

# ポリマーセメントモルタル増厚補強部材の付着界面 せん断剥離性状に関する研究

佐藤貢一<sup>1</sup>・小玉克己<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 奈良建設株式会社 技術研究所 (〒222-0033 横浜市港北区新横浜 1-13-3)

E-mail: k. satoh@nara-const. co. jp

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

ポリマーセメントモルタル増厚工法により補強された部材は、補強構造と荷重の荷重状況により、最終的に剥離を伴う破壊性状を示す。本研究ではコンクリート試験体に補強筋とポリマーセメントモルタルを用いて増厚を行い、接着界面の面内にせん断力を作用させ、この条件で生じる付着性状を実験的に解明し把握したものである。すなわち本工法の応力伝達機構を補強筋と増厚材のひずみ分布から把握し、付着強度算定式の同定を行った。また、ポリマーセメントモルタル増厚工法に関しても付着界面のずれ量と付着応力度から同定した剥離破壊エネルギー算定式により、剥離破壊エネルギーの算定が可能であることを示した。

**Key Words:** stress transfer mechanism, bonding strength, bonding mechanism, polymer cement mortar, peeling

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下RCと記す)構造物の機能性向上・老朽化対策・変状対策を目的に補修・補強が行われている。特に道路橋のRC構造物は通行車両の大型化や輪荷重の繰返し作用により疲労劣化した事例や、通行車両規制の緩和による設計荷重の増加事例に対する補強が行われている。これらの補強対策として使用されている主な工法は、連続繊維シート接着工法、鋼板接着工法、増厚工法である。本研究では、上記増厚工法のうちポリマーセメントモルタル(以下PCMと記す)を用いた下面増厚工法に関し検討を行ったものである。

補強設計においては補強した構造物の性能を照査する必要がある。下面増厚工法は、これまでの実験研究や実橋梁の荷重試験により<sup>1), 2), 3)</sup>、耐荷力・変形性能・既設構造物の応力度緩和機能・疲労耐久性の向上が確認され、補強後の安全性・使用性に関する検討が行われてきている。増厚工法は接着工法と同様、既設RC構造物と一体化し合成機能を発揮することにより、補強効果が得られる。増厚工法は最終的な破壊形態が剥離を伴う場合があり、剥離挙動の把握が課題となっている。

PCMを用いた増厚工法の剥離性状は以下の2モードに大別できる。

- ①既設コンクリート面とPCM増厚部接着界面の面内に作用するせん断力による剥離。
- ②既設コンクリート面とPCM増厚部接着界面の面内に作用するせん断力と面外方向に作用する引張力の2方向の

力による剥離。

剥離モード①は、はり中央部の曲げひび割れ近傍に生じる面内剥離や、せん断耐力向上を目的にRC桁側面増厚をしたはりの斜めせん断ひび割れ近傍に生じるRC桁側面の剥離現象などである<sup>4)</sup>。また、剥離モード②は耐荷力や疲労耐久性向上を目的にRC桁やRC床版の下面に増厚した場合の最終的に生じる端部剥離である<sup>1), 5)</sup>。これらの剥離性状のうち剥離モード①は連続繊維シート接着工法や鋼板接着工法では多くの研究がなされている。佐藤ら<sup>6)</sup>は、コンクリート供試体に連続繊維シートを接着し接着面内のせん断付着試験を行い、連続繊維シートのひずみ分布とずれ量から付着強度算定式を提案している。また、上原ら<sup>7)</sup>は、連続繊維シートのずれ量から接着界面に作用する付着応力度を算定する式を同定している。吉沢ら<sup>8)</sup>は、同様な実験から剥離破壊エネルギーを算定し、この剥離破壊エネルギーを用いて剥離性状を検討した。また、佐野・三浦<sup>9)</sup>はコンクリート供試体に鋼板を接着し接着面内のせん断付着試験を行い、有効定着長の検討を行っている。

本研究では、既設コンクリート試験体に補強筋とPCMを用いて増厚を行い、接着界面の面内にせん断力を作用させ、剥離モード①に関し実験検討を行った。検討はPCMで増厚した場合の応力伝達メカニズムを実験結果より把握し、この応力伝達メカニズムより付着強度算定式の同定をおこなった。さらに、剥離破壊エネルギーの算定に関する検討を行った。

## 2. 実験概要

### (1) 使用材料

本実験に使用したコンクリートと増厚材量に使用したPCMの物理的性状を表-1に示し、各種PCMの配合を表-2に示す。PCMは下面増厚工法として実績のある材料A:粉体アクリル(acryl powder)、材料B:SBR(styrene-butadiene rubber)、材料C:PAE(poly-acryl acid ester)の3種類を使用した。表中における接着強度は、建研式試験機を用い、接着面に対し垂直方向に引張力を作用させた場合の値である。静弾性係数は各材料ともに8.9~14.4kN/mm<sup>2</sup>の範囲でコンクリートより低い値の材料である。

表-1 コンクリートおよびPCM性状

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	31.1	5.4	-	23.0
A(粉体アクリル)	20.6	6.2	2.9	11.0
B(SBR系エマルジョン)	25.7	6.3	1.9	14.4
C(PAE系エマルジョン)	9.9	5.1	1.9	8.9

接着強度は建研式

表-2 PCM 配合

材料	エマルジョン種類	セメント C(kg)	エマルジョン P(kg)	細骨材、 混和材 (kg)	水 W(kg)	W/C (%)	P/C (%)
材料A	粉体アクリル	7.6	1.0	11.4	3.2	42.1	13.3
材料B	SBR	7.2	0.8	12.8	2.6	36.7	11.1
材料C	PAE	6.0	0.8	14.0	2.2	37.4	13.8

表-3 実験供試体組み合わせ

モルタル種類	付着幅 b (mm)	付着長さ L (mm)	備考
材料A 材料B 材料C	75	75	供試体番号 材料-b-アンカー有無-L アンカー有り: a アンカー無し: f
		100	
		150	
	100	75	
		100	
		150	
		200	

### (2) 実験供試体作成方法

一面せん断付着試験の概要を図-1a), b) に示す。実験供試体は直方体コンクリートの1側面(コンクリート打設面を除く)をケレンし、補強筋(SD 295A D6 50×50mm)を設置し、PCMを厚さt=22mmで増厚一体化した。ケレン方法は実施工で使用されている最も簡易な施工方法であり、表面粗度が最も緩く付着に対してはウォータージェット工法等他の施工方法と比較し強度が低くなるディスクサンダーを使用した。補強筋はコンクリートアンカー(M8-1本)で固定しPCMで増厚一体化した供試体と、コンクリートアンカーを用いずにPCMで増厚一体化した供試体の2種行っている。PCMで増厚する際、実施工と同様に材料Aは散水、材料Bはアクリル材、材料CはPAE材のプライマーを塗布した。PCMの打設は上面方向よりコテ塗りにより行い、室内湿布7日間養生後、実験を行った。実験は1水準1供試体で行い、実験パラメーターは、付着幅b=75mm, 100mm, 付着長さL=75, 100, 150, 200mm, 増厚材料、アンカーの有無とした(表-3)。

