm ²)
	t p	b	ℓ				
1	4.5	50	150	5	298	23.9	2.20×10 ⁵
2				10			
3				5			
4			300	10			
5				5			
6				10			
5	100	300	5	281	24.7	2.30×10 ⁵	
6			10				

fc', ft: コンクリートの圧縮強度および割裂引張強度
強度および弾性係数は材令14日の測定値

表-2 エポキシ樹脂の物性(材令7日)

圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	引張せん断 強度 (kgf/cm ²)	ポアソン比
729	2.30×10 ⁴	540	128	0.38

表-3 使用鋼材の物性

鋼材	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
ねじ鉄筋D22	4130	6070	1.97×10 ⁵
ねじ鉄筋D29	4140	5850	1.98×10 ⁵
鋼板 t=4.5mm	3540	4520	1.92×10 ⁵

ねじ鉄筋、鋼板の材質は、それぞれSD345、SS400である

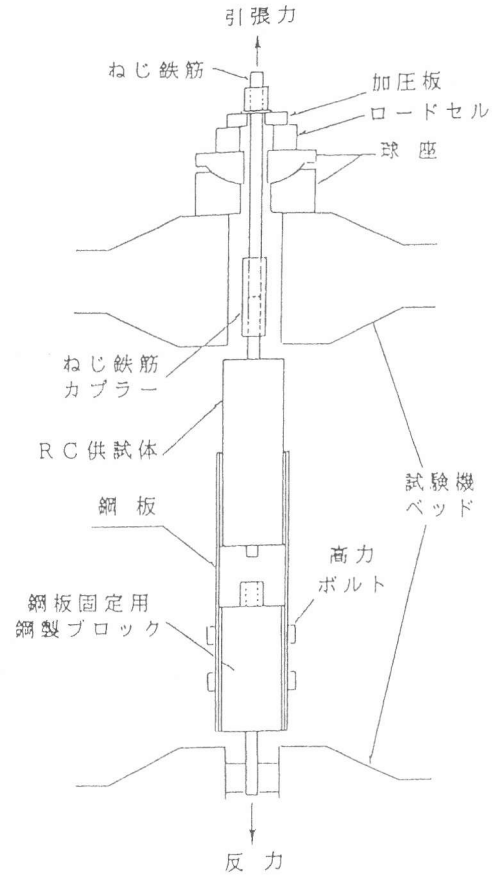


図-2 荷重方法

3. 実験結果

3.1 結果一覧およびはく離形態

実験結果を表-4に、鋼板のはく離形態を図-3に示す。

表-4 実験結果一覧

供試体 No.	接着幅 (cm)	接着長 (cm)	樹脂厚 (mm)	はく離荷重 (tf)	はく離時平均接着 応力度(kgf/cm ²)	はく離形態			
1	5	15	5	①	4.6	30.9	B		
				②	3.5	23.0	C		
2			10	①	3.1	20.9	A		
				②	4.0	26.7	C		
3			30	30	5	①	7.9	26.2	B
						②	8.4	27.8	B
4	10	①			7.9	26.3	B		
		②			8.0	26.7	B		
5	10	5			①	11.0	18.3	B	
					②	11.0	18.3	A	
6	10	10	①	11.3	18.8	B			
			②	10.8	17.9	A			

