# 論文 疲労荷重下におけるポリマーセメントモルタルの付着強度について

古内 仁<sup>\*1</sup>·川崎 裕史<sup>\*2</sup>·上田 多門<sup>\*3</sup>

要旨:基盤コンクリートの表面粗さとポリマーセメントモルタルの付着強度の関係について, 既往の実験データと本研究の実験データを用いて検討を行った。その結果,異なる表面処理 工法によって得られた基盤コンクリートの処理面に対して,JIS 粗さパラメータを用いて評 価することで表面粗さと付着強度の関係を示し,その影響を取り入れた強度推定式を再構築 した。この付着強度を基とし,応力レベルを変数として疲労付着強度試験を行った。その結 果から,引張付着およびせん断付着の両者に対して,応力レベルと疲労寿命の関係を疲労強 度式として提示した。

キーワード:下面増厚補強工法,ポリマーセメントモルタル,表面粗さ,疲労付着強度

#### 1. はじめに

近年,自動車専用道路の高架橋床版や鉄道高 架軌道スラブ等で,ポリマーセメントモルタル (以下,PCMと表記)を用いた湿式吹付けによ る下面増厚補強工法の施工事例が増えている。 下面増厚補強は,補強される既存構造部材の形 式や形状による制限から増設する鉄筋の端部定 着をとることは困難であるため,PCM 自身の高 い接着性を利用して一体化させることを前提と している。

床版は,繰返し交通荷重を受けており,増厚 部の接着面では,常に付着応力が変動しながら 作用している。過去に行われたはり部材やスラ ブの疲労載荷実験では,最終的な破壊形態とし て,増厚部が端部から剥離することが確認され た<sup>1)</sup>。このとき,増厚部界面の付着応力は,直応 力とせん断応力の複合応力下にあるが,後者の ほうが剥離破壊に対して支配的となる<sup>2)</sup>。

著者らは,既往の実験<sup>3)</sup>において,PCMの引 張付着強度(接着強度)およびせん断付着強度 に対して基盤コンクリート表面粗さの影響を調 べるため,基盤コンクリートの表面処理深さと 使用する粗骨材最大寸法を変数として付着強度 試験を行い,基礎データを収集した。基盤コン クリートの表面処理形状については,JISの粗さ パラメータ<sup>4)</sup>を用いて評価し,PCMの付着強度 に与える影響を見出した。

既往の実験<sup>3)</sup>では、表面処理工法として表面 処理深さが3mm程度以下についてはショットブ ラスト工法(以下,SB工法と表記)を、3mm程 度以上についてはウォータージェット工法(以 下,WJ工法と表記)を用いた。本研究では、新 たにWJ工法を用いて表面処理深さが2mm程度 以下とした基盤コンクリートを用意し、付着強 度試験を行った。既往の実験結果に今回の実験 結果を加えて、表面粗さ形状が静的荷重下にお けるPCMの付着強度に与える影響について再検 討をおこなった。

さらに、将来的には下面増厚補強された床版 増厚部の剥離の予測方法を構築するために、疲 労荷重下における付着強度試験を実施し、PCM の付着破壊に対する疲労寿命の検討を行った。

#### 2. 実験概要

### 2.1 引張付着試験

JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験

- \*1 北海道大学 大学院工学研究科 助手 博(工)(正会員)
- \*2 北海道大学 工学部土木工学科

\*3 北海道大学 大学院工学研究科 教授 工博(正会員)

方法」<sup>5)</sup> に準拠して試験を行った。供試体は, 図-1に示すように辺長 100mm の立方体の基盤 コンクリートに PCM を厚さ 30mm となるように 打ち継いで作製した。PCM には試験接着面積が 60mm×60mm となるように井桁状に切れ込みを 入れ,試験領域の周囲に反力枠をとりつけた。 試験領域のPCMにはエポキシ系樹脂により接着 治具を取り付け,接着治具に直接引張力を与え て試験を実施した。

### 2.2 せん断付着強度試験

JCI-SPC3「ポリマーセメントモルタルのせん 断強さ試験方法(案)」<sup>6)</sup>に準拠して試験を行っ た。供試体は、図-2に示すように 70×70× 100mmの基盤コンクリートに同一寸法となるよ うに PCM を打ち継いで作製した。供試体には、 専用の鋼製治具を取り付け、接着面にせん断力 が作用するように載荷を行った。

### 2.3 実験変数

### (1) 静的荷重下の付着強度試験

実験変数は、引張付着強度とせん断付着強度 に共通で、基盤コンクリート面の表面処理深さ (約 2mm 程度以下)とした。供試体は、表-1 および2に示すように、それぞれの試験で各 12 個用意した。基盤コンクリートの表面処理に用 いたWJ工法(ノズル径 0.35mm-6 穴の回転ジェ ット方式)では、水圧調整を行いながら所定の 粗さとなるように施工が行われた。なお、下面 増厚工法を想定しているため、基盤コンクリー トの底面を表面処理面とした。表面処理が施さ れた後、粗度面が乾燥した状態でプライマーを 塗布し、1日後に PCM をコテ塗りによって打ち 継いで供試体を作製した。