### (3) 試験方法

実験供試体は図-1a)に示すように鋼製枠内に設置し、補強筋端は鋼製枠にアンカーを用いて堅固に固定した。供試体中央にあらかじめ設けておいたφ22mmの孔にPC

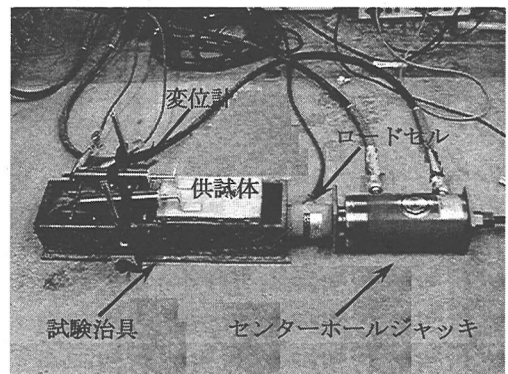


写真-1 一面せん断付着試験概要

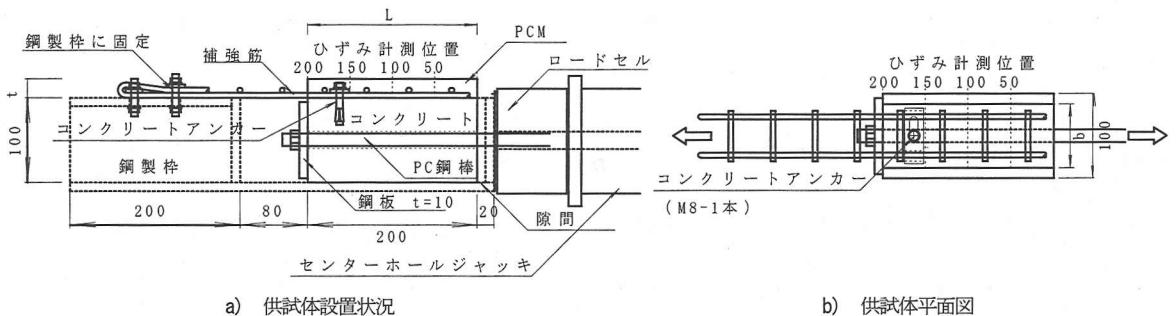


図-1 一面せん断付着試験概要(アンカー有り)

鋼棒(φ19mm)を挿入し、鋼製枠中央側は10mm鋼板をナット止めし、鋼製枠外側に設置したセンターホールジャッキでPC鋼棒に引張力を作用させた(写真-1)。この荷重載荷方法により図-1b)に示すように、コンクリートとPCM増厚部界面に面内せん断力を作用させた。

本実験により測定した項目は補強筋およびPCMのひずみ量、PCMの変位量とした。補強筋およびPCMのひずみ量は供試体端部より5cm間隔で計測し、PCM変位はコンクリートとPCMの相対変位を供試体端部で変位計を用いて計測した。

### 3. 実験結果及び考察

#### (1) 破壊形態

一面せん断実験の破壊形態は全ての供試体でPCM増厚部とコンクリート界面で剥離する破壊形態であった。剥離面はPCM側に若干のコンクリートが付着している程度でコンクリートを伴う破壊形態ではなかった。

#### (2) 付着長の影響

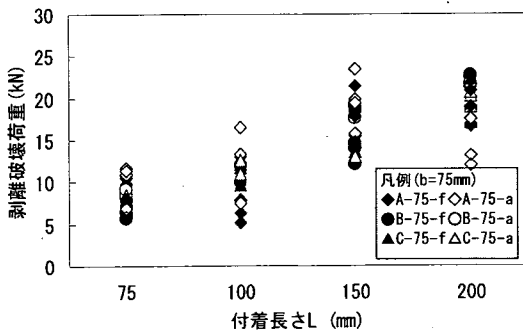
一面せん断実験の結果を表-4、図-2, 3に示す。表中には剥離破壊荷重を付着幅 $b$ で除した値と剥離破壊荷重を付着面積( $b \cdot L$ )で除した値を付記した。表-4と図-2の剥離破壊荷重と付着長さの関係( $b=75, 100\text{mm}$ )に見られるように、各材料の実験結果に若干のばらつきは見られるが、図-2に示されるように各種供試体は増厚材や付着長さの変化に対し一定の相関関係を示している。このことから、本実験の結果はPCM増厚工法の付着性状を再現できているものと考えられる。

付着長さが75mm~150mmの範囲では付着長さの増加と共に剥離破壊荷重は増加する。一方、付着長さが200mmの場合剥離破壊荷重の増加は見られない。この傾向は図-2a)b)の付着幅 $b=75, 100\text{mm}$ で見ることができる。このことは図-3b)で付着長さが75mm~100mmの範囲で各材

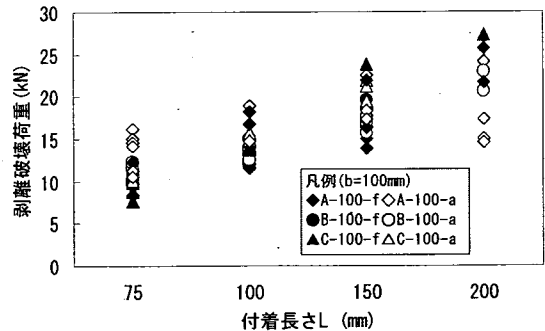
料の剥離破壊荷重を付着面積で除した $P_u/(b \cdot L)$ がほぼ同程度であり、付着長さが200mmの場合 $P_u/(b \cdot L)$ が小さくなっていることから分かる。付着幅 $b$ が75mmから100mmの範囲では、付着幅 $b$ が増加することにより剥離破壊荷重も増加している。図-3a)の剥離破壊荷重を付着幅 $b$ で除した $P_u/b$ と付着長さの関係では $P_u/b$ の75mmと