はく離時平均接着応力度とは、はく離荷重を鋼板の接着面積で除した値

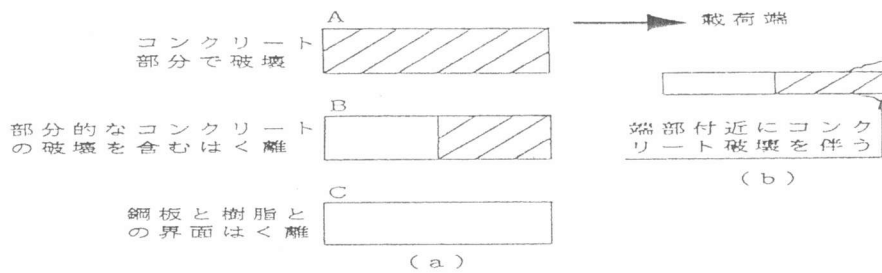


図-3 鋼板のはく離形態

今回の実験では図-3(a)に示すような3種類のはく離形態がみられた。Aは樹脂とコンクリートとの界面でコンクリートがほぼ全面にわたって破壊する場合、Bは部分的なコンクリートの破壊と鋼板と樹脂との界面はく離が混在する場合、Cはほぼ全面にわたって鋼板と樹脂との界面はく離が生じる場合である。ただし、鋼板幅が5cmの供試体では、図-3(b)に示すように、載荷端側で鋼板周囲にもコンクリートの破壊が及んだ。いずれの場合も、鋼板は衝撃音を伴って一瞬にしてはく離し、はく離時点で鋼板は降伏に達していなかった。RCはり供試体の実験[1]では、はく離形態はすべてAであったが、今回の実験ではBの形態が多く見受けられた。

表-4より、はく離荷重は、樹脂厚にかかわらず、平均が約4tf、8tfおよび11tfの領域に分類される。すなわち、接着幅が5cmで一定の場合、接着長が15cmから30cmへ2倍になったことによりはく離荷重も約2倍となった。しかし、接着長が30cmで一定の場合、接着幅を5cmから2倍の10cmとしてもはく離荷重は必ずしも2倍とはならず、約1.4倍に留まっている。この原因として、接着幅が5cmの場合、図-3(b)に見られるようにはく離によるコンクリートの破壊が鋼板の周囲にも及び、鋼板幅よりも幾分大きい領域が破壊面となるのに対し、接着幅が10cmの場合には、供試体の幅と同一であり、破壊に抵抗できる幅が限定されるという接着幅と供試体の幅との関係によるものと思われる。

はく離時の平均接着応力度は接着幅が5cmでは約26kgf/cm²、10cmでは約18kgf/cm²であった。ここで、接着応力度とは接着面に作用するせん断応力度を意味し、これをある範囲内で平均化したものが平均接着応力度である。今回の実験より、接着幅が一定の場合、はく離時平均接着応力度は接着長や樹脂厚にかかわらずほぼ一定の値を示すものと思われる。

3.2 鋼板ひずみおよび接着応力度の分布

鋼板のひずみ分布の例として、接着長が30cmで接着幅が5cm、樹脂厚が5mmの場合、同様の長さで接着幅が10cm、樹脂厚が10mmの場合の結果を図-4に示す。比較は、現在RC床版の補強設計で採用されている鋼板の許容応力度800kgf/cm²の時点で行った。また、供試体の両側面に接着した鋼板をA面およびB面と表示した。これより、鋼板応力度が同一の場合、鋼板のひずみ分布は鋼板幅や樹脂厚にかかわらず同様の傾向を示すことがわかる。特に樹脂厚については、今回の実験に用いた5mm~10mmの範囲では、鋼板のひずみ分布に影響を及ぼさないものと考えられる。

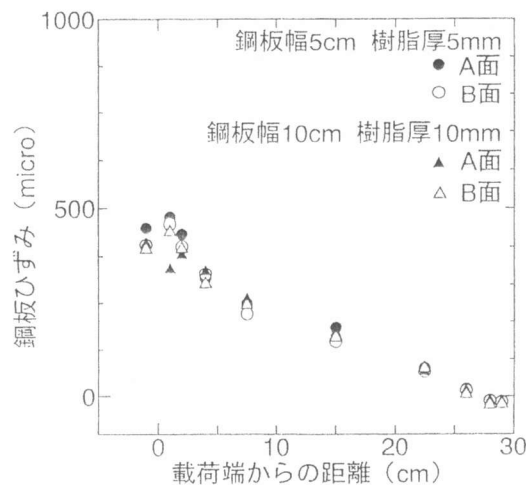


図-4 鋼板のひずみ分布
(鋼板応力度800kgf/cm²)

接着応力度の分布の例を図-5および図-6に示す。鋼板の接着形状および樹脂厚は前述のとおりである。接着応力度は鋼板ひずみの実測値を用いて次式より求めた。

$$\tau_i = (\Delta \epsilon_p \times E_p \times A_p) / (b \times l_i) \quad (1)$$

ここに、 τ_i : ひずみゲージ間の平均接着応力度(kgf/cm²)、 $\Delta \epsilon_p$: ひずみゲージ間の鋼板のひずみ差、 E_p : 鋼板の弾性係数(kgf/cm²)、 A_p : 鋼板の断面積(cm²)、 b : 鋼板の幅(cm)、 l_i : ひずみゲージ間の距離(cm)

