論文　各種異なる母材及び鉄筋に対するジオポリマーモルタルの付着特性に関する基礎的研究

Sanjay PAREEK[*1]・鹿島大雄[*2]・丸山一平[*3]・荒木慶一[*4]

要旨：本論では，母材に鉄筋，表面状態の異なるコンクリート並びに鉄板を使用し，加熱養生を行ったジオポリマーとの付着性状について，実験的に検討を行った。その結果，ジオポリマーモルタルは異形鉄筋に対し，優れた付着性を有すること，ジオポリマーモルタルと母材コンクリートとの引張接着強さの向上には，母材を水中浸漬せず，母材の表層をグラインダー処理することが有効であった。一方，母材コンクリートの表層に多量の水が存在する場合，GP と母材コンクリートとの界面近傍の水量が増加することにより，GP のアルカリ濃度は低下し，結果，引張接着強さの低下並びに接着界面破壊が生じる。

キーワード：ジオポリマーモルタル，引張接着強さ，鉄筋，コンクリート

1. はじめに

循環型社会の構築には，天然資源消費量の抑制と産業廃棄物排出量の削減に加え，既存建築ストックの長期的な利用が重要となる。そのためには環境に配慮した材料を使用し，各種建築物に適した補修・補強技術を確立する必要がある。我が国においても現在，補修・補強に関する新技術や新材料の開発は積極的に進められているものの，未だ十分とは言い難い。

補修材料は，主に樹脂材料，ポリマーセメント複合材料，セメント材料の 3 つに大別され [1)]，今日では樹脂系とポリマーセメント系が主流となっている。しかしこれらの補修材料は，耐久性，耐熱性及び耐酸性に加え，製造工程において大量の二酸化炭素 (以下, CO_2) を排出するなどいずれかの面で本質的な課題が残る [1) 2)]。

この様な背景の下，近年，環境配慮型の新規建築材料としてジオポリマー (以下，GP) が注目されている [3)]。GP は，原料としてフライアッシュ (以下，FA) などの産業廃棄物を大量に利用することができ，一般的な建築材料であるセメントコンクリートと比較し，CO_2 排出量を最大約 75 % 低減できると報告されている [4)-6)]。さらに約 100 MPa の高強度化の実現，酸性溶液に対する耐性，耐熱性や塩分浸透抵抗性が極めて優れており，これまでセメントコンクリートが適用できなかった環境下への利用範囲の拡大が期待できる [7)-10)]。

著者らはこれまでに建築物の部材として GP の実用化を目指し，GP の強度特性及び耐薬品性の把握や GP と鋼板との剥離性状に関する検討を行ってきたが [11)-13)]，GP を建築物の補修材として適用するためには，新たに各種母材との付着性と耐久性を把握する必要がある。

これまでに補修材として GP を適用した研究は複数行われており，GP はセメント補修材と比較し，優れた接着強度，耐久性を有していると報告されている [14)-17)]。また，Caroline らは，コンクリートの付着は母材コンクリートの表面状態が重要な要素であると指摘しており，母材表面をサンドブラスティング処理することで付着性向上に効果的であると報告している [18)]。Momayez らは母材をワイヤーブラシで処理することで，高い付着性を示すと述べている [19)]。一方，Caroline らは母材表面をグラインダー処理した場合，付着強度が低下することを指摘しているが [18)]，Eduardo らは母材表面を研磨処理することで付着強度は向上するとの報告例があるとした [20)]。しかし上述した研究において，加熱乾燥条件下での各種母材との付着性状に着目した研究は未だ少なく，その中でも長期材齢が経過した母材を使用し，母材の表面状態の違いが GP の付着強度に及ぼす影響に焦点を当てた研究は存在しない。