表-4 実験結果一覧表

モルタル種類	付着幅 $b$ (mm)	付着長さ $L$ (mm)	剥離破壊荷重 $P_u$ (kN)	$P_u/b$ (kN/mm)	$P_u/(b \cdot L)$ (N/mm <sup>2</sup> )	供試体NO.
材料A アンカー 無し	75	75	10.35	0.138	1.84	A-75-f-75
		100	12.40	0.165	1.65	A-75-f-100
		150	18.59	0.248	1.65	A-75-f-150
	100	200	16.67	0.222	1.11	A-75-f-200
		75	12.23	0.122	1.63	A-100-f-75
		100	12.39	0.124	1.24	A-100-f-100
材料A アンカー 有り	75	150	16.37	0.164	1.09	A-100-f-150
		200	25.63	0.256	1.28	A-100-f-200
		75	11.16	0.149	1.98	A-75-a-75
	100	100	14.84	0.198	1.98	A-75-a-100
		150	18.31	0.244	1.63	A-75-a-150
		200	18.73	0.250	1.25	A-75-a-200
材料B アンカー 無し	75	75	15.21	0.152	2.03	A-100-a-75
		100	17.09	0.171	1.71	A-100-a-100
		150	19.87	0.199	1.32	A-100-a-150
	100	200	24.06	0.241	1.20	A-100-a-200
		75	6.78	0.090	1.21	B-75-f-75
		100	9.94	0.133	1.33	B-75-f-100
材料B アンカー 有り	75	150	13.51	0.180	1.20	B-75-f-150
		200	22.69	0.303	1.51	B-75-f-200
		75	10.07	0.101	1.34	B-100-f-75
	100	100	13.36	0.134	1.34	B-100-f-100
		150	18.02	0.180	1.20	B-100-f-150
		200	18.66	0.187	0.93	B-100-f-200
材料C アンカー 無し	75	75	8.71	0.116	1.55	B-75-a-75
		100	11.90	0.159	1.59	B-75-a-100
		150	18.37	0.245	1.63	B-75-a-150
	100	200	21.61	0.288	1.44	B-75-a-200
		75	11.90	0.119	1.59	B-100-a-75
		100	13.42	0.134	1.34	B-100-a-100
材料C アンカー 有り	75	150	16.74	0.167	1.12	B-100-a-150
		200	21.77	0.218	1.09	B-100-a-200
		75	7.63	0.102	1.36	C-75-f-75
	100	100	11.07	0.148	1.48	C-75-f-100
		150	14.12	0.188	1.26	C-75-f-150
		200	19.53	0.260	1.30	C-75-f-200
材料C アンカー 無し	75	75	8.74	0.087	1.17	C-100-f-75
		100	14.27	0.143	1.43	C-100-f-100
		150	22.05	0.221	1.47	C-100-f-150
	100	200	27.26	0.273	1.36	C-100-f-200
		75	7.52	0.100	1.34	C-75-a-75
		100	11.42	0.152	1.52	C-75-a-100
材料C アンカー 有り	75	150	15.64	0.209	1.39	C-75-a-150
		200	19.73	0.263	1.32	C-75-a-200
		75	9.71	0.097	1.29	C-100-a-75
	100	100	14.70	0.147	1.47	C-100-a-100
		150	21.47	0.215	1.43	C-100-a-150
		200	27.26	0.273	1.36	C-100-a-200

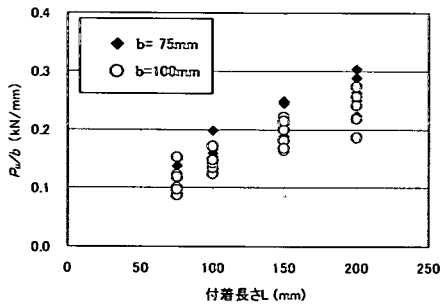


a) 剥離破壊荷重と付着長さの関係 ( $b=75\text{mm}$ )

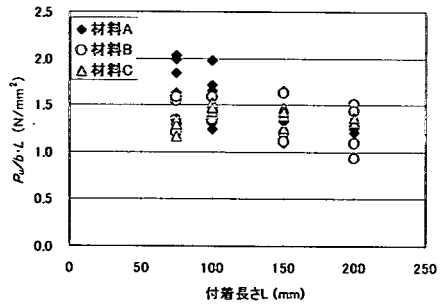


b) 剥離破壊荷重と付着長さの関係 ( $b=100\text{mm}$ )

図-2 剥離破壊荷重と付着長さの関係



a)  $P_u/b$  と付着長さの関係



b)  $P_u/b \cdot L$  と付着長さの関係

図-3 剥離荷重と付着長さの関係

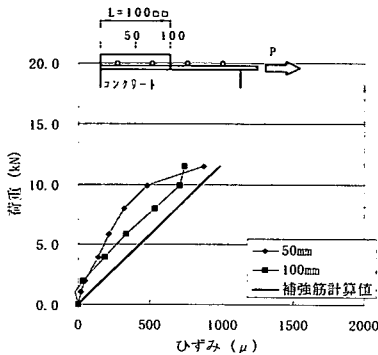


図-4 荷重と補強筋ひずみ量の関係  
(L=100mm)

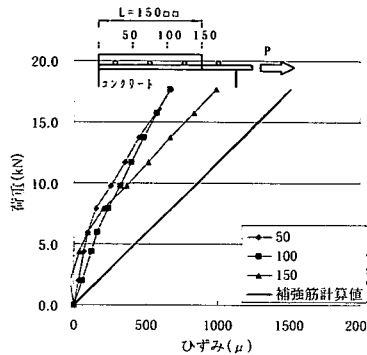


図-5 荷重と補強筋ひずみ量の関係  
(L=150mm)

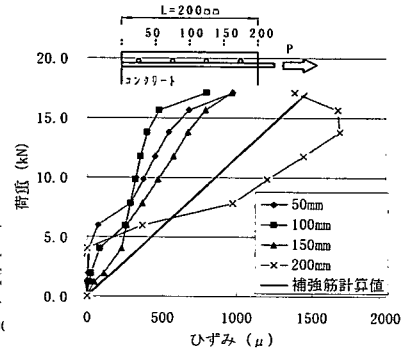


図-6 荷重と補強筋ひずみ量の関係  
(L=200mm)

100mm が同程度であることから把握できる。増厚部の補強筋をアンカーにより固定した場合の剥離破壊荷重の増加はやや見られるものの、アンカーの有無による剥離破壊荷重の変化は少ない。このことからアンカーの有無がせん断付着強度に及ぼす影響は少ないものと考えられる。付着長さ  $L=150\text{mm}$  以上で剥離破壊荷重の増加が見られないことから、連続繊維シートと同様に<sup>9)</sup>PCMを用いた増厚工法も有効付着長が存在するものと考えられる。付着長さ  $L=150\text{mm}$  以上の場合、式(1)のように引張強度を付着面積で除した値は、付着長さが有効付着長以上の場合、実際の付着強度より過大に評価することになるといえる。

$$\tau_{\max} = \frac{P}{b \cdot L} \quad (1)$$

$\tau_{\max}$  : 付着強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )       $P$  : 剥離破壊荷重 (kN)  
 $b$  : 付着幅 (mm)                       $L$  : 付着長さ (mm)

### (3) 補強筋ひずみ量

図-4, 5, 6 に載荷荷重と鉄筋ひずみ量の関係 ( $L=100, 150, 200\text{mm}$ , 材料A) を示す。補強筋のみで引張力を負担した場合の補強筋ひずみ量計算値を図中に付記する。補強筋ひずみ量は荷重の増加と共に増している。図-4 では