図より、鋼板幅や樹脂厚にかかわらず接着応力度はほぼ同様の分布傾向を示し、荷端および先端付近に接着応力度の集中が認められ、それ以外ではほぼ一様となっている。しかし、図-7に示すように高い鋼板応力度(例えば、はく離直前時)となると接着応力度の分布に乱れが生じ、特に荷端付近では非常に大きな接着応力度が発生している。このように、はく離直前には鋼板の端部付近に大きな接着応力度が発生することから、これが鋼板のはく離を生じる原因になっているものと考えられる。

4. 鋼板ひずみおよび接着応力度の推定

ここでは、樹脂層のせん断変形を考慮して接着部の応力解析を行い、実測値と比較する。

4.1 推定式の導出

図-8のような両引き供試体の上部1/2断面について、変形と力のつり合いを考える。

荷端より x の位置における鋼板とコンクリートとの相対変位を u_x とすると、 x での接着応力度 τ_x と樹脂厚 t_a 、樹脂のせん断弾性係数 G_a との間には次式の関係が成り立つ。

$$\tau_x / G_a = u_x / t_a \quad (2)$$

x での鋼板の負担力を T_{px} 、コンクリートと鉄筋とが一体となって負担する力を T_{cx} とすると、力のつり合いより、

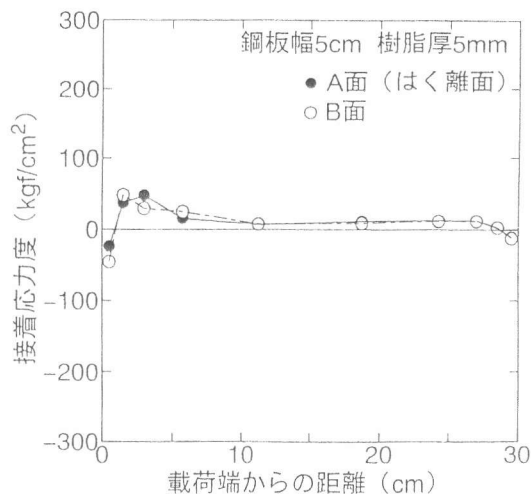


図-5 接着応力度分布
(鋼板応力度800kgf/cm²)

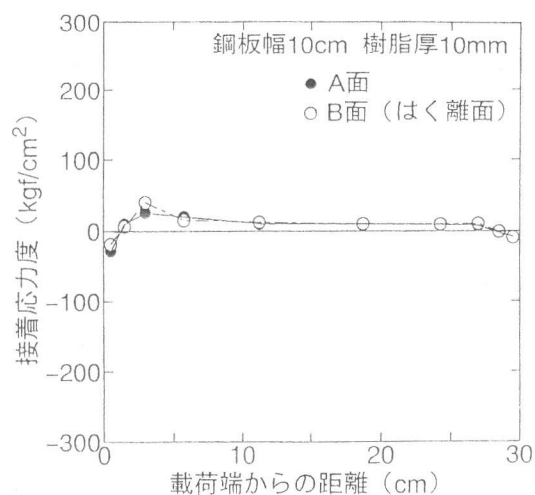


図-6 接着応力度分布
(鋼板応力度800kgf/cm²)

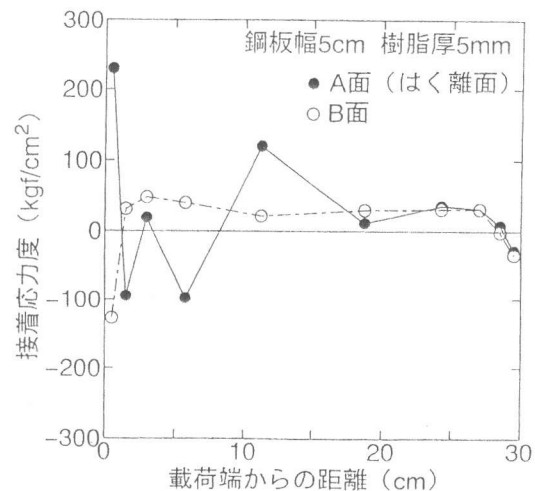


図-7 接着応力度分布
(鋼板応力度1730kgf/cm²)

$$P = T_{px} + T_{cx} \quad (3)$$

また、鋼板力の変化が接着応力度であることを考慮して、

$$\tau x = d T_{px} / dx \quad (4)$$

これらより、 $K_a = G_a / t_a$ 、 E_c をコンクリートの弾性係数として次式を得る。

$$\frac{d^2 T_{px}}{dx^2} - K_a \cdot \left(\frac{1}{E_p \cdot A_p} + \frac{1}{E_c \cdot A_i} \right) \cdot T_{px} = - \frac{K_a \cdot P}{E_c \cdot A_i} \quad (5)$$