本論では，母材に鉄筋と表面状態の異なるコンクリート及び鉄板を使用し，加熱養生を行った GP との付着性状について，鉄筋の引き抜き試験並びに引張接着強さ試験による検討を行った。鉄筋の引き抜き試験では，得られた結果と既往の研究結果を比較しながら，鉄筋と GP の付着性状の解明に向けての提言を行った。GP とコンクリートとの付着性状では，引張強さ試験に加え，GP と表面状態の異なるコンクリートとの界面を SEM による観察も行い，付着強度の向上に寄与する原因の解明も試みた。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

(1) GP モルタル

*1　日本大学　工学部建築学科　准教授　博士(工学)　(正会員)
*2　日本大学　工学部建築学科　客員研究員　博士(学術)　(正会員)
*3　名古屋大学　環境学研究科都市環境学専攻　教授　博士(工学)　(正会員)
*4　京都大学　工学研究科建築学専攻　准教授　博士(工学)　(正会員)

GP モルタルの作製に使用した材料を表−１に示す。FA は JIS A 6201-2008 で規定されるⅡ種灰を使用した。細骨材は珪砂 5 号 (吸水率：0.28 %，粒形：0.5 mm) を使用した。アルカリ活性化剤には，7 M 水酸化ナトリウム溶液 (以下，NA) 及び，JIS K1408-1966 で規定される 1 号水ガラス (SiO_2 : 35-38 %，Na_2O : 17-19 %，以下，WG) の混合溶液を使用した。混和材は，リグニンスルホン酸とポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤を使用した。FA の特性は表−２に示す。

(2) コンクリート

コンクリートの作製に使用した材料を表−３に示す。セメントは JIS R 5210-2009 で規定される普通ポルトランドセメント (以下，OPC) を使用した。,細骨材は福島県須賀川市小倉産砕砂及び，福島県白河市表郷梁森産砕砂 (いずれも寸法：5mm 以下)，粗骨材は福島県いわき市好間町産砕石 (寸法:5～20mm) を使用した。練混ぜ水は水道水，高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸エーテル系を使用した。セメントの特性は表−４に示す。

2.2 GP モルタル並びにコンクリートの練混ぜ

(1) GP モルタル

GP モルタルの調合を表−５に示す。本実験で実施した鉄筋の付着試験並びに各種母材との引張接着強さ試験は，事前に実施した配合設計の段階において，強度・流動性において優れた結果を示した配合でのみ検討することとした。GP は WG 及び NA の比率は 1.25，アルカリ活性化剤及び FA の比率は 47.4 とした。GP モルタルの練混ぜにはホバート型ミキサを用い，FA，細骨材を投入し，180 秒間空練りを行い，あらかじめアルカリ活性化剤と高性能 AE 減水剤を混ぜ合わせた混合溶液を加え，420 秒間練混ぜを行った。練混ぜ後の GP はいずれも 80℃の加熱養生を行い，養生時間は鉄筋の付着試験では 3h (加熱養生後の圧縮強度は，17.0 N/mm^2)，各種異なる母材との引張接着強さ試験では 6h とした (加熱養生後の圧縮強度は，25.0 N/mm^2)。

(2) コンクリート

本論では長期材齢が経過したコンクリートと GP との付着性状について検討することを目的の一つとしている。そこで母材には，打込み後 2 年経過したコンクリートを使用することとした。なお，母材コンクリートの表面処理方法は後述する。コンクリートの調合を表−６に示す。コンクリートは水セメント比を 57.9 %，スランプ値は 18 ±2.5 cm，空気量は 4.5±1.5 % とし，寸法 100×100×375 mm に成形した。成型後のコンクリート躯体は 1d 湿空 [20℃, 90% (RH)] 養生，1d 温水 (70℃) 養生及び 5d 乾燥［20℃, 60% (RH)］ 養生を行い，その後材齢が 2 年経過するまで湿空 [20℃,90% (RH)] 養生を行った。

2.3 母材の被着面の処理

表−１ 使用材料（GP モルタル）

Materials	ID	Class	Density (g/cm^3)
Fly ash	FA	JIS Type Ⅱ	2.3
Fine aggregate	S	Silica sand (No.5)	2.6
Alkaline activator	WG	Water glass	1.7
	NA	7M NaOH	1.2
Admixture	Ad	-	-