最も荷重点に近い計測位置の補強筋ひずみ量が補強筋のみで引張力を負担した場合の計測値に近い値と挙動を示している。図-6 の付着長さが  $200\text{mm}$  と長い場合には荷重初期では荷重載荷点に近い側ほど補強筋のひずみ量が高いが、高荷重においては  $50\text{mm}$  位置の内部鉄筋のひずみ量が高くなっている。

### (4) ひずみ分布

図-7, 8, 9 に載荷荷重と補強筋ひずみ分布の関係 ( $L=100, 150, 200\text{mm}$ , 材料A) を示す。各付着長さともに図中には荷重載荷点側から付着長さ全長にわたり様に低減するひずみ分布計算値 ( $10\text{kN}$ ) を示した。付着長さ  $L=100\text{mm}$  では計算値  $10\text{kN}$  と比較して実測値  $9.9\text{kN}$  がほぼ同様な挙動を示している。  $L=150\text{mm}$  以上の実測値  $9.8\text{kN}$  は計算値  $10\text{kN}$  より小さい値を示している。これは付着長さが長くなったため、付着長さより短い部分の増厚材が引張力を負担しているため、付着長さ全域に様に低減する直線分布より下側に分布しているものと考えられる。図-8 の荷重  $9.8\text{kN}$  の計測位置  $150\text{mm}$  → 荷重  $13.9\text{kN}$  の計測位置  $50\text{mm}$  や、図-9 の荷重  $5.9\text{kN}$  の計測位置  $200\text{mm}$  → 荷重  $13.8\text{kN}$  の計測位置  $50\text{mm}$  の様に  $L=150, 200\text{mm}$  の場合では荷重の増加に伴い、ピーク位置が補強筋の荷重作用位置である  $L=200\text{mm}$  点より計測位置  $0$  点方向に移動している。

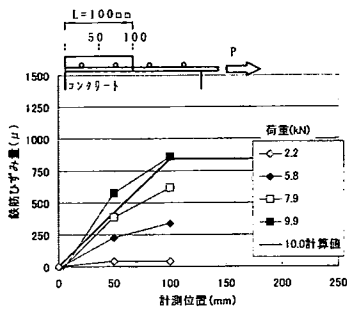


図-7 荷重と補強筋ひずみ分布の関係  
(L=100mm)

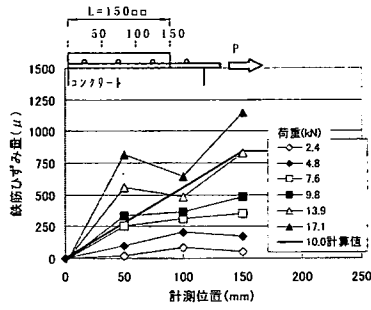


図-8 荷重と補強筋ひずみ分布の関係  
(L=150mm)

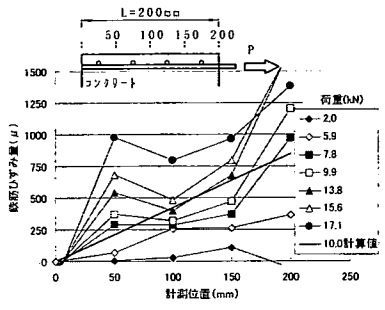


図-9 荷重と補強筋ひずみ分布の関係  
(L=200mm)

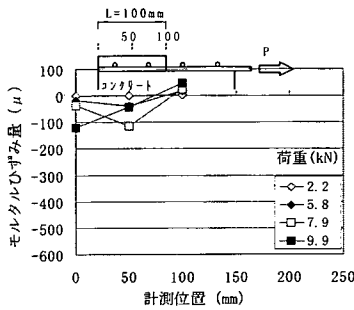


図-10 荷重と増厚材ひずみ分布の関係  
(L=100mm)

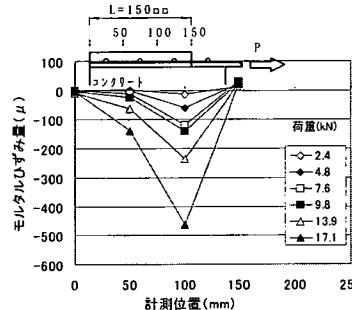


図-11 荷重と増厚材ひずみ分布の関係  
(L=150mm)

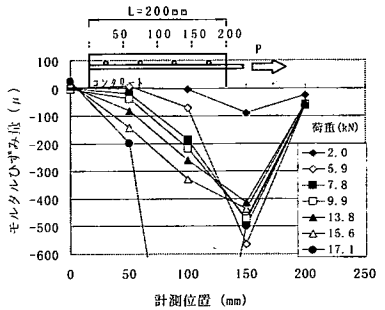


図-12 荷重と増厚材ひずみ分布の関係  
(L=200mm)

ピーク位置の移動は増厚材の付着力の負担位置が移動した事によるものと考えられる。

図-10, 11, 12 に載荷荷重と PCM 増厚材ひずみ分布の関係(L=100, 150, 200mm, 材料 A)を示す。増厚材料である PCM のひずみ分布は圧縮の値を示した。これは補強筋である鉄筋の引張力に対する抵抗反力が PCM に作用しているためである。また、図-12 の 5.9kN の様に PCM ひずみ分布は載荷荷重初期段階では荷重載荷点から付着長さ 150mm 以内にひずみ分布が集中し、その後荷重の増加とともにひずみ分布が計測位置 0 点方向に広がっている。図-9、図-12 より補強筋と PCM 増厚材のピーク位置にずれがあることが分かる。補強筋ひずみ分布のピーク位置は載荷荷重 5.9kN で 150mm 位置、9.9kN 以上で 50mm 位置に移動している。一方、PCM 増厚材は載荷荷重 15.6kN まで 150mm 位置にピークがあり、荷重の増加と共に 100mm, 50mm 位置の PCM 増厚材の応力度が増加している。これは荷重端に近い方の増厚材の負担量が多く、補強筋の応力度を低減しているためと考えられる。補強筋と増厚材のひずみ分布の移動挙動から、載荷初期には荷重載荷点に近い位置のひずみ量が高く、このひずみ負担領域は有限長の領域であり、また、このひずみ負担領域が荷重の増加とともに荷重載荷点と反対方向に移動することが分かった。以上より、増厚工法に関する有効付着長  $L_e$  が存在するものと考えられる。

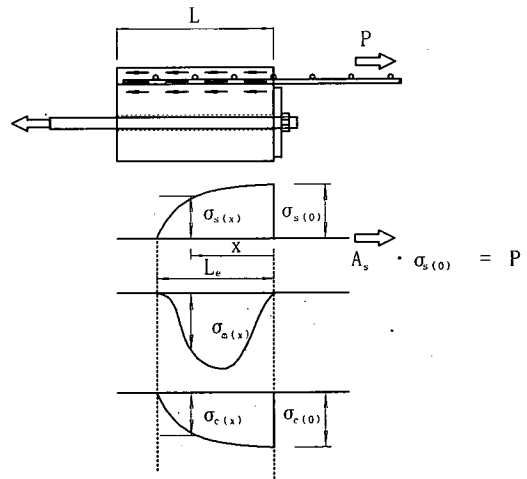


図-13 応力分布構概念図

#### 4. 付着応力ひずみ関係の考察

##### (1) 応力伝達機構

前項で検討した補強筋と増厚材のひずみ分布を基に PCM 増厚工法の応力分布概念図を示したものが図-13 である。図中に示されるように補強筋に作用した引張力は増厚材により応力負担され、有効付着長  $L_e$  内で伝達されていく。このため、前項で述べたように本実験の荷重載

