

論文 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

鹿島 大雄*1・Sanjay PAREEK*2・丸山一平*3・荒木慶一*4

要旨: 本論では、各種 27 種類の離型剤を使用し、ジオポリマーモルタルと鋼板の剥離性状に関する検討を行い、使用する離型剤の違いがジオポリマーモルタルと鋼板との剥離性状に与える影響について、引張接着強さ試験、鋼板へのジオポリマーモルタル付着量及び目視による試験体の破壊状況によって評価した。その結果、塗膜系離型剤を使用した場合、引張接着強さはそれ以外の離型剤を使用した場合と比較し、すべてにおいて低い値を示し、引張接着強さと鋼板へのジオポリマーモルタル付着量には高い相関関係が認められた。

キーワード: 離型剤, ジオポリマーモルタル, 剥離性状, 引張接着強さ

1. はじめに

近年、各産業における二酸化炭素排出量削減が地球温暖化対策として国際的に重要な課題となっている。このような社会的背景の下で、環境配慮型の新たな建築材料として、アルミナシリカ粉末とアルカリシリカ溶液との重縮合反応で生成する硬化体が注目されている。この硬化体は Geopolymer 又は Alkali activated materials (AAM) と呼ばれているが、両者に明確な定義はなく、現在、硬化機構を含む詳細な検討が行われている¹⁾。本論ではこの硬化体を Geopolymer (以下、GP と記す) と表記する。

GP は、セメントを使用せず、フライアッシュやスラグ等の廃棄物を原料として大量に利用することができ、一般的な建築材料として使用されているコンクリートと比較し、二酸化炭素排出量を最大で 2 割程度まで低減できることが指摘されており²⁾、約 80MPa の高強度も実現できる他、高い耐熱性を有するという特徴を持つ³⁾。更に、酸性溶液に対する化学薬品性や乾燥収縮等に対する耐性が極めて優れており、これまでコンクリートが使用できなかった環境下への適用範囲の拡大が期待されている⁴⁾