

論文 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

古内 仁^{*1}・酒井 亮^{*2}・上田 多門^{*3}

要旨: 基盤コンクリートの粗骨材最大寸法とはつり深さをパラメータとして、ポリマーセメントモルタルの付着特性との関係を実験により調べた。実験結果から、表面処理の施工方法の違いによって表面粗度の特性が異なることを示した。ポリマーセメントモルタルの接着強度およびせん断付着強度と表面粗度の関係に対しては、JISの粗さパラメータによる評価を行い、その関係を明らかにした。

キーワード: ポリマーセメントモルタル, 粗さ, 粗骨材寸法, 接着強度, せん断付着強度

1. はじめに

近年、ポリマーセメントモルタル（以下、PCMと表記）の施工性能の向上に伴い、湿式吹付け工法による下面増厚補強が注目されており、新幹線高架軌道スラブや自動車専用道路の高架橋床版等で施工事例が増加している。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。

PCMとコンクリート界面の付着は、PCM自身の化学的付着作用と既設コンクリート処理表面の幾何学的な形状（凹凸面）による機械的付着作用からなる。PCMの剥離に対しては、後者の影響が無視できない。高瀬ら¹⁾は、処理表面の粗さが粗くなるほど、曲げ、せん断、付着強度が増加することを報告している。松田ら²⁾は、コンクリートの打継面について基盤の表面積と山数がモルタルのせん断付着強度に与える影響が大きいと報告している。しかしながら、モルタル材料の付着特性について、粗度に着目した研究は必ずしも多くなく、定量的な評価方法を確立するには至っていない。

本研究では、PCMの接着強度およびせん断付

着強度と表面粗度の関係を調べるため、表面粗さに影響を与える因子として基盤コンクリートの粗骨材寸法とはつり深さを取り上げ、要素試験体を用いた実験から基礎データを収集することとした。実験データに基づき、表面粗度に対してJISの粗さパラメータを用いて評価し、PCMの付着特性との関係について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 接着強度試験

JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」³⁾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。接着面積は、60mm×60mmを確保しPCM硬化後にエポキシ系樹脂により接着治具を取り付けた。接着面の周囲に反力を取り、接着治具に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)」⁴⁾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、

*1 北海道大学 大学院工学研究科助手 博士(工学) (正会員)

*2 北海道大学 公共政策大学院

*3 北海道大学 大学院工学研究科教授 工博 (正会員)

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载荷を行った。

2.3 実験変数

接着強度とせん断付着強度に共通で、基盤コンクリートの粗骨材最大寸法と表面処理におけるはつり深さを実験変数とした。最大寸法が10mm, 15mm, 20mmの粗骨材を用意し、3種類の基盤コンクリートを作製した。これらの基盤コンクリートに対し、目標はつり深さが1mm程度, 1~3mm, 3~6mm, 6~10mmとなるように表面処理を施した。変数の組合せは、表-1に示すように12通りである。なお、1変数につき3個ずつの供試体を用意した。

2.4 供試体作製方法

基盤コンクリートの表面処理には、ショットブラスト工法(以下SB工法と表記)とウォータージェット工法(以下WJ工法と表記)を用いた。SB工法は、平均粒径1.0mmのスチールグリッドをエアブラスト方式(6気圧)によって行われ、目標とするはつり深さが1mm程度のもの、1mm~3mmのものに対して適用した。WJ工法はノズル径0.35mm(6穴)の回転ジェット方式で、施工は水圧を調整しながら行われた。WJ工法は、目標とするはつり深さが3~6mmおよび6~10mmのものに対して適用した。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、粗度面に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。

2.5 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(鶴川産)を使用した。それぞれの基盤コンクリートの配合は、表-2に示すとおりである。試験日における圧縮強度は、35.8~40.0 N/mm²(材令56~90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た材料である。試験日における圧縮強度は、31.0

