

論文

[2194] 鋼製エレメントとコンクリートとの付着性能に関する研究

緒方紀夫*1・村山陽*2・沖本真之*3・今西直人*4

1. 概要

建設工事において熟練工・労働力不足などの問題が懸念されているが、橋脚工事においても同様であり、施工の省力化・工期の短縮が大きな課題となっている。このような問題を解決するために鉄筋の代替材料として鋼製エレメントを用いた合成構造について検討している。

鋼製エレメントは、図-1に示すように直線鋼矢板と型鋼などを組合せたものであり、さまざまな形式のものが考えられる。鋼製エレメントどうしは直線鋼矢板部の嵌合継ぎ手を用いて連結され、図-2に示すような断面を構成する。

鋼製エレメントには、被り部分へコンクリートを打設するため開口を設けている。この開口は、コンクリート中においてせん断キーとして機能することが期待できる。そこで、開口を有する鋼材とコンクリートの付着破壊状況を把握するとともに開口形状、板厚及びコンクリート圧縮強度が付着強度に及ぼす影響を把握するために、付着試験を実施した。付着試験は、鋼製エレメントをコンクリート中に埋込み、単純に引抜く引抜き型試験と、鋼製エレメントと周囲のコンクリートの状態が実構造物同様引張り状態になるような梁型試験の2種類の試験を行った。なお、使用したコンクリートの仕様は、設計基準強度240kgf/cm²、スランプ8cm、粗骨材最大寸法10mmである。

2. 引抜型付着試験

2.1 試験概要

試験方法は、鉄筋の引抜試験法を模した手法であり、図-3に示すようにコンクリート中に配置した開口を有する鋼板を引抜き、その時の引抜荷重及び自由端での抜け出し量の計測を行った。

付着試験では試験体形状寸法等の影響が大きいことを考慮して、埋込型及び挟込型の2種類の試験体形状を設定した。また、荷重端近傍では支点による集中荷重や両支点による反力の不均衡の影響を緩和するために縁切り部を設けたが、横補強筋は配置していない。試験体は表-1に示すように開口形状寸法及び板厚等を変数として16体の試験体を設定した。この内、挟込み型P-2ST試験体は、鋼板にテフロンを貼付けコンクリートとの付着を取り除いている。コンクリートは、試験体を鉛直にし、打設している。

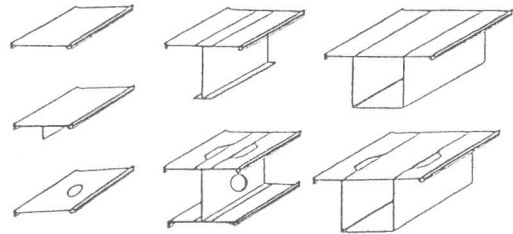
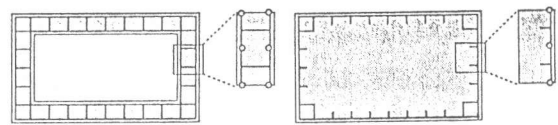


図-1 鋼製エレメントの種類



(a) 中空断面 (b) 充実断面

図-2 合成橋脚の種類

*1日本道路公団 試験研究所 橋梁研究室長 (正会員)

*2日本道路公団 試験研究所 橋梁研究室

*3新日本製鐵(株) 鋼構造研究開発センター主幹研究員

*4新日本製鐵(株) 鋼構造研究開発センター主任研究員

2. 2 試験結果

(1) 破壊状況

図-4 に埋込型試験体の引抜荷重～自由端すべり量関係例を示す。載荷途中には自由端でほとんどすべりを生じなかったが、鋼材幅方向の被りコンクリートにひび割れが生じると同時に割裂破壊に至り急激に耐力を消失した。本試験の試験体は、埋込型の被りコンクリート部分に鉄筋補強を施しておらず、また挟込型では開口部のみでコンクリートが連続しているために、コンクリートの引張抵抗の消失とともに急激な破壊に至ったと考えら