表−２ FA の特性

SiO_2 (%)	LOI (%)	Surface area (cm^2 / g)	Active index (%)			Percent Flow (%)
			7d	28d	91d	
65.3	2.0	3630	79	85	104	105

表−３ 使用材料（コンクリート）

Materials	ID	Density (g/cm^3)	Solid volume percentage (%)
OPC	C	3.2	-
Fine *1 aggregate	S1	2.6	2.8
	S2	2.6	2.7
Coarse *1 aggregate	G	2.7	60
Admixture	AE	-	-

*1 Density in saturated surface dry condition

表−４ セメントの特性

Chemical Compositions (%)		LOI (%)	Surface area (cm^2 / g)	Compressive strength (MPa)	
MgO	SO_3			7d	28d
1.5	2.1	2.2	3290	44.1	62.4

表−５ GP モルタルの調合

WG/NA*1 (%)	A/FA*2 (%)	Unit content (kg / m^3				
		FA	S	WG	NA	Ad
1.3	47.4	827	958	218	174	8.3

*1 WG/NA : Water glass / 7M NaOH Ratio
*2 A/FA : Alkaline activator (Water glass + 7M NaOH) / Fly ash ratio

表−６ コンクリートの調合

W/C (%)	Unit content (kg / m^3)					
	C	W	S1	S2	G	Ad
57.9	318	184	433	422	936	3.2

表−７ 母材コンクリートの表面処理状況

ID*1	Grinding	Pre-wetting*2	Alkaline activator coating *3
DN	-	-	-
DG	○	-	-
WN	-	○	-
WG	○	○	-
WNA	-	○	○
WGA	○	○	○

*1 D : Specimen in dry condition. W : Specimen in pre-wetting condition. N : Non-treatment. G : Grinded specimen. A : Specimen coated with alkali activator.
*2 Concretes were kept in water for 48 h before geopolymerization
*3 Alkaline activator : Water glass + 7M NaOH

(1) 型枠鉄板，鉄板

型枠鉄板及び鉄板の被着面処理は，JIS K 6848-1987 を参考にした。すなわち，n-ヘキサンで脱脂後，JIS R 6252-2006 に規定する 240 番の研磨紙で研磨し，アセトン洗

浄により被着面に付着した微細なカスを取り除いた。

(2) コンクリート

表−7に母材コンクリートの表面処理状況をまとめて示す。ここで，DCaroline ら[18]，Momayez ら[19]，Eduardo ら[20]の指摘を踏まえ，我々は予備実験として，表面をワイヤーブラシ及びグラインダー処理を行った後，残存したカスをブロワーとアセトン処理で取り除き，コンクリートと GP モルタルとの引張接着強さ試験を行った。その結果，グラインダー処理の場合で高い付着強さを示した。よって本論では母材コンクリートの表面処理は無処理とグラインダーによる研磨処理の 2 種類とした。

また事前に母材を水中浸漬する方法について効果的とする意見がある反面[18]，明確な違いが確認できないという指摘もあり[18]，統一的な見解がなされていない。そこで本論では，水中浸漬した母材と GP との付着性についても検討した。水中への浸漬時間はコンクリート躯体が完全に吸水する 48 h とし，アルカリ活性化剤を母材表面に塗布することで付着性の向上が認められるかについても検証した。なお，アルカリ活性化剤の塗布量は重量測定せず，目視により同一量塗布することとした。

2.4 供試体概要

(1) 鉄筋の付着試験

図−1に試験体の寸法を示す。試験体は，JCI-SPC15 ポリマーセメントモルタルの鉄筋に対する付着強さ試験方法 (案) に準拠し，作製した。すなわち，鉄筋を中央に設置した型枠 (寸法 150 mm×150 mm×150 mm) に上述した方法で練混ぜを行った GP モルタルを打ち込み，加熱養生を行い，作製した。