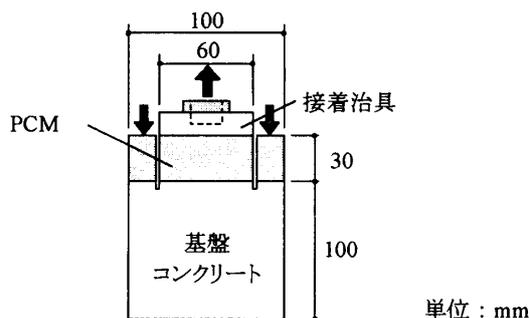


図-1 接着試験用供試体

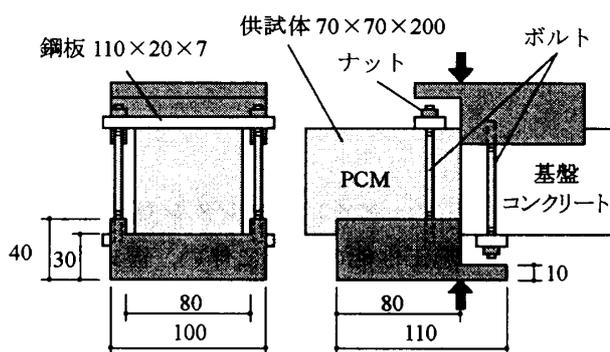


図-2 せん断付着試験用供試体

表-1 実験変数の組合せ

供試体の記号		粗骨材 最大寸法	目標 はつり深さ
接着試験	せん断 付着試験		
B10-1	S10-1	10mm	1mm程度
B10-3	S10-3	〃	1~3mm
B10-6	S10-6	〃	3~6mm
B10-10	S10-10	〃	6~10mm
B15-1	S15-1	15mm	1mm程度
B15-3	S15-3	〃	1~3mm
B15-6	S15-6	〃	3~6mm
B15-10	S15-10	〃	6~10mm
B20-1	S20-1	20mm	1mm程度
B20-3	S20-3	〃	1~3mm
B20-6	S20-6	〃	3~6mm
B20-10	S20-10	〃	6~10mm

表-2 基盤コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法	単位量 (kg/m ³)				
	W	C	S	G	A
10mm	178	356	856	847	0.036
15mm	173	346	812	943	0.035
20mm	163	326	791	1037	0.033

~42.6 N/mm²(材令21~55日)であった。

3. 考察

3.1 表面粗度の計測

本研究では、はつり施工前およびはつり施工後の基盤コンクリートの表面粗度を触針式三次元計測器（X軸/Y軸方向スキャンピッチ 0.05～5.00mm, Z軸方向スキャンピッチ 0.025mm）により計測した。接着試験用供試体に対しては、測定範囲を 70×70mm, せん断付着試験用供試体に対しては 60×60mm 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。

JISには3次元粗さパラメータについては明確な規定がなく、2次元での粗さパラメータが規定されているだけである。一般に、金属などの工作物の表面に要求される機能と相関があると言われている粗さパラメータがあり、例えば、接着性に対しては「算術平均粗さ」、「二乗平均平方根傾斜」、摩擦に対してはこれらのパラメータに加え「最大高さ粗さ」、「最大山高さ」、「スキューネス」などがある⁵⁾。

JISの定義によれば、加工品の表面に直角な平面でその表面を切断したとき、その切り口面に現れる輪郭を断面曲線という。この曲線には、図-3に示すように、種々の波長の凹凸が含まれているが、この断面曲線から所定の波長の短い成分（粗さ成分）を除去した曲線をうねり曲線という。逆に断面曲線から所定の波長より長い成分（うねり成分）を除去した曲線を粗さ曲線という。なお、図中における平均線はうねり曲線を直線に置き換えた線である。粗さパラメータの評価の基礎となる粗さ曲線は、カットオフ値 λ_c の高域フィルタによって、断面曲線から長波成分を遮断して得た輪郭曲線である。金属材料の場合、 λ_c は表面の状態に応じてその推奨値が与えられているが、例えば荒仕上げ表面では 8mm となっている。このような面では算術平均粗さ R_a が概ね 10～80 μm であり、コンクリート粗度面の 1/10 程度以下であると予想されるので、コンクリートに対しては $\lambda_c=80\text{mm}$ とするのが適当であると考えられる。