荷環境では増厚材の応力度は圧縮領域となっている。増厚材に伝達された応力は増厚材であるPCMの付着力によりコンクリートに応力伝達される。

(2) 補強筋と増厚材の負担力

増厚工法の応力分布から応力伝達機構を検討する。増厚端部（位置  $x=0$ ）は鉄筋で引張力を負担している。

$$P = n \cdot A_s \cdot \sigma_s(0) \quad (2)$$

$P$  : 引張力  $n$  : 補強筋本数  $A_s$  : 補強筋断面積  
 $\sigma_s(0)$  :  $x = 0$  の補強筋応力度

補強筋応力度は、補強筋と増厚材の付着力によりPCM増厚材に伝達され、有効長の中で低下するものとする式(3)となる(図-14a)。

$$n \cdot A_s \cdot \sigma_s(x) = n \cdot A_s \cdot \sigma_s(0) - \int_0^x \mu \cdot \tau_s(x) dx \quad (3)$$

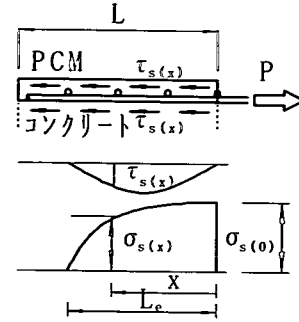
$\mu$  : 補強筋周長  $\mu = n \cdot \pi \cdot D$   $D$  : 補強筋直径  
 $\tau_s(x)$  : 補強筋と増厚材の付着応力度

増厚材の断面力は式(4)に示されるように補強筋とPCMの付着力により伝達された断面力から増厚材とコンクリートの付着によって伝達される断面力を引いた値となる(図-14b)。図-10~12に示されるように、増厚材のひずみ量は、補強材に生じている引張力に対する圧縮力が増厚表面においても計測されている。これは増厚量が22mmと薄いため増厚材断面の応力分布は一樣に近い状態であることによるものと考えられる。そのため式(4)では増厚材断面の応力分布は一樣と仮定した。増厚量が22mmより厚い場合は、増厚材表面のひずみ量は小さくなるものと考えられ、式(4)では増厚材とコンクリートの付着応力度  $\tau_{m(x)}$  が大きく作用している仮定となる。このため増厚材断面の応力  $\sigma_{m(x)}$  は断面分布の平均応力を用いると良いものと考えられるが、別途実験データの蓄積を行い検討する必要がある。

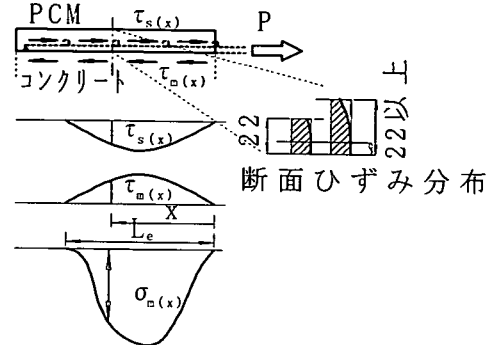
$$A_m \cdot \sigma_m(x) = \int_0^x \mu \cdot \tau_s(x) dx - \int_0^x b \cdot \tau_m(x) dx \quad (4)$$

$A_m$  : 増厚材断面積  $\sigma_m(x)$  : 増厚材応力度

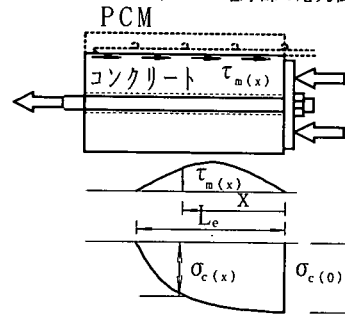
コンクリート断面力は増厚材とコンクリートの付着応力により応力伝達される(図-14c)、式(5)。



a) 補強筋からPCM増厚部の応力伝達機構



b) PCM増厚部の応力伝達機構



c) コンクリート部の応力伝達機構

図-14 増厚部からコンクリートの応力伝達機構

$$A_c \cdot \sigma_c(x) = \int_0^x b \cdot \tau_m(x) dx \quad (5)$$

$\tau_m(x)$  : 増厚材とコンクリートの付着応力度

(3) 付着強度の算定

補強筋から増厚材に作用した引張力が増厚材とコンクリートの付着力によりコンクリートに伝えられるものとする式(6)が成立する。

$$l_m \cdot \frac{d\sigma_m(x)}{dx} = \tau_m(x) \quad (6)$$

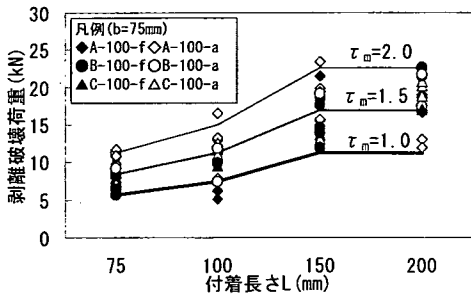


図-15 破壊荷重と付着長さの関係(有効付着長 150mm)

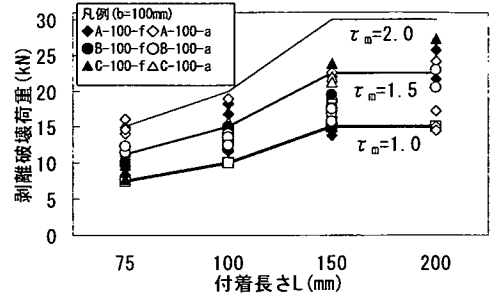


図-16 破壊荷重と付着長さの関係(有効付着長 150mm)

$t_m$  : 増厚部厚さ (mm)

位置  $x$  における付着応力  $\tau_{m(x)}$  は式(7)となる。

$$\tau_{m(x)} = t_m \cdot E_m \cdot \frac{d\varepsilon_m(x)}{dx}$$

$$\cong t_m \cdot E_m \left[ \frac{\varepsilon_{m(n+1)} - \varepsilon_{m(n-1)}}{\Delta x} \right] \quad (7)$$

簡便のために本実験により得られた有効付着長  $L_e$  で除して平均付着強度  $\tau_m$  を算定する。

$$\tau_m = t_m \cdot E_m \cdot \frac{d\varepsilon_m(x)}{dx} \cong t_m \cdot E_m \left[ \frac{\varepsilon_m}{L_e} \right] \quad (8)$$