(2) 各種異なる母材との引張接着強さ試験

図−2に試験体の寸法を示す。型枠 (寸法 10 mm×100 mm×375 mm) は表面処理を施したコンクリート躯体

$$\tau_b = \frac{P_{\max}}{\phi \cdot L} \qquad (1)$$

ここで，

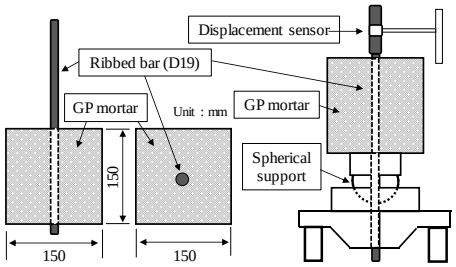
τ_b：付着強さ (N/mm^2)
L ：鉄筋の埋込み長さ (mm)
$P_{\max}$：最大荷重 (N)
ϕ ：鉄筋の周長 (mm)

(寸法 100 mm×100 mm×375 mm) 並びに型枠鉄板，鉄板 (寸法 10 mm×100 mm×400 mm) に養生テープで固定し，試験体は上述した方法で練混ぜを行った GP モルタルを打ち込み，加熱乾燥を行い，作製した。

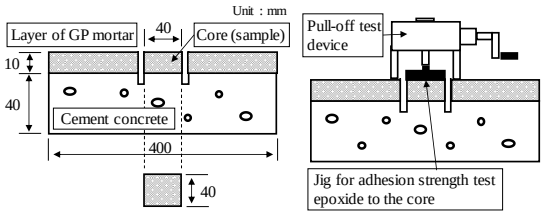
2.5 試験方法

(1) 鉄筋の付着試験

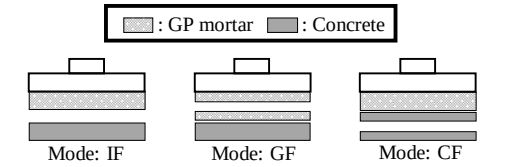
ポリマーセメントモルタルの鉄筋に対する付着強さ試験方法 (案) に準拠し，変位計を用いて各荷重段階における鉄筋の滑り量と最大荷重を測定した。なお，試験体は 3 個とし，付着強度は測定した最大荷重から式 (1) によって算出した。



図−1 試験体断面図及び引張接着強さ試験の状況



図−2 試験体断面図及び引張接着強さ試験の状況



IF : Adhesive failure between and GP mortar and Concrete
GF : Cohesive failure of GP mortar
CF : Cohesive failure in releasing agent

図−3 試験体のタイプ別破壊形態

$$\sigma_a = \frac{P}{A} \qquad (2)$$

ここで，

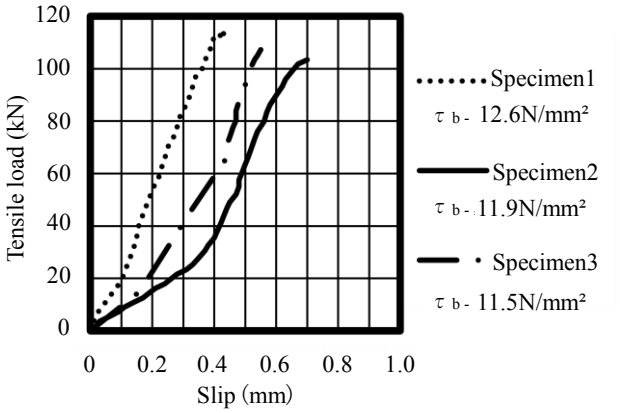
σ_a：接着強さ (N/mm^2)
A ：接着面の断面積 (mm^2)
P ：最大荷重 (N)

(2) 各種異なる母材との引張接着強さ試験

加熱乾燥後の試験体は冷却後，慎重に型枠を取り除き，表面をコンクリートカッターで 40 mm×40 mm×15 mm (型枠鉄板及び鉄板は 40 mm×40 mm×15 mm) に切断し，試験体の表面にエポキシ系接着剤を塗り，上部引張強さ試験用の治具を接着した。なお，試験体は接着剤が完全に硬化するまで，試験室内に静置した。