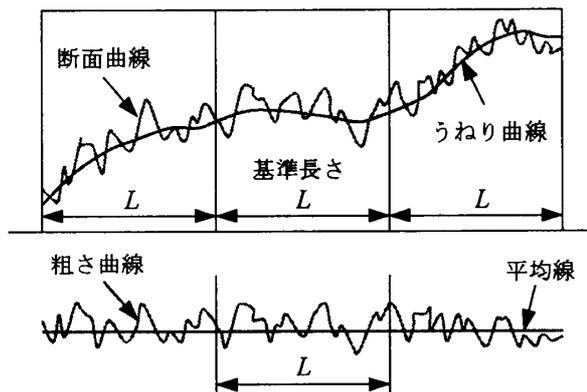


図-3 JISによる輪郭曲線の定義

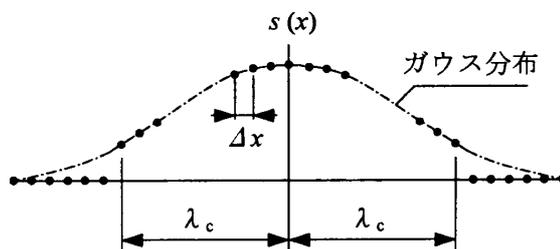


図-4 ガウス形の位相補償フィルタ

JIS B 0601⁶⁾および JIS B 0632⁷⁾では、デジタルデータを前提として、ガウス形の位相補償フィルタ（ガウシアンフィルタ）を用いている。位相補償フィルタの重み関数は、正規分布の式に一致し、離散データにガウス形の重みをつけるたたみ込み積分は、図-4のように有限範囲の重みを対称になるようにして行われる。

粗さ評価には、先に示したようにいくつかのパラメータが示されている。ここでは、本研究で用いた粗さパラメータのみについて示す。

- ・算術平均粗さ R_a

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。

- ・二乗平均平方根傾斜 $R_{\Delta q}$

基準長さにおける局部傾斜の二乗平均平方根。 x 方向に等間隔 Δx で測定されたデータから局部傾斜を求め方として、ラグランジェの多項式を当てはめ中央の位置で数値微分する方法がある。JIS B 0601では、7点公式が示されている。二乗平均平方根傾斜は、次式による。

$$R\Delta q = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{dz_i}{dx_i} \right) \right\}^2} \quad (1)$$

ここに、 x_i : i 番目の点の位置
 z_i : i 番目の点の高さ
 n : データ数

・最大高さ粗さ R_z

基準長さにおける粗さ曲線の山高さの最大値と谷深さの最大値との和。

・スキューネス R_{sk}

粗さ曲線の二乗平均平方根粗さ R_q の三乗によって無次元化した基準長さにおける $Z(x)$ の三乗平均で次式のように表される。

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^3 dx \right] \quad (2)$$

ここに、 $Z(x)$: 任意の位置 x における輪郭曲線の高さ。平均線の下側を負、上側を正とする。

l : 基準長さ

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^2 dx}$$

スキューネスは、突出した山または谷の影響を強く受け、偏り度（高さ方向の確率密度関数の非対称性の尺度）を表す。

各供試体の粗さ評価において、粗さ曲線は図-5に示すように、原点から x 軸方向の直線をすべて連結して1本の線分として表した。

3.2 はつり深さと表面粗度の関係

図-6は、はつり深さと表面粗度の関係をあらわしたもので、粗さパラメータは算術平均粗さを例として示した。はつり深さは、表面処理前と表面処理後に測定された三次元データより求めた平均高さの差を用いた。図中の曲線は、参考値としてそれぞれの工法に対して双曲線を当てはめた近似値を示している。この結果より、SB工法とWJ工法によって、粗度の特性が異なることが示されており、同じはつり深さに対してWJ工法はSB工法の2倍程度以上の粗度が得られる。粗骨材寸法の違いについては、明確な傾向が見られないことから、通常の粗骨材寸法