## (2) 疲労荷重下の付着強度試験

引張付着およびせん断付着の疲労試験に用い た供試体は、上記の静的付着試験のものと同一 である。実験変数は応力振幅とし、表-3および 4 に示すようにいずれの試験においても静的付 着強度との比で表した。載荷にあたっては、引 張付着強度試験では下限応力を静的付着強度の 13%程度に、せん断付着強度試験では4%程度に



図-2 せん断付着試験の概要

固定し、上限応力を変化させている。

### 2.4 材料特性

基盤コンクリートには、早強ポルトランドセ メント、天然の粗骨材(静内川産)および細骨 材(鵡川産)を使用した。それぞれの基盤コン クリートの配合は、表-5に示すとおりである。 試験日における圧縮強度は、37.5~42.7 N/mm<sup>2</sup> (材令 60~112 日)であった。

PCM は、セメント、細骨材、粉末ポリマーな どがあらかじめ調整混合されたもので、コテ塗 りまたは吹付け工法のいずれの施工にも対応し

供試体 No.	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	表面処理 深さ (mm)	算術平均 粗さ	
2	39.0	0.534	0.322	
3	11	0.966	0.408	
10	11	1.754	0.871	
14	11	0.378	0.348	
16	11	0.180	0.230	
18	11	1.292	0.608	
20	11	1.194	0.607	
21	11	0.500	0.278	
24	11	—	0.319	
26	11	0.669	0.327	
27	11	0.283	0.197	
28	11	—	0.226	

表-1 引張付着試驗(静的)

表-2 せん断付着試験(静的)

供試体 No.	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	表面処理 深さ (mm)	算術平均 粗さ
8	40.7	0.860	0.324
10	11	0.717	0.376
11	11	0.375	0.258
13	11	1.273	0.612
14	11	0.697	0.384
15	11	0.486	0.257
19	11	1.331	0.751
22	11	0.842	0.375
24	11	0.282	0.321
29	11	1.565	0.675
31	11	1.935	0.681
33	11	0.652	0.254

た材料である。静弾性係数は 1.43×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup> (メ ーカー試験値) であり, 実測した圧縮強度は 34.7 N/mm<sup>2</sup> であった。

### 3. 考察

### 3.1 表面粗度の計測

本研究では、表面処理施工前および施工後の 基盤コンクリートの表面粗さを触針式三次元計 測器(X軸およびY軸方向のスキャンピッチ0.05 ~5.00mm, Z軸方向のスキャンピッチ0.025mm) により計測した。引張付着試験用供試体に対し ては、測定範囲を60×60mm、せん断付着試験用 供試体に対しては 70×70mm とした。X 軸およ び Y 軸方向スキャンピッチは、いずれの試験の 供試体に対しても1.0mm に設定した。

既往の研究<sup>3)</sup>では,JIS の金属製品の表面粗さ パラメータ<sup>4)</sup>を用いて,基盤コンクリート面の

## 表-3 引張付着試験(疲労)

供試体 No.	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	算術平均 粗さ	<u>応力振幅</u> 付着強度	
19	39.0	0.793	1.05	
1	11	0.217	0.95	
11	"	0.243	0.88	
25 (再)	11	0.263	0.87	
7	11	0.269	0.86	
23	11	0.294	0.85	
29	11	0.564	0.83	
6	11	0.378	0.80	
9	11	0.500	0.78	
15	11	0.265	0.77	
12	11	0.300	0.71	
4	11	0.262	0.67	
8	11	0.340	0.66	
5	11	0.338	0.56	
13	11	0.271	0.52	
25	11	0.263	0.47	
22	11	0.689	0.39	

### 表-4 せん断付着試験(疲労)

供試体 No.	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	算術平均 粗さ	<u>応力振幅</u> 付着強度
7 (再)	41.0	0.281	0.96
18	11	0.246	0.92
6	11	0.270	0.91
25	11	0.278	0.86
26	11	0.229	0.84
28	11	0.252	0.82
12	11	0.336	0.78
27	11	0.258	0.76
32	32 "		0.74
16	16 "		0.71
9	11	0.221	0.69
23	11	0.271	0.64
21	11	0.252	0.61
20	11	0.282	0.56
7	11	0.281	0.47

## 表-5 基盤コンクリートの配合

粗骨材	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
最大寸法	W	С	S	G	А
20mm	163	326	701	1138	0.143