図−2に引張接着強さ試験の状況を示す。鋼板との引張接着強さは建研式引張試験機を用いて測定した。なお，最大荷重は 3 つの試験体の平均値とし，引張接着強さは最大荷重の平均値から式 (2) によって算出した。

図−3に試験体のタイプ別破壊状況を示す。引張接着強さ試験後の試験体及び母材は，破壊形態に応じて，GP の



図−４ 鉄筋の荷重−滑り曲線と最大付着強さ

接着界面破壊 (IF)，GP の凝集破壊 (GF)，母材の凝集破壊(CF) の 3 種類に分類した。

(3) 接着面の観察

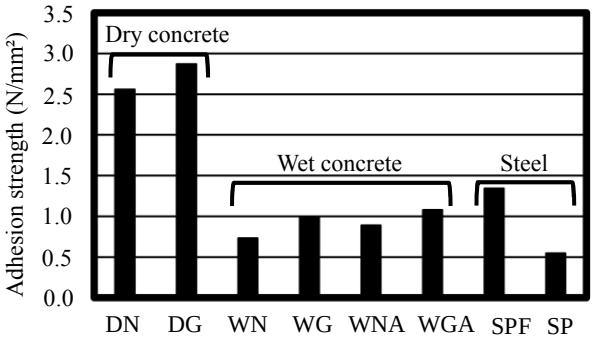
各種試験体について，電界放射型走査電子顕微鏡（FE−SEM) を用いてコンクリート母材と GP モルタルとの接着面の観察を行った。

3. 結果・考察

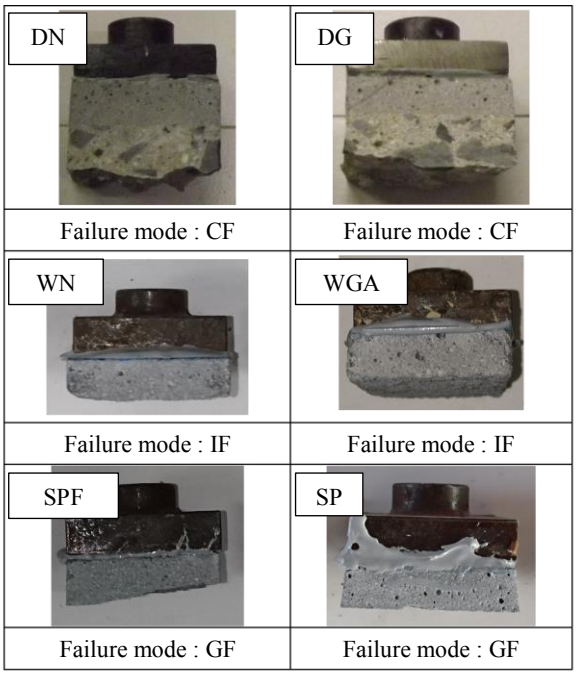
(1) 鉄筋の付着試験

図−４に鉄筋の荷重-すべり曲線と最大付着強さを示す。最大付着強さは 12.6 N/mm^2 を示した Specimen 1 で最も高く，Specimen 3 の 11.5 N/mm^2 が最も低い値であった。また全ての試験体において，すべりの増加に伴い，最大付着強さは低下する傾向を示した。