図-15, 16 に式(8)より得られた剥離破壊荷重と付着長さの関係の計算結果と本実験結果を示す。ただし、有効付着長  $L_e$  は本実験結果より以下に示す値とした。

$$L \geq 150 \text{ mm のとき} \quad L_e = 150 \text{ mm} \quad (9)$$

$$L \leq 150 \text{ mm のとき} \quad L_e = L \quad (10)$$

算定に用いた平均付着強度は  $\tau_m = 1.0, 1.5, 2.0 \text{ N/mm}^2$  とし、この平均付着強度となる平均ひずみ量  $\varepsilon_m$  に有効付着長  $L_e$  を乗じて剥離破壊荷重を求めた。剥離破壊荷重実験値は平均付着強度  $\tau_m = 1.0 \text{ N/mm}^2$  以上とした計算値の上側に位置し、付着長さが増加し有効付着長に至るまでと、有効付着長を越え十分長くなった後も実験値は平均付着強度  $\tau_m = 1.0 \text{ N/mm}^2$  の計算値上側に分布している。この傾向は付着幅  $b = 75 \text{ mm}, 100 \text{ mm}$  の場合に見られ、平均付着強度は  $\tau_m = 1.0 \text{ N/mm}^2$  以上であることが分かる。

図-17 に剥離破壊時の増厚材 PCM 平均ひずみ量と付着

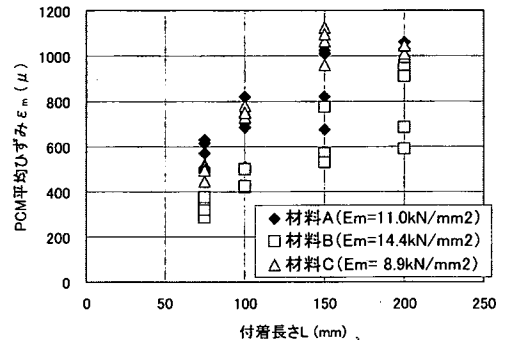


図-17 PCM 平均ひずみ量と付着長さの関係

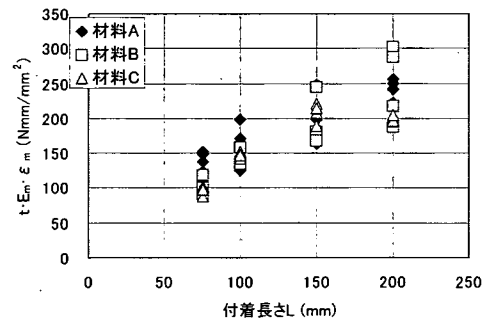


図-18 破壊荷重と付着長さの関係

長さの関係を示す。PCM 平均ひずみ量は実験値より得られた剥離破壊荷重から式(8) (9) (10)を用いて算定した。PCM 平均ひずみ量は PCM の静弾性係数  $E_m$  と相関関係にある。静弾性係数が  $8.9 \text{ kN/mm}^2$  の材料 C は PCM 平均ひずみ量が上側に分布し、同一付着長さでは破壊時の PCM 平均ひずみ量が他材料より高くなっている。一方静弾性係数が高くなるに従い PCM 平均ひずみ量は下側に分布している。これは補強筋から付着応力  $\tau_{s(w)}$  により PCM 増厚材に応力伝達される時、静弾性係数の高い PCM のひずみ量が小さくなることによるものだと考えられる。

図-18 に付着長さ と PCM の剛性と PCM 平均ひずみ量の

積すなわち、PCM 増厚さと静弾性係数の積に平均ひずみ量乗じた  $t_e \cdot E_e \cdot \epsilon_e$  の関係を示す。PCM の剛性と平均ひずみ量の積は PCM の種類にかかわらず、各付着長さにおいてほぼ同一の値となっている。すなわち図-17 に示されるように同一付着長さでは破壊時の PCM 平均ひずみ量が PCM 静弾性係数の増加に伴い低下するが、増厚部に作用する引張力を示す PCM の剛性と平均ひずみ量の積は各付着長さで同一の値となる。このことから本実験の範囲では PCM の静弾性係数が異なっても  $t_e \cdot E_e \cdot \epsilon_e$  は、ほぼ同一の値と挙動を示すものという。

図-19 に付着長さとして式(8)より得られた平均付着強度の関係(剥離破壊荷重より求めた計算結果)を示す。平均付着強度算定において各種材料の有効付着長は図-2 に示す実験結果より  $L_e=150\text{mm}$  とした。平均付着強度計算値は各付着長さでほぼ一定の強度となったが付着長さ 200mm においてやや高い値となっている。実際の有効付着長は  $L_e=150\text{mm} \sim 200\text{mm}$  の間だと考えられ、本実験結果の範囲では有効付着長  $L_e=150\text{mm}$  を採用したためである。このことから平均付着強度は実験により求めた有効付着長を用いて評価できるものと言える。今後、追加実験を行いデータを蓄積することにより、有効付着長を精度良く把握し本提案式の信頼性を高めていく必要がある。

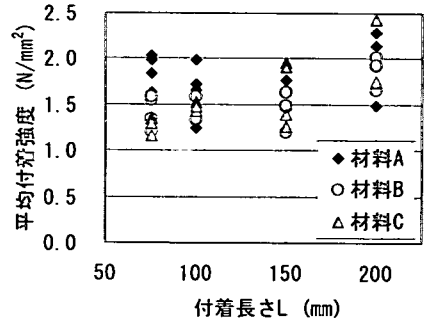


図-19 セン断付着強度算定結果と付着長さの関係

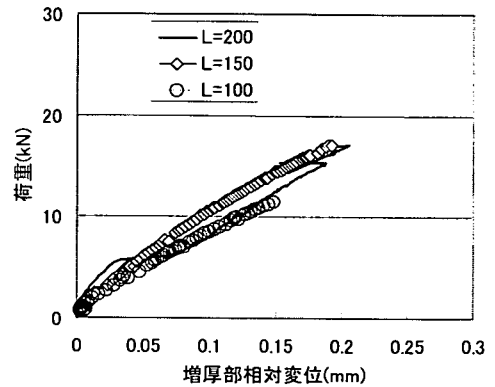


図-20 載荷荷重と増厚部相対変位の関係

## 5. 剥離破壊エネルギー

### (1) 荷重と変位関係

図-20 に載荷荷重と増厚部相対変位の関係 ( $L=100, 150, 200\text{mm}$ , 材料A) を示す。変位測定位置は増厚部である。各付着長さともに荷重と変位の関係は、ほぼ同様な勾配となった。また、剥離破壊時の変位量は付着長さ  $L=100\text{mm}$  の場合で約 0.15mm、付着長さ  $L=150\text{mm}$ , 200mm 両供試体の破壊時の変位量は約 0.2mm 程度であった。このことから付着長さが有効付着長以上の場合、剥離時の変位量はほぼ同程度であることが分かる。