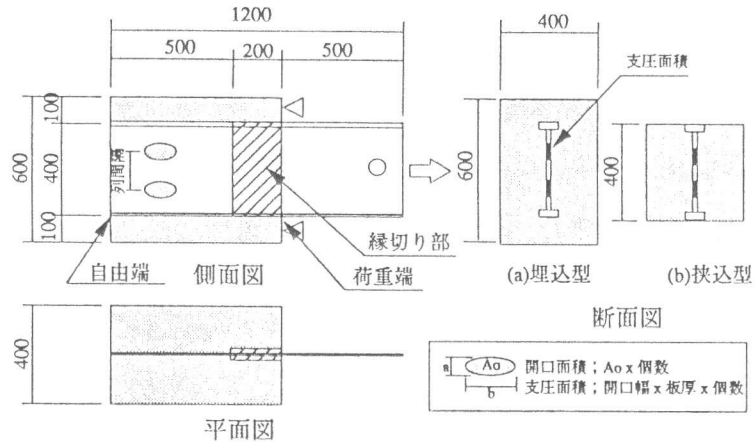


図-3 引抜型付着試験体

表-1 引抜型付着試験体形状

形状	試験体名	開口			板厚 (mm)	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	かぶりコンクリート厚さ (mm)	
		形状 a×b(mm)	個数	面積 (cm ²)				列間隔 (mm)
埋込型	P-1	40×80	2	57.1	200	6	309	100
	P-2	60×120	2	128.5	200	6	305	100
	P-3	80×160	2	228.5	200	6	310	100
	P-4	60×120	2	128.5	200	4	298	100
	P-5	60×120	2	128.5	200	8	298	100
	P-6	60×120	2	128.5	200	6	332	100
	P-7	60×120	1	64.3	—	6	299	100
	P-8	40×80	2	57.1	80	6	322	100
挟込型	P-1S	40×80	2	57.1	200	6	321	0
	P-2S	60×120	2	128.5	200	6	303	0
	P-3S	80×120	2	228.5	200	6	303	0
	P-2ST	40×80	2	128.5	200	6	321	0

P-1, 3は2体、P-2は3体、他は1体 P-2STは、鋼板にテフロンをつけている

れ、本試験により得られる付着強度には、試験体の形状（被りコンクリートの有無）が大きく影響していると考えられる。

(2) 付着強度

開口率と平均付着強度との関係を図-5 に示す。図-5 において、横軸は開口面積を開口を

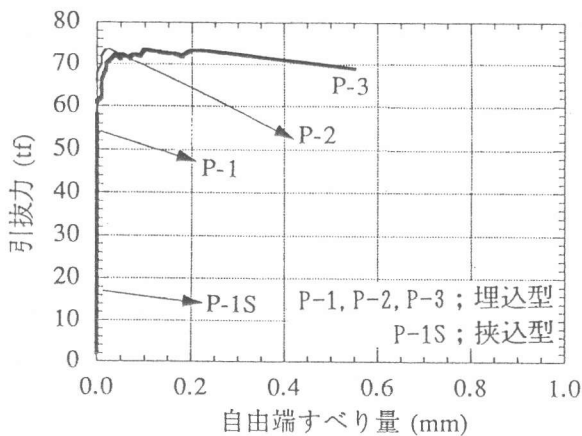


図-4 引抜力～自由端すべり量関係

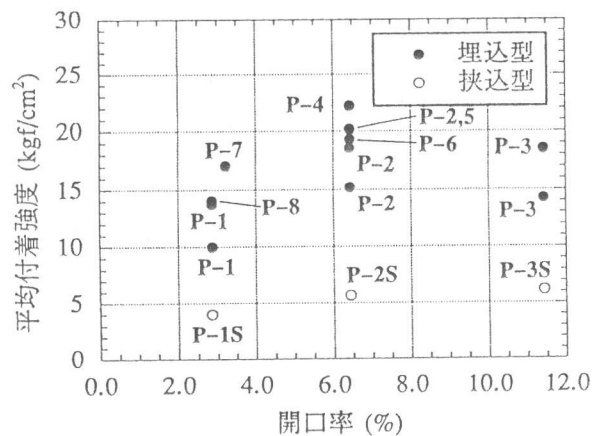


図-5 開口率～平均付着強度関係

む鋼材片側面積 A_s で除し、縦軸は、最大引抜き力を $2 \cdot A_s$ で除し、コンクリート実強度が 240 kgf/cm^2 を大きく上回ったので、コンクリート強度が 300 kgf/cm^2 相当になるように補正したものである。