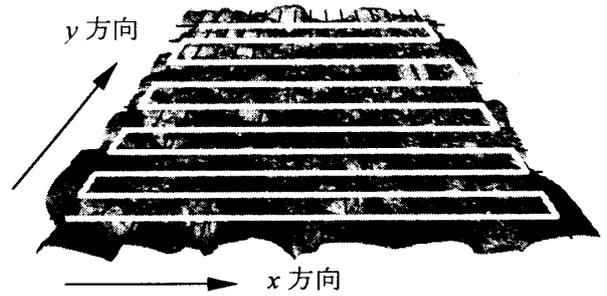


図-5 粗さ評価に用いた測定データの連続化

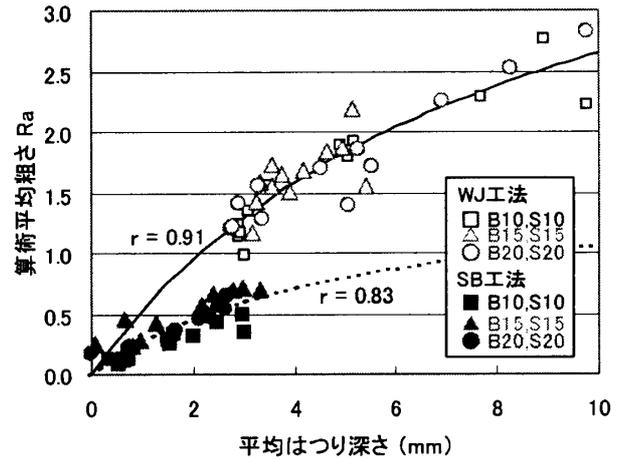


図-6 はつり深さと表面粗度の関係

のコンクリートでは最大寸法の影響がないと思われる。他の粗さパラメータについても、はつり深さとの関係はほぼ同様の結果を得た。

3.3 粗さパラメータと接着強度の関係

図-7および図-8は、接着強度と算術平均粗さおよび二乗平均平方根傾斜との関係を示したものである。データにばらつきは見られるものの両者でほぼ同様の傾向が見られる。すなわち、粗度の増加に伴って接着強度が増加するが、中間の粗度でピークを迎え、それ以降では強度の低下が見られる。これは、表面積が増加することで見かけ上の接着強度が増加するが、一方で、はつり深さが大きくなるにつれて、露出した粗骨材が破壊時に抜けやすくなるためである。なぜならば、PCMの材料としての接着力に比べれば、通常のもルタルマトリックスと粗骨材界面の接着力は小さいからである。この強度を弱める挙動は、はつり深さが小さいときは径の小さな骨材のみが抜けやすいが、はつり深さが大きくなると径の大きい骨材も抜けやすくなる。し

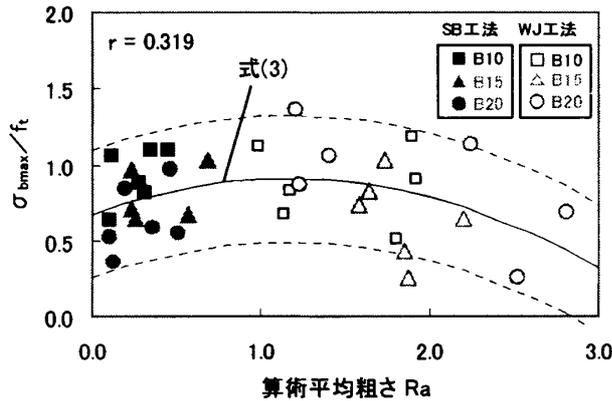


図-7 接着強度と算術平均粗さの関係

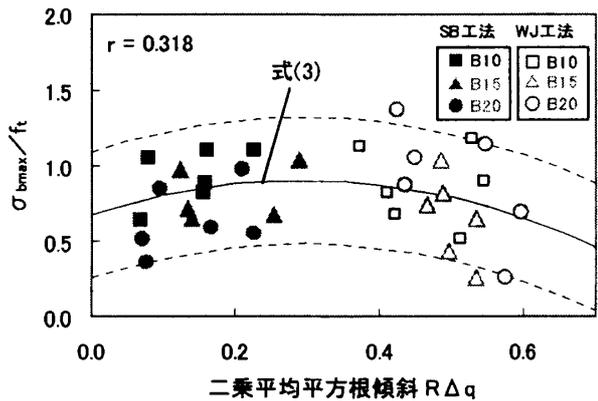


図-8 接着強度と二乗平均平方根傾斜の関係

たがって、接着強度は、粗度が増加することにより強度を増す効果と、露出した粗骨材が抜けやすくなることにより有効な抵抗領域が減少し強度を低下させる効果が複合的に作用すると考えることができる。そこで、この両者の影響を、以下に示す式によって表すこととした。

$$\sigma_{bmax} / f_t = \Omega_1 \times \Omega_2 \times \sigma_{bo} / f_{to} \quad (3)$$