太田らの GP モルタルと鉄筋との付着特性について研究では，異形鉄筋を使用した場合，セメントモルタルの最大付着強さは 7.1 N/mm^2 であるのに対し，GP モルタルは最大で 14.8 N/mm^2 であり高い付着強さを有すると報告している [21]。さらに太田らは丸鋼においても同様に，GP モルタルはセメントモルタルよりも優れた付着特性を有すると述べている [21]。Yifei らも同様に，異形鉄筋を使用した場合，GP コンクリートはセメントコンクリートよりも優れた付着強度を示し，繊維補強 (当該論文中では鋼繊維を使用) することでより付着強度は向上すると報告している [17]。一方，Arnaud らは，異形鉄筋を使用した場合，GP コンクリートの付着強度は普通コンクリートと比較し，約 10％ 向上したが，リブなしの鉄筋を使用した場合，付着強度は普通コンクリートで高い値を示したと報告している [22]。南らは普通鉄筋を使用した場合，普通コンクリートと GP コンクリートの最大付着強さはほぼ同等であると報告しており [23]，GP と各種鉄筋との付着強さに関して，現在統一的な見解はなされておらず，今後，GP と鉄筋との付着特性の解明に向けて，配合，養生条件，鉄筋の種類等を変えた詳細な検討を行う必要がある。例えば，Silva らのように組成を種々変化させた実験 [24]，さらに長友らの報告 [25]のように，横ふしを 1 個のみ有する異形鉄筋を使用し，ふし全面の角度，ふしの高さ，載荷端からふしまでの距離等の違いが GP モルタルとの付着性状に与える影響について圧縮強度を中心に検討するのも一つの有効な方法であると言える。



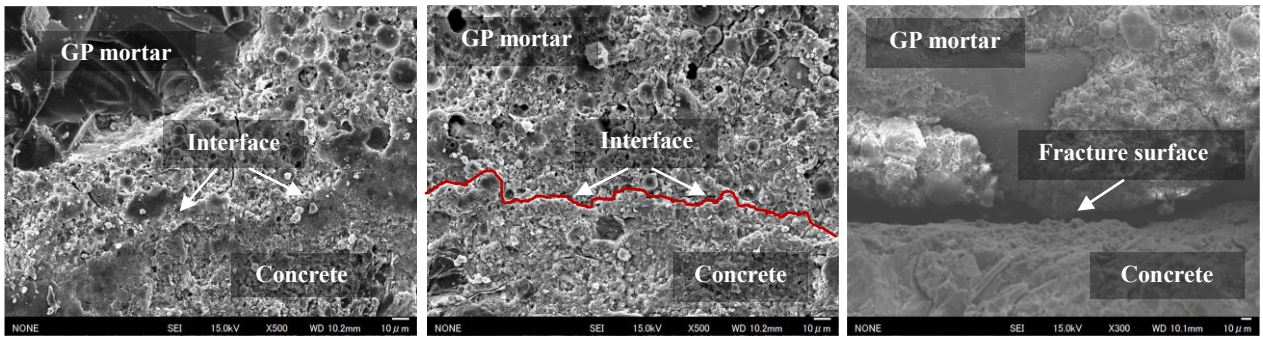
図−５ 各種異なる母材との引張接着強さ試験結果



図−６ 試験体の破壊状況（引張強度試験）

(2) 各種異なる母材との引張接着強さ試験

図−５に各種異なる母材との引張接着強さ試験結果を示す。なお，SPF 及び SP はそれぞれ型枠鉄板と鉄板である。母材にコンクリートを使用した場合，引張接着強さは 2.86 N/mm^2 を示した DG で最も高く，WN の 0.73 N/mm^2 が最も低い値であった。また全ての試験体において，グラインダー処理を施すことで，引張接着強さは向上した。鉄板を使用した場合，引張強度は SPF で特に高く，1.34 N/mm^2 であった。Momayez らは母材に 28d 強度 35 N/mm^2 の表面状態が異なるコンクリートと 28d 強度 35 N/mm^2 のセメント系補修材との引張接着強さ試験を行い，引張強さは 1.32 N/mm^2 であると報告している [19]。また，Eduardo らは，異なる表面処理を施したコンク



（1）DG　　（2）DN　　（3）WGA

図-7 GP モルタルとコンクリートの界面及び被着面の SEM 写真

リート母材 (強度約 50 MPa) とコンクリート (強度約 46 MPa) との引張接着強さ試験を行い，特にサンドブラスティング処理を施すことで引張強度は 2.65 MPa と高い値を示したと報告している[20]。本論で使用した母材の配合や表面処理方法，試験体の寸法等は上述した報告とは異なるため，厳密な比較はできない。しかし，同一の試験方法で実施しており，強度には相関性があると仮定した場合，本論で得られた GP の引張接着強さは最大 2.86 N/mm^2 であり，Momayez ら[19]，Eduardo ら[20]の研究報告における引張接着強さの結果と比較した場合，最も高い値を示したことから，GP はコンクリートにおいても付着性に優れていると言える。