ここに、 $A_i = (A_c + n_s \cdot A_s) / 2$ 、 A_c :コンクリートの断面積、 A_s :鉄筋の断面積、 n_s :鉄筋とコンクリートとの弾性係数比(E_s / E_c)

これを $x = 0$ で $T_{px} = P$ 、 $x = l$ で $T_{px} = 0$ の境界条件で解くことにより鋼板力分布の推定式が得られる。また、接着応力度はこの鋼板力を用いて式(4)より求まる。

4. 2 実測値と計算値との比較

ひずみ分布の実測値と計算値との比較を図-9および図-10に示す。接着長30cm、接着幅5cm、樹脂厚5mmの場合について例示している。図-9は鋼板応力度が800kgf/cm²、図-10ははく離直前に測定された鋼板応力度の最大値1730kgf/cm²の時点での結果である。これより、計算値は実測値の分布傾向を良く表している。ただし、鋼板端部付近には計算値との差を生じる範囲があり、差は鋼板応力度が高くなると著しくなっている。つぎに、鋼板応力度が800kgf/cm²および1730kgf/cm²における接着応力度の分布を図-11および図-12に示す。ひずみ分布の場合と同様、端部付近で大きな差を生じているのがわかる。

このような差を生じた原因として、今回の解析では、樹脂層およびRC部分とも断面内の応力分布は一樣と仮定しているが、端部付近ではこの仮定が成立していないものと思われ、この点については今後の検討を要するものと考えられる。

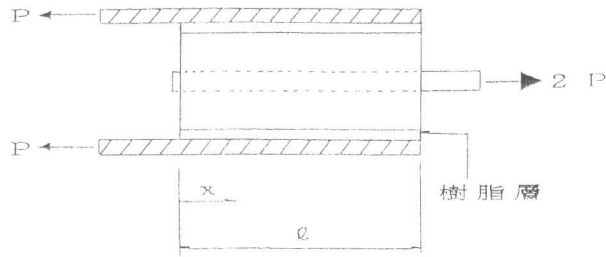


図-8 接着部に作用する外力

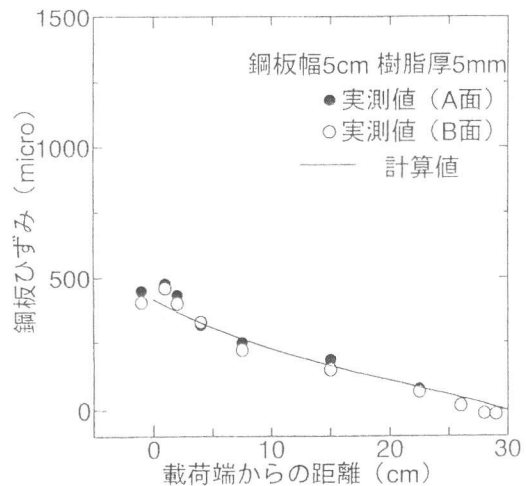


図-9 鋼板ひずみの比較
(鋼板応力度800kgf/cm²)

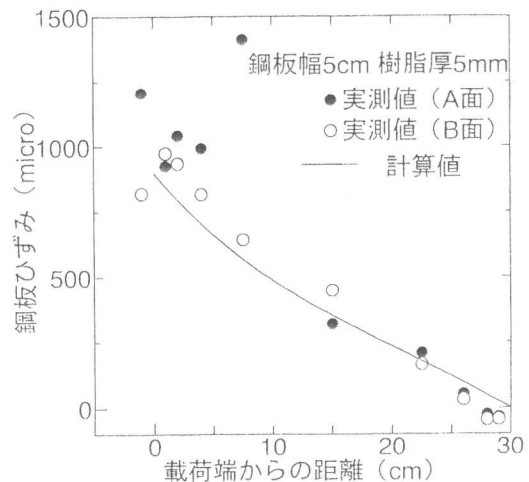


図-10 鋼板ひずみの比較
(鋼板応力度1730kgf/cm²)