粗さの評価を行った。その結果,引張付着強度 およびせん断付着強度は,いくつかのJIS 粗さパ ラメータと相関性があることが見出された。

本研究では、これらのうち比較的取り扱いや すい「算術平均粗さ  $R_a$ 」を、基盤コンクリート 面の表面粗さの尺度とすることした。なお、「算 術平均粗さ  $R_a$ 」とは、粗さ曲線から、その平均 線の方向に基準長さだけ抜き取り、この抜き取 り部分の平均線から測定曲線までの偏差の絶対 値を合計し、平均した値である。詳細について は、既往の研究<sup>3)</sup>を参照されたい。

### 3.2 表面処理深さと表面粗さの関係

今回のデータと既往のデータを合わせて,基 盤コンクリート面の表面処理深さと表面粗さの 関係を図-3に示す。図中の黒丸はWJ工法によ る処理面で,白丸はSB工法による処理面であ る。これらのデータのうち、WJ工法で表面処理 深さが2mm程度以下のものが今回のデータで ある。また,図中の実線および破線は、各工法 に対する近似線(双曲線)である。この結果か ら、表面処理深さの小さい領域でもWJ工法は SB工法よりも同じ表面処理深さで2倍程度以上 の粗さとなることが示された。

## 3.3 静的荷重下における付着強度

## (1) 引張付着強度

既往の研究<sup>3)</sup>では,粗さが大きくなると表面 積が増えることによって引張付着強度が増加す るが,ある程度以上になると,破壊時に粗骨材 が抜けやすくなることによって引張付着強度が 低下することが示されていた。しかし,表面粗 さが小さいものと大きいものでは,表面処理工 法が異なっていたので,この性状が連続的な関 係であるかどうかは明確ではなかった。

今回,新たなデータ(WJ工法, Ra<1.0より 小さい供試体)を加えた結果,図-4に示すよう に,異なる工法で処理された面についても,表



図-3 表面処理深さと表面粗さの関係

面粗さパラメータ(算術平均粗さ)を尺度とす れば,ほぼ同じ引張付着強度であることが示さ れた。これらのデータに対して,既往の研究で 提示した回帰式で再近似を行うと以下の式が得 られた。

$$(\sigma_{bu} / f_t) = \Omega_1 \times \Omega_2 \times (\sigma_{bo} / f_{to})$$
(1)

ここに、 $\sigma_{bu}$ : 引張付着強度  $f_t$ : 基盤コンクリートの引張強度  $= 0.23 f_c^{,2/3}$  ( $:: f_c'$ : 圧縮強度)  $\sigma_{b0}$ : 表面未処理のときの接着強度  $f_{to}$ : 表面未処理供試体の基盤コンク リート引張強度  $\sigma_{b0} / f_t = 0.709$   $\Omega_1$ : 表面積の増加による強度増加率  $(=1+0.703 R_a)$   $\Omega_2$ : 骨材のゆるみによる有効な抵抗 領域の減少率 $(=1-0.273 R_a)$ 



図-4 静的引張付着強度と表面粗さの関係

図-5 静的せん断付着強度と表面粗さの関係

### (2) せん断付着強度

一方, せん断付着強度については, 粗さの増加とともに単調に増加する傾向が示されていた。 図-5は, 引張付着試験と同様に既往の実験データに今回のデータ(WJ工法, Ra<1.0 より小さい供試体)を加えて示したものである。この結果においても, 表面粗さパラメータ(算術平均粗さ)を尺度とすれば, ほぼ同じせん断付着強度であることが示された。再回帰の結果は, 以下のとおりである。

$$(\tau_{bu} / f_t) = (1 + 0.0764R_a) (\tau_{bo} / f_t)$$
(2)

ここに、 $\tau_{bu}$ : せん断付着強度  $\tau_{bo}$ : 表面未処理のせん断付着強度  $\tau_{bo} / f_t = 2.011$ 

## 3.4 疲労荷重下における付着強度

### (1) 引張付着強度

前節で提示した静的荷重下の引張付着強度を 基に,疲労荷重下における付着強度試験を実施 した。具体的には,式(1)により静的引張付着強 度を算出し,その強度に対して下限応力および 上限応力を定めた。

図-6は、疲労寿命と作用応力の関係を示した ものである。縦軸は、応力レベル(静的強度に 対する最大応力の比)である。横軸の疲労寿命 は、対数で示した。なお、200万回載荷で、破壊 しなかった供試体は、記号に矢印を付した。





ー般に、コンクリートの疲労強度は、最大応 カ、最小応力および応力振幅のうち、2つの応力 パラメータに依存することが知られている<sup>7)</sup>。一 定応力の繰返しによる場合には、Goodman 型も しくは Smith 型の S-N 関係として示すことが多 いようである。土木学会のコンクリート標準示 方書<sup>8)</sup>では、前者のタイプを採用しており、次 式のような関数形を与えている。

$$\frac{\sigma_r}{f_k} = \left(1 - \frac{\log N}{K}\right) \left(1 - \frac{\sigma_{\min}}{f_k}\right)$$
(3)