図-６に試験体の破壊状況を示す。引張接着強さの高い DN, DG はいずれもコンクリートの凝集破壊が生じており，SP，SPF はいずれも GP の凝集破壊が生じていた。一方，W シリーズはいずれの試験体においても接着界面破壊が生じていた。

(3) 接着面の観察

図-７ GP モルタルとコンクリートの界面及び被着面の SEM 写真を示す。最も高い引張接着強さを示した DG は GP モルタルとコンクリートの境界がはっきりと確認できないくらい密着していることがわかる。次いで引張接着強さの高い DN は，DG には及ばないものの，GP とコンクリートの境界においてに付着していることがわかる。一方，WGA は，GP モルタルとコンクリートの接着面に空間があり，完全に付着していないことが確認できる。これは，母材コンクリートの表層に多量の水が存在する場合，GP と母材コンクリートとの界面近傍の水量が増加することにより，GP のアルカリ濃度は低下し，結果，引張接着強さの低下並びに接着界面破壊が生じたと考えられる。

また，DN，DG の引張接着強さが W シリーズと比較し，向上した理由について，Zhang ら，Tanakorn らは，GP に含まれる Si^{4+} や Al^{3+} がコンクリート表層の $Ca(OH)_2$ と反応することで，カルシウムケイ酸塩水和物 (CASH gel) が増加し，結果，界面の高密度化や高強度化が生じると述べている[16)26)]。本論でも Zhang ら，Tanakorn らの報告と同様に，DN 及び DG が高い接着強さを示した理由は，GP モルタルとコンクリートとの界面に Ca を含有する CASH gel が生じたためと考えられる。

4. まとめ

本論では，各種異なる表面処理を施したコンクリートと鉄板，鉄筋を使用し，加熱養生を行った GP との付着性状について検討した。。以下に得られた知見を記す。

1) GP モルタルとコンクリートとの引張接着強さの向上には，母材を水中浸漬せず，表面をグラインダー処理することが有効であった。
2) 母材コンクリートの表層に多量の水が存在する場合，界面近傍の水量が増加することにより，GP のアルカリ濃度は低下し，結果，引張接着強さの低下に繋がる。

謝辞

本研究は，科学研究補助金・基盤研究 (A) (課題番号：16H02376，代表者：荒木慶一) による助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) D. R. Morgan, Compatibility of concrete repair materials and systems, Construction and Building Materials, Vol.10, No.1, pp.57-67, 1996
2) Tianming Gao, Lei Shen, Ming Shen, Litao Liu, Fengnan Chen, Analysis of material flow and consumption in cement production, Journal of Cleaner Production, Vol.112, No.1, pp.553-556, Jun.2016
3) J. Davidovits, GEOPOLYMERS Inorganic polymeric new materials, Journal of Thermal Analysis, Vol.37, No.8, pp.1633-1656, 1991
4) Xiaolu Guo, Huisheng Shi, Warren A. Dick, Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer, Cement & Concrete Composites, Vol.32, No.2, pp.142-147, Feb.2010
5) Jae Eun Oh, Paulo J. M. Monteiro, Ssang Sun Jun, Sejin

Choi, Simon M. Clark, The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers, Cement and Concrete Research, Vol.40, No.2, pp.189-196, Feb.2010

6) Keun-Hyeok Yang, Jin-Kyu Song, Keum-ll Song, Assessment of CO_2 reduction of alkali-activated concrete, Journal of Cleaner Production, Vol.39, pp.265-272, Jan.2013

7) A. Fernandez-Jimenez, I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials, Journal of Materials Science, Vol.42, No.9 pp.3055-3065, May.2007