平均付着強度は、埋込型では $10 \sim 22 \text{ kgf/cm}^2$ であるのに対し、挟込型では $4 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$ と試験体形状による影響が大きいことが判る。埋込型では開口率による明確な差異が認められず、試験体のばらつきの方が大きかった。一方挟込型試験体では、データが少ないものの開口面積と付着強度関係はほぼ線形関係にある。また、板厚及び開口列間隔等の影響はほとんど認められなかった。

3. 梁型付着試験

3.1 試験概要

実構造物中において鋼製エレメント周囲のコンクリートは引張応力状態にある。付着強度は、周囲のコンクリート応力状態に依存することが指摘されている。そこで、引張側に鋼製エレメントを配置した梁型試験を実施した。

試験は、図-6に示す試験方法

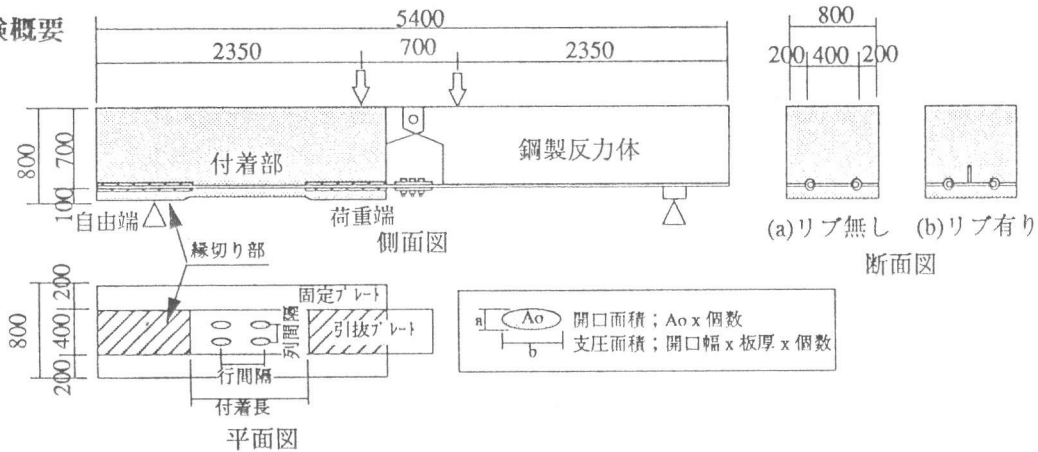


図-6 梁型付着試験体

表-2 梁型付着試験体形状

試験体	開口形状	開口個数	開口面積	付着長	間隔列	間隔行	コンクリート強度	リブ形状	かぶりコンクリート厚さ
	a×b(mm)	(行、列)							
B-1	60×120	(1, 2)	128.5	1000	120	-	314	-	50
B-2	60×120	(2, 2)	257.1	1000	120	240	309	-	50
B-3	60×120	(3, 2)	385.5	1000	120	240	324	-	50
B-4	60×120	(2, 2)	257.1	1000	120	360	325	-	50
B-5	60×120	(2, 2)	257.1	600	200	240	306	-	50
B-6	80×160	(1, 2)	228.5	1000	200	-	327	-	50
B-7	80×160	(2, 2)	457.0	1000	120	320	335	-	50
B-1R	60×120	(2, 2)	257.1	600	120	240	321	I型	50
B-2R	80×160	(2, 2)	457.1	600	160	260	328	I型	50
B-3R	100×200	(2, 2)	714.2	600	160	260	254	I型	50
B-4R	100×200	(2, 2)	714.2	600	200	300	209	T型	50
B-0	無し	-	0.0	600	-	-	278	-	50
B-0R	無し	-	0.0	600	-	-	309	I型	50