ここに、
$$\sigma_r$$
:応力振幅  
 $\sigma_{\min}$ :最小応力  
 $f_k$ :静的強度  
 $N$ :疲労寿命  
 $K$ :係数

破壊断面が界面より少しコンクリート側であ ることから、コンクリートの疲労強度特性に類 似していると考え、付着の疲労性状は上記のよ うな関係を適用することとした。実験結果を最 小二乗法により近似を行うと、以下のような関 係が得られる。

$$\frac{\sigma_{br}}{\sigma_{bu}} = \left(1 - \frac{\log N}{K}\right) \left(1 - \frac{\sigma_{b\min}}{\sigma_{bu}}\right) \tag{4}$$

ここに, 
$$\sigma_{br}$$
:引張付着応力の振幅  
 $\sigma_{b\min}$ :最小引張付着応力  
 $K = 21.0$ 



図-7 疲労荷重下におけるせん断付着強度

なお,図中には(1.65×標準偏差)を減じた 95%生存確率も参考値として示した。

### (2) せん断付着強度

前項と同様に,式(2)から算定される静的せん 断付着強度を基に,疲労荷重下における強度試 験を実施した(図-7参照)。これらの結果につ いても,式(3)の関数形を用いて近似を行うと, 以下の式が得られる。

$$\frac{\tau_{br}}{\tau_{bu}} = \left(1 - \frac{\log N}{K}\right) \left(1 - \frac{\tau_{b\min}}{\tau_{bu}}\right)$$
(5)

ここに、 $\tau_{br}$ : せん断付着応力の振幅  $\tau_{b\min}$ : 最小せん断付着応力 K = 20.4

以上のことから,引張およびせん断付着に対 する疲労性状を式(3)で示した関数を適用すると, 式中の係数 K はいずれも 20 程度であり,ほぼ同 じ値として示すことができると思われる。

### 4. まとめ

ポリマーセメントモルタルの付着強度に対す る基盤コンクリートの表面粗さの影響について, 既往の実験データと本研究の実験データをあわ せて検討を行った結果,以下の知見を得た。

- (1) 表面処理深さの小さい領域でもウォーター ジェット工法はショットブラスト工法より も同じ表面処理深さで2倍程度以上の粗さ となる。
- (2) 表面粗さを JIS の粗さパラメータを尺度とす ることで,引張付着強度およびせん断付着強 度を連続的に評価することができる。
- (3) 引張付着強度およびせん断付着強度について、今回のデータを加えて、表面粗さの影響を取り入れた強度算定式を再構築した。

引張付着応力およびせん断付着応力について, 応力レベルをパラメータとした疲労載荷試験か ら,以下の知見を得た。

(4) 応力レベルによる疲労寿命の予測式として, 応力振幅と最小応力で関係付けられる

**Goodman**型を適用した場合は,式中の係数 K は引張付着とせん断付着でほぼ同じ値となった。

#### 謝辞

本研究において, PCM の打ち継ぎ施工では (株)エヌエムビー中央研究所 吉住 彰氏から多 大なご協力をいただきました。また,ウォータ ージェット施工では(株)マレックス技研 山村 鋭治氏にご助力いただきました。ここに感謝の 意を表します。なお,本研究は平成17年度日本 学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C),課 題番号 17560417)の一部で行ったものです。こ こに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 古内 仁,恒岡 聡,角田與史雄,吉住 彰: 吹付けモルタルで下面増厚補強した RC 部材 の耐荷性状について、コンクリート工学年次 論文集, Vol.22, No.1, pp.523-528, 2000
- 2) 恒岡 聡, 古内 仁, 角田與史雄, 吉住 彰:
  吹付けモルタルを用いた下面増厚補強 RC部 材におけるモルタルの剥離挙動について, コ ンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1573-1578, 2002
- 3) 古内 仁, 酒井 亮, 上田多門: ポリマーセメントモルタルの付着特性に与える界面粗度および粗骨材寸法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1567-1572, 2006
- JIS B 0601 製品の幾何特性仕様(GPS) 一表面 性状:輪郭曲線方式 – 用語,定義及び表面 性状パラメータ,日本規格協会,2001.1
- 5) JIS A 1171 ポリマーセメントモルタルの試験 方法,日本規格協会,2000.3
- 6) JCI 基準集(1977~2002 年度), 日本コンク リート工学協会, 2004.4
- 7) 吉川弘道:鉄筋コンクリートの解析と設計, 丸善, 1995
- コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 土木学会,2002