8) T. Bakharev, Resistance of geopolymer materials to acid attack, Cement and Concrete Research, Vol.35, No.4, pp.658-670, Apr.2005

9) T. W. Cheng, J. P. Chiu, Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, Minerals Engineering, Vol.16, No.3, pp.205-210, Mar.2003

10) Zuhua Zhang, Xiao Yao, Huajun Zhu, Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete II. Microstructure and anticorrosion mechanism, Applied Clay Science, Vol. 49, No.1-2, pp.7-12, Jun.2010

11) 五十嵐祐太, Sanjay PAREEK, インド産及び日本産FA を用いたジオポリマー硬化体の養生条件及びスラグ置換率が圧縮強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1885-1890, July.2015

12) 五十嵐祐太, Sanjay PAREEK, フライアッシュおよび電気炉酸化スラグを使用したジオポリマーモルタルにおける高濃度塩酸溶液に対する抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2319-2324, July.2016

13) 鹿島大雄, Sanjay PAREEK, 丸山一平, 荒木慶一, 各種離型剤によるジオポリマーモルタルと鋼板の剥離性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1351-1356, July.2017

14) Fernando Pacheco-Torgal, J. P. Castro-Gomes, Said Jalali, Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment, Construction and Building Materials, Vol.22, No.3, pp.154-161, Mar. 2008

15) Smith Songpiriyakij, Tawich Pulngern, Pompong Pungpremtrakul, Chai Jaturapitakkul, Anchorage of steel bars in concrete by geopolymer paste, Materials and Design, Vol.32, No.5, pp.3021-3028, May. 2011

16) Tanakorn Phoo-ngernkham, Vanchai Sata, Sakonwan Hanjitsuwan, Charoenchai Ridtirud, Shigemitsu Hatanaka, Prinya Chindaprasirt, High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair materials, Construction and Building Materials, Vol.98, pp.482-488, Nov. 2015

17) Yifei Cui, Obada Kayali, Tiejun Zhao and Chunwei Zhang, Bond Strength of Steel Bar and Plain of Fiber Reinforced Geopolymer Concrete, The 2017 World Congress on Advances in Structure Engineering and mechanics (ASEM17), 2017

18) Caroline Talbot, Michel Pigeon, Denis Beaupre and D. R. Morgan, Influence of Surface Preparation on Long-Term Bonding of Shotcrete, ACI Materials Journal, Vol.91, No.6, pp.560-566, Nov-Dec. 1994

19) A. Momayez, M. R. Ehsani, A. A. Ramezanianpour, H. Rajaie, Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials, Cement and Concrete Research, Vol.35, No.4, pp.748-757, Apr. 2005

20) Eduardo N. B. S. Julio, Fernando A. B. Branco, Vitor D. Silva, Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface, Construction and Building Materials, Vol.18, No.9, pp.675-681, Nov. 2004

21) 太田周, 佐川康貴, 原田耕司, 西崎丈能, ジオポリマーモルタルと鉄筋の付着特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2313-2318, July.2016

22) Arnaud Castel, Stephen J. Foster, Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement, Cement and Concrete Research, Vol.72, pp.48-53, Jun. 2015

23) 南浩輔, 松林卓, 梶田秀幸, 佐藤隆恒, ジオポリマーコンクリートの構造利用に関する基礎的研究, 「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム, pp.99-102, Jun. 2016

24) Pre De Silva, Kwesi Sagoe-Crenstil, Medium-term phase stability of Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O geopolymer systems, Cement and Concrete Research, Vol.38, No.6, pp.870-876, Jun. 2008

25) 長友克寛, 角徹三, 横ふし 1 個のみをもつ異形鉄筋の付着特性に関する研究, 土木学会論文集, vol.1986, No.372, pp.177-186, Aug. 1986

26) Zuhua Zhang, Xiao Yao, Huajun Zhu, Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete 1. Basic properties, Applied Clay Science, Vol. 49, No.1-2, pp.1-6, Jun. 2010