B-2は、2体

を採用した。この図-6に示すように、開口を有する鋼板(引抜プレート)は、側面で継手を介して固定プレートと嵌合させた構造とした。引抜プレートには支点部の支圧力及び連結部の引抜き力を緩和するためにコンクリートとの縁切り部を設けた。そして、試験体と鋼製反力体を中央部で接合して曲げ試験を実施し、荷重端及び自由端で引抜プレートの抜け出し量の計測を行った。試験体種類は表-2に示すように、鋼板のリブの有無、開口数及び開口仕様の異なる14体により行った。なお、使用したコンクリートの仕様は、設計基準強度 240 kgf/cm^2 、スランプ8cm、粗骨材最大寸法10mmである。

3. 2 試験結果

(1) 試験状況

図-7に引抜荷重～自由端すべり量関係例を示す。自由端すべり量は、引抜試験の場合と同様に最大荷重に到達と同時に急激に発生するが、残留強度を保持している。また鋼板にリブを設けることにより最大耐力に至るまでの変形が緩やかとなる。

(2) 付着強度

図-8に開口率～平均付着強度の関係を示す。梁型試験の平均付着強度は引拔型付着試験の挟込型試験体の付着強度と同様4～6kgf/cm²であった。これは、梁型付着試験でも表裏のコンクリートは開口部でのみ連結されているためである。この値は、実構造物の被りコンクリートの付着強度に近い値を示していると考えられる。引拔型付着試験の挟込型と同様に平均付着強度は開口率とほぼ線形関係にあり、開口率により平均付着強度を算定できると考えられる。しかし、板厚、開口間隔による付着強度に対する影響は殆ど認められない。また、リブについては、開口が設けられていないため、平均付着強度の増加に対する影響は小さい。

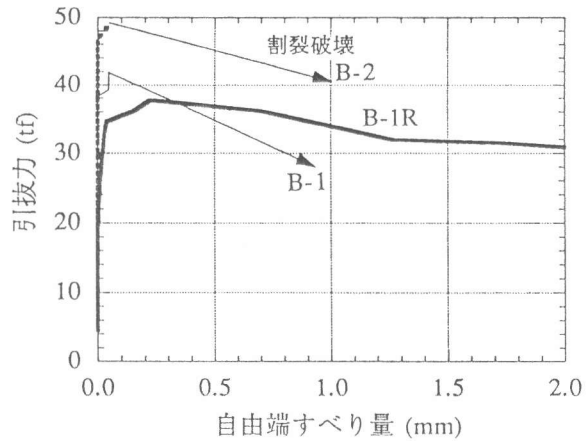


図-7 引抜力～自由端すべり量関係

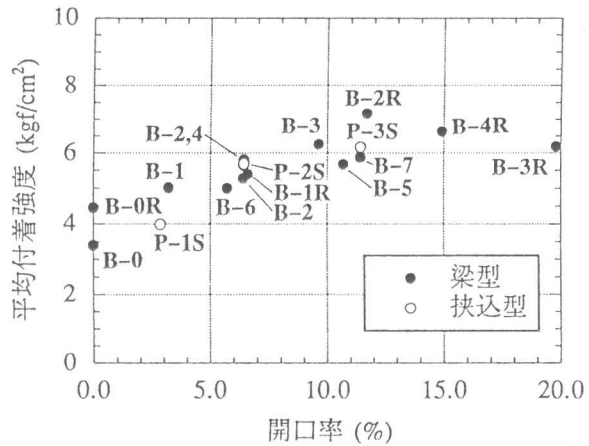


図-8 開口率～平均付着強度関係

4. 付着力算定法の検討

4. 1 鋼材の付着強度

開口を有する鋼製エレメントの付着試験結果には、鋼材の表面付着強度と開口による付着強度が混在している。

表-3 鋼材表面付着強度

試験体	開口面積 (cm ²)	鋼板面積 (cm ²)	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	引抜荷重 (tf)	付着強度 (kgf/cm ²)	付着強度 / コンクリート強度
B-0	0	4800.0	278	15.10	15.10/4800 = 3.15	0.011
B-0R	0	7800.0	309	32.95	32.95/7800 = 4.22	0.014
B-2	257.1	7485.8	300	41.35	$\frac{41.35 - 27.7}{7485.8 - 4285.8} = 4.2$	0.014
B-5	257.1	4285.8		27.70		
P-2S	128.5	3743.0	310	22.96	$\frac{22.96 - 6.53}{3743} = 4.39$	0.014
P-2ST	128.5	0.0		6.53		