### (2) 剥離破壊エネルギー $G_f$

コンクリートと増厚部分の破壊性状及び付着変形関係を把握するためには、コンクリートと増厚部分の剥離破壊エネルギーと相対変位を把握する必要がある。Täljsten は鋼板とコンクリートのせん断付着応力と相対変位の関係を弾性-剥離とした場合に、剥離破壊エネルギー  $G$  を用いて最大耐力との関係式を導いた<sup>10)</sup>。この手法を本実験結果に適用し剥離破壊エネルギー  $G_f$  を算定する式を同定する。図-21 に相対変位  $\delta$  と付着応力  $\tau$  の関係概念図を示す。図中における  $\delta = \delta_u$  は剥離が開始する点である。界面の剥離エネルギー  $G_f$  は単位面積の剥離が開始するまでに、界面において消費されるエネルギー

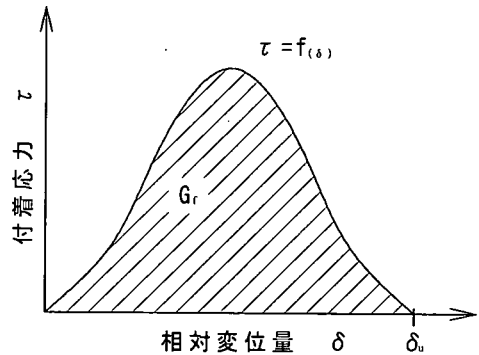


図-21 相対変位  $\delta$  と付着応力  $\tau$  の関係

と定義する。剥離エネルギー  $G_f$  は図中の斜線部分の面積となる。

$$G_f = \int_0^{\delta_u} \tau d\delta = \int_0^{\delta_u} f(\delta) d\delta \quad (11)$$

$G_f$  : 増厚部剥離破壊エネルギー,  $\tau$  : 付着応力

$\delta$  : コンクリート増厚部相対変位,  $\mu_s(x)$ : 補強筋変位

補強筋の弾性係数  $E_s$  と単位幅当たりの断面積から付着応



力と変位の関係は以下の式となる。

$$E_s \cdot \frac{n \cdot A_s}{b} \frac{d^2 \mu_s(x)}{dx^2} - \tau_x = 0 \quad (12)$$

荷端位置 (x=0) では補強筋で荷重が受け持たれている。

$$\frac{P}{n \cdot A_s} = \sigma_s(0) = E_s \frac{d\mu_s(x)}{dx} \quad (13)$$

コンクリートの変位は補強筋の変形に対して十分小さいものと考えられる。そのため、コンクリートの変位を無視すると、コンクリートと増厚端部の相対変位は補強筋の変位値となる。式(11), (12), (13)より剥離破壊エネルギー $G_f$ は以下の式で示される。

$$\begin{aligned} G_f &= \int_0^{\delta_\mu} \tau d\delta = \int_0^{\delta_\mu} E_s \frac{n \cdot A_s}{b} \frac{d^2 \mu_s(x)}{dx^2} d\delta \\ &= \left[ \frac{1}{2} E_s \frac{n \cdot A_s}{b} \left( \frac{d^2 \mu_s(x)}{dx^2} \right) \right]_{\infty}^{x=0} \\ &= \left[ \frac{n \cdot A_s}{2 E_s b} \sigma_s^2(0) \right]_{\infty}^{x=0} = \frac{P^2}{2 E_s b n A_s} \quad (14) \end{aligned}$$

本実験で行った試験の結果すべてに関し、式(14)を用いて剥離破壊エネルギー $G_f$ を算定した結果を表-5に示す。剥離破壊エネルギー $G_f$ は付着長さの増加とともに増している。これは式(14)は付着長さが無限長の場合を想定しているため、有効付着長以上の場合に有効になる。そのため表-5では付着長さ200mmの場合に適用できるものといえる。岸本ら<sup>11)</sup>、加藤<sup>12)</sup>はPCMを用いた増厚工法の付着試験を実施している(岸本ら:材料C, 加藤:材料A, C)。これらの研究の増厚工法は本研究と同様にコンクリート供試体に補強鉄筋 $A_s=63.34\text{mm}^2$ を配置し同種のPCMで増厚一体化したもので、付着界面の面内にせん断力を発生させ剥離実験をしたものである。付着長さは180mm~400mmである。本研究により得られた式(14)を用いてこれらの研究の剥離破壊荷重から剥離破壊エネルギーを算定した。図-22に剥離破壊エネルギーと付着長さとの関係を示す。岸本らの実験結果から算定した剥離破壊エネルギーも本実験結果と同様に付着長さの増加とともに増し、200mmを上限にほぼ一定の値を示していることが分かる。同様に加藤らの結果から算定した付着長さ400mmの剥離破壊エネルギーも岸本らの延長上に分布し

表-5 剥離破壊エネルギー $G_f$

PCM種類	付着幅 b (mm)	付着長さ L (mm)	剥離破壊荷重 $P_u$ (kN)	$G_f$ (N/mm)
材料A アンカー無し	75	75	10.35	0.056
		100	12.40	0.081
		150	18.59	0.182
	100	200	16.67	0.146
		75	12.23	0.059
		100	12.39	0.061
材料A アンカー有り	75	150	16.37	0.106
		200	25.63	0.259
		75	11.16	0.066
	100	100	14.84	0.116
		150	18.31	0.176
		200	18.73	0.185
材料B アンカー無し	75	75	15.21	0.091
		100	17.09	0.115
		150	19.87	0.156
	100	200	24.06	0.228
		75	6.78	0.024
		100	9.94	0.052
材料B アンカー有り	75	150	13.51	0.096
		200	22.69	0.271
		75	10.07	0.040
	100	100	13.36	0.070
		150	18.02	0.128
		200	18.66	0.137
材料C アンカー無し	75	75	8.71	0.040
		100	11.90	0.075
		150	18.37	0.178
	100	200	21.61	0.246
		75	11.90	0.056
		100	13.42	0.071
材料C アンカー有り	75	150	16.74	0.111
		200	21.77	0.187
		75	7.63	0.031
	100	100	11.07	0.064
		150	14.12	0.105
		200	19.53	0.201
材料C アンカー有り	75	75	8.74	0.030
		100	14.27	0.080
		150	22.05	0.192
	100	200	27.26	0.293
		75	7.52	0.030
		100	11.42	0.069
材料C アンカー有り	75	150	15.64	0.129
		200	19.73	0.205
		75	9.71	0.037
	100	100	14.70	0.085
		150	21.47	0.182
		200	27.26	0.293