ここに、 σ_{bmax} : 接着強度

f_t : 基盤コンクリートの引張強度
 $= 0.23 f_c'^{2/3}$ ($\because f_c'$: 圧縮強度)

σ_{bo} : 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

Ω_1 : 表面積の増加による強度増加率
 $= 1 + 0.886 R_a$: R_a を用いた場合
 $= 1 + 3.50 R\Delta_q$: $R\Delta_q$ を用いた場合

Ω_2 : 骨材のゆるみによる有効な抵抗領域の減少率
 $= 1 - 0.290 R_a$: R_a を用いた場合
 $= 1 - 1.15 R\Delta_q$: $R\Delta_q$ を用いた場合

図中の実線が近似によって得られた式で、 $R_a = 1.2$ 付近、 $R\Delta_q = 0.3$ 付近で接着強度が最も大きくなる。なお、破線は 90% 信頼区間である。

3.4 粗さパラメータとせん断付着強度の関係

図-9 は、せん断付着強度と各種粗さパラメータの関係を示したものである。粗さパラメータの算術平均粗さ、二乗平均平方根傾斜および最大高さ粗さとの関係については、粗度が増加するにつれてせん断付着強度が単調に増加する傾

向が見られた。これらの3つのパラメータについては、次のように線形関係で近似することができる。

$$\tau_{max} / f_t = (1 + 0.0815 R_a) \tau_{maxo} / f_{to} \quad (4)$$

$$\tau_{max} / f_t = (1 + 0.332 R\Delta_q) \tau_{maxo} / f_{to} \quad (5)$$

$$\tau_{max} / f_t = (1 + 0.0153 R_z) \tau_{maxo} / f_{to} \quad (6)$$

ここに、 τ_{max} : せん断付着強度

τ_{maxo} : 表面未処理のせん断付着強度

$$\tau_{maxo} / f_{to} = 2.007$$

スキューネスは、山に対し谷の部分が広い粗さ曲線では、確率密度関数は谷の方へ偏った分布形となり正の値を示す。山頂部分が比較的平らな場合には、確率密度関数は山頂側に偏って、スキューネスは負の値を示し、すべり面などでは初期磨耗が生じ難くいとされている。本実験の供試体では、全般的に負の値をとっており、山頂部分が比較的平らであるという傾向にあるが、スキューネスがせん断付着強度と相関を示すような結果は得られなかった。

4. まとめ

(1) 平均はつり深さと粗さパラメータの関係から、ショットブラスト工法とウォータージェット工法によって粗度の特性が異なることが示された。同じはつり深さに対して、ウォータージェット工法はショットブラスト工法の2倍程度以上の粗度が得られる。粗骨材寸法の違いについては、明確な傾向が見られ