表-3において、B-2とB-5試験体から得られた付着強度は鋼材表面のみによる付着強度である。P-2S試験体は、鋼材表面と開口による付着強度が混在している状態であり、P-2S

T試験体は、開口のみの付着強度を有している。表-3において、P-2SとP-2ST試験体から得られた付着強度は、B-0、B-0R試験体及びB-2とB-5試験体の関係から得られた付着強度とほぼ等しいので、鋼材表面のみの付着強度と推定される。即ち、鋼材の全付着強度は、鋼材表面と開口による付着強度の和で表されることがわかる。

4.2 鋼材表面による付着力

表-3において、付着力がコンクリート強度に比例するとした時、安全側の値として、次式が得られる。

$$P_s = 0.01 F_c \cdot A_s$$

ここで、 F_c ; コンクリート実強度
 A_s ; 鋼材面積

式-1

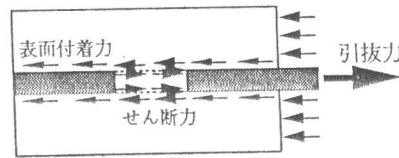


図-9 せん断破壊モデル

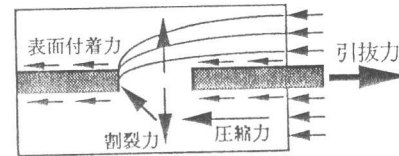


図-10 支圧割裂破壊モデル

4.3 開口による付着力

コンクリート内の有孔鋼板に引抜力を作用させた時の破壊形態は、①開口部でのせん断破壊(図-9)、②開口部での支圧割裂破壊(図-10)、③開口内部コンクリートの圧壊、④鋼板の降伏・破断に分類でき、被りコンクリートの厚さ、開口による鋼材両側のコンクリートの連続などによって、鋼材が拘束され、破壊形態が決定される。しかし、鋼製エレメントを実構造物に適用する場合、板厚とコンクリートの粗骨材寸法がともに10-20mm程度であることから、純粋なコンクリートの圧壊が生ずるとは考えられない。

そこで、付着試験結果を拘束状態に応じて①、②の2種類の破壊形態に分類する。図-11は開口面積と開口による付着力の関係を示す。ここで、開口による付着力とは試験により得られた最大耐力から表面付着力を差引いた値である。この図から周囲のコンクリートの拘束状態に応じて2つの領域に分けられことがわかる。図-12のように整理し直すと、

被り面積/開口面積 (A_c/A_o) = 5 が、図-11に示す2つの領域のほぼ境界に当たることがわかった。そこで、この指標をもとにせん断破壊と支圧破壊に分類できると考えられる。尚、被り面積とは、破壊時に抵抗する被りコンクリートの面積として図-13のように定義した。