た。これらのことから本研究で使用した範囲のPCMを用いた増厚工法で式(14)を用いて剥離破壊エネルギーを把握できるものといえる。

図-23に剥離破壊エネルギーとPCMの静弾性係数との関係を示す。付着長さの影響を取り除くために図中から

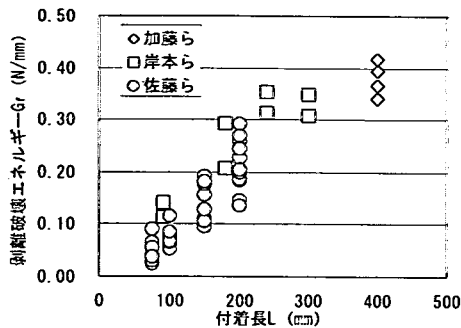


図-22 剥離破壊エネルギーと付着長関係

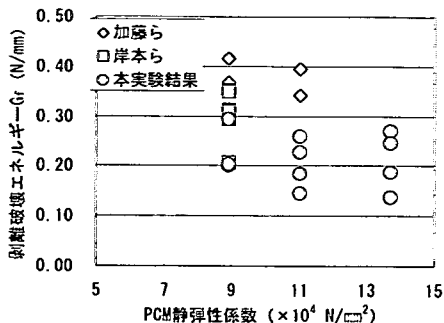


図-23 剥離破壊エネルギーとモルタル弾性係数関係

付着長さ 200mm 以下の値は除いている。本研究の範囲では PCM の静弾性係数の増加による剥離破壊エネルギーの低下挙動が推察されるが顕著な傾向は見られない。PCM の静弾性係数と剥離破壊エネルギー挙動は今後の実験データの蓄積により精度が上がるものと考えられる。

## 6. まとめ

(1) コンクリートと PCM 増厚付着界面の面内方向に一面せん断力を作用させた実験の結果、破壊形態は PCM 増厚部とコンクリート界面で剥離する破壊形態であった。付着幅は 75mm から 100mm の範囲では、付着幅が増加することにより剥離破壊荷重も増加した。付着長さの増加と共に剥離破壊荷重は増加するが、本実験の範囲では付着長さが 150mm を上限に剥離破壊荷重の増加は見られなかった。

(2) 補強筋を PCM で増厚一体化するのに加え、M-8 のコンクリートアンカーで固定した場合と無い場合との比較を行った。本実験のように付着界面の面内にせん断力が作用する環境下ではコンクリートアンカーの有無による剥離破壊荷重の違いは見られなかった。

(3) 補強筋と増厚材のひずみ分布から付着長さの範囲の中で応力負担している領域が存在し、応力負担領域とピーク位置の移動から増厚部分が応力負担する有効付着長があることが分かった。そのため付着長さの増加とともに剥離破壊荷重は増加するが有効付着長以上の付着長さの場合、剥離破壊荷重の増加はなくなるものといえる。

(4) 補強筋と増厚材のひずみ分布から補強筋に作用した引張力は PCM 増厚材により応力負担され、有効付着長内でコンクリートに伝達されていく。この応力伝達機構を把握し、有効付着長を用いて平均付着強度の算定式を同定した。この平均付着強度算定式を用いて、本研究で用いた 3 種の PCM に関して剥離破壊荷重から平均付着強度を算定した。

(5) 増厚部とコンクリート部の相対変位から PCM 増厚工

法に関する剥離破壊エネルギー算定式の同定を行った。剥離破壊エネルギーは剥離破壊荷重から求めることができ、付着長さが十分長い場合に PCM 増厚工法に関しても剥離破壊エネルギーの算定が可能であることが分かった。

謝辞：本研究を進めるに当たり武蔵工業大学講師栗原哲彦博士、ならびに大学院博士課程前期加藤貴祥君には多大なご助力を得ました。また、本論文をまとめるに当たり北海道大学大学院助手 佐藤靖彦博士には貴重なご助言をいただきました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 佐藤貢一, 小玉克己, 加納暢彦, 前田哲哉: 下面増厚した RC はりの補強筋剛性と破壊形態に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 1, pp. 563-568, 1998.
- 2) 佐藤貢一, 渡辺裕一, 松井繁之, 高井剣: 下面増厚工法による RC 床版補強の耐久性, 橋梁と基礎, Vol. 30, No. 9, pp. 23-29, 1996.
- 3) 佐藤貢一, 檜作正登, 肥田研一, 引地健彦: 吹付け下面増厚補強した道路橋 RC 床版の補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No. 1, pp. 517-522, 2000.
- 4) 岡田繁之, 川内康雄, 米倉重州夫, 財津公明: CFRP 表面張付による RC 梁のせん断補強, プレストレストコンクリート技術協会第 9 回シンポジウム論文集, pp. 309-312, 1999.10.
- 5) Ritthichauy, W., Tsuji, Y., Kobayashi, A., Kai, A., and Satoh, K., : RC slab strengthened by grid type CFRP and polymer cement mortar, 土木学会第 55 回年次学術大会, V-382, 2000. 9.
- 6) 佐藤靖彦, 浅野靖幸, 上田多門: 炭素繊維シートの付着機構に関する基礎研究, 土木学会論文集, No. 648/V-47, pp. 71-87, 2000. 5.
- 7) 上原子昌久, 下村匠, 丸山久一, 西田浩之: 連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析, 土木学会論文集, No. 634/V-45, pp. 197-208, 1999. 11.
- 8) 吉澤弘之, 呉智深, 袁鴻, 金久保利之: 連続繊維シートとコ

- ンククリートの付着挙動に関する検討, 土木学会論文集, No. 662/V-49, pp. 105-119, 2000. 11.
- 9) 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に関する研究, 土木学会論文集, No. 550/V-33, pp. 117-129, 1996. 11.
- 10) Täljsten, B.: Strengthening of Concrete Prisms using the Plate-Debonding Technique, *International Journal of Fracture*, Vol. 82, pp. 253-266, 1996.
- 11) 岸本真輝, 松井繁之, 塚崎征, 松本弘: PPMG モルタルの付着に関する研究, 土木学会第 55 回年次学術講演会, CS-260, 2000. 9.
- 12) 加藤貴祥: ポリマーセメントモルタルを用いた増厚工法の付着性状に関する検討, 武蔵工業大学大学院論文発表会報告集, 2002. 2.

(2002. 3. 18 受付)

## STUDY ON PEELING BEHAVIOR OF BOND INTERFACE OF CONCRETE MEMBERS RETROFITTED BY SURFACE OVERLAYING WITH POLYMER CEMENT MORTAR

Kouichi SATOH and Katsumi KODAMA

Ultimate failure of concrete members retrofitted by surface overlaying with polymer cement mortar may accompany shear peeling at the bond interface under combinations of structural systems and loading conditions. By this research, the bond behavior was solved experimentally and was grasped. Experimental method was that shearing bond stress was applied to the bonding interface of the specimens retrofitted by surface overlaying method with polymer cement mortar. The stress transfer mechanism of this method was understood from strain distribution of reinforcing bar and mortar. It was shown that the peeling failure energy of retrofitted part of this method can be calculated using bond stress and displacement of bond interface.