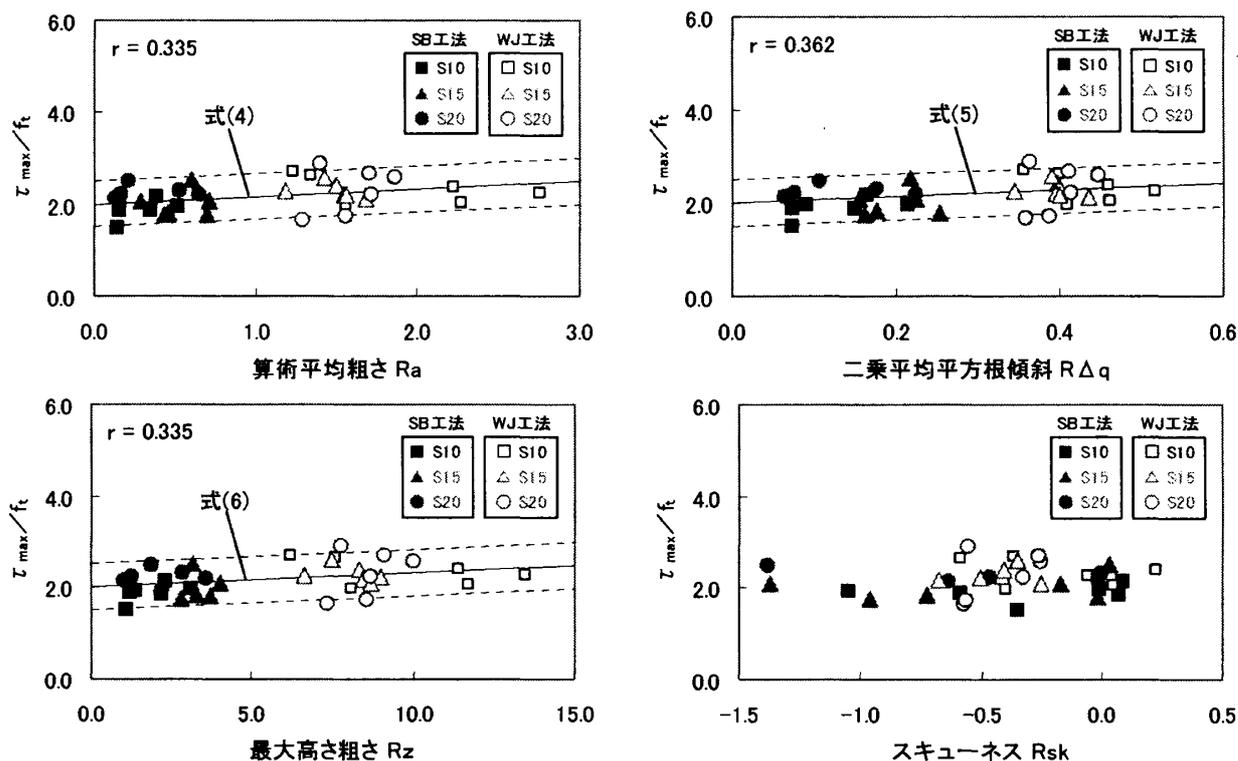


図-9 セン断付着強度と JIS 粗さパラメータとの関係

ないことから、通常の粗骨材寸法のコンクリートでは最大寸法の影響がないと思われる。

- (2) 接着強度は、粗度の増加に伴って増加するが中間の粗度でピークを迎え、それ以降では強度の低下が見られた。接着強度に対して、粗度が増加することにより強度を増す効果と露出した粗骨材が抜けやすくなることにより有効な抵抗領域が減少し強度を低下させる効果の複合的な作用を近似式により表した。
- (3) セン断付着強度は、粗度が増加するにつれて単調に増加する傾向が見られた。相関がある3つの粗さパラメータを用いて、粗度とセン断付着強度の関係を近似式により表した。

謝辞：本研究において、基盤コンクリートの表面処理を行うにあたり、ウォータージェット工法では、北海道リナック技研(株)山村鋭治氏および小田秀輝氏からの多大なご助力を得ました。また、ポリマーセメントモルタルの打ち継ぎ施工では、(株)デグサコンストラクションシステムズ 吉住彰氏および増田憲一郎氏のご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高瀬誠司, 小玉克巳, 栗原哲彦, 佐藤貢一: 補修・補強材料としてのポリマーセメントモルタルの付着性状, コンクリート工学年次論文集, 22-1, pp.319-324, 2000
- 2) 松田浩, 和田眞禎, 仲村政彦, 鶴田健: 3次元計測装置を用いたコンクリート表面粗度の定量化と付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 23-3, pp. 901-906, 2001
- 3) 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
- 4) JCI 基準集 (1977~2002 年度), 日本コンクリート工学協会, 2004.4
- 5) 會田俊夫ほか: 切削工学, 精密工学講座 11, コロナ社, 1973
- 6) JIS B 0601 製品の幾何特性仕様(GPS)—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
- 7) JIS B 0632 製品の幾何特性仕様(GPS)—表面性状: 輪郭曲線方式—位相補償フィルタの特性, 日本規格協会, 2001.1