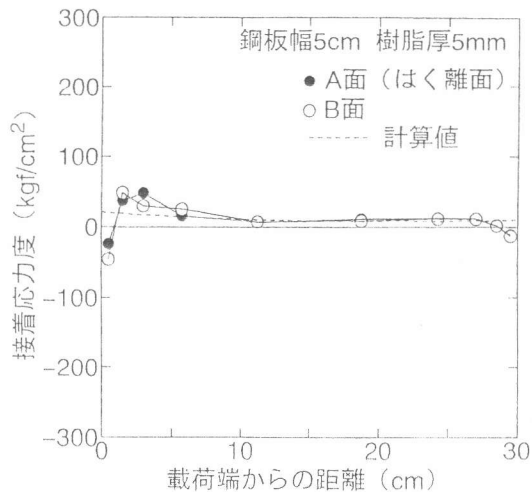


図-11 接着応力度の比較

(鋼板応力度800kgf/cm²)

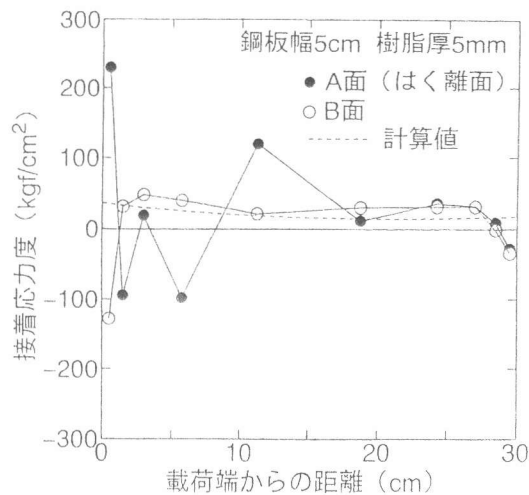


図-12 接着応力度の比較

(鋼板応力度1730kgf/cm²)

5. 結論

RC部材の引張部をモデル化したRC両引き供試体に長さおよび幅の異なる鋼板を接着し、鋼板のはく離現象について検討を行った結果、以下の結論が得られた。

(1) 鋼板のはく離形態には、樹脂とコンクリートとの界面でコンクリートがほぼ全面にわたって破壊する場合、部分的なコンクリートの破壊と鋼板と樹脂との界面はく離が混在する場合、接着面ほぼ全面にわたって鋼板と樹脂との界面はく離が生じる場合の3種類があった。

(2) せん断力を受ける場合、鋼板のはく離荷重には力の作用する方向が大きな影響を及ぼすと考えられる。結果のばらつきは実験中の引張力が作用する方向の誤差によって生じているものと思われ、この点に注意する必要がある。

(3) 鋼板の接着幅が一定のとき、はく離時平均接着応力度は接着長や樹脂厚にかかわらずほぼ一定であった。また、接着幅が5cmで一定の場合、はく離荷重は接着長に比例して増加した。これに対し、接着長が一定の場合、はく離荷重は接着幅に比例して増加せず、はく離時平均接着応力度は鋼板幅と被着体であるコンクリートの幅が等しくなると低下した。これより、接着幅が広いときには、安全のために鋼板幅とコンクリート幅とが等しい場合の結果を用いるのが良いと思われる。

(4) 鋼板のひずみ分布および接着応力度の分布傾向は、鋼板応力度が同一の場合、鋼板幅や樹脂厚が変化しても同様の傾向を示した。特に、樹脂厚については、今回の実験に用いた5mm~10mmの範囲では、鋼板のひずみ分布や接着応力度の分布には影響を及ぼさないものと考えられる。

(5) 樹脂層のせん断変形を考慮した応力解析により、鋼板のひずみ分布や接着応力度の分布傾向を推定できた。しかし、鋼板端部付近には実測値と大きな差を生じる範囲があり、これがはく離の原因になっているものと考えられ、今後の検討を要する。

参考文献

- 1) 佐野 正・三浦 尚・小俣富士夫：鋼板接着により補強された鉄筋コンクリート梁の曲げ性状、構造工学論文集、Vol.39A、pp.1361-1370、1993.3