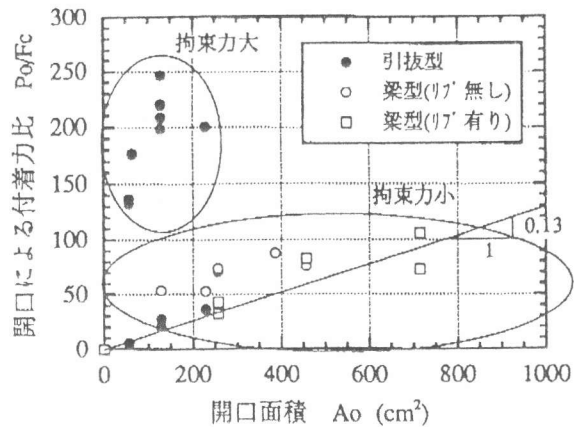


図-11 開口面積～開口による付着応力関係

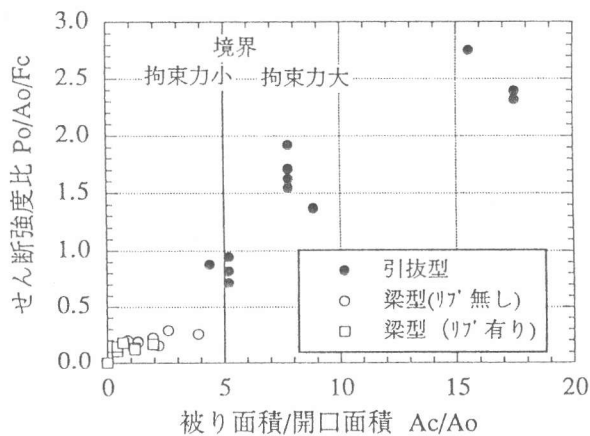


図-12 せん断強度比

(1) 支圧割裂破壊 ($A_c/A_o < 5$ の時)

拘束度が小さい場合、図-10に示すように開口部に支圧力が作用し、開口内部コンクリートを割裂く方向に割裂力が発生することにより支圧割裂破壊に至る。挟込型の付着試験及び梁型付着試験が支圧割裂破壊であった。また、図-11より開口による付着力は開口面積にほぼ比例するので、コンクリート強度を考慮して式-2に示すように設定した。

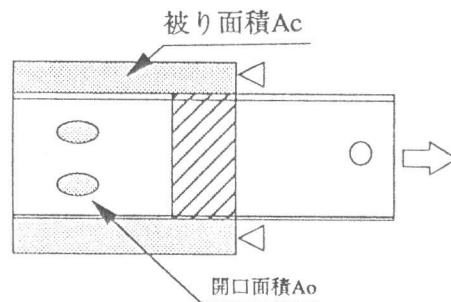


図-13 被り・開口面積の定義

$$P_{ob} = 0.13 F_c \cdot A_o \quad \text{式-2}$$

(2) せん断破壊 ($A_c/A_o \geq 5$ の時)

被りコンクリートが大きい場合には開口部での支圧破壊力に対して拘束力が作用し、せん断破壊にいたる。この拘束力は被りコンクリート面積にコンクリート引張強度を掛けた値と考えられる。図-14は被りコンクリート面積/開口面積とせん断強度比の関係を示しており、図中の実線でほぼ安全側に評価できることより、式-3~5を設定した。横軸は、開口面積あたりに作用する拘束応力の指標であり、被り厚に応じてコンクリートのせん断強度が大きくなる現象を表している。

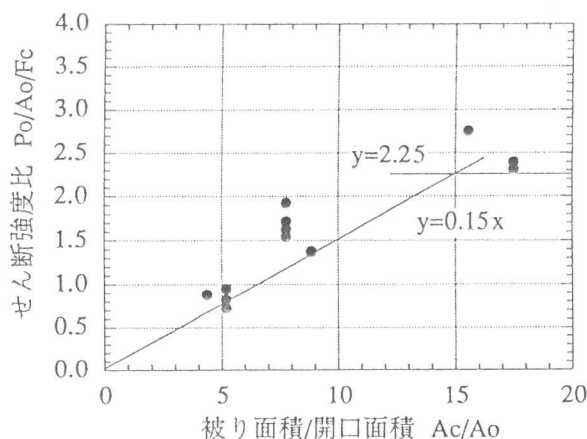


図-14 せん断破壊強度

また、図-14では A_c/A_o が1.5程度で上限値を与えているのは、設計上の安全性の考慮と被りコンクリートの影響範囲に限界があると考えたからである。

$$P_{os} = \text{Min} (P_{os1}, P_{os2}) \quad \text{式-3}$$

$$P_{os1} = 0.15 F_c \cdot A_c \quad \text{式-4}$$

$$P_{os2} = 2.25 F_c \cdot A_o \quad \text{式-5}$$

5. まとめ

コンクリート中に埋込まれる鋼製エレメントは、その位置即ち被りコンクリートの厚さによって、付着破壊状態が異なり、付着力の算出方法を区別する必要がある、その算出方法について提案することができた。

また、鋼製エレメントの全付着力は、鋼材表面による付着力と開口による付着力の和で表しても問題のないことがわかった。

参考文献

1) 日本建築学会. 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(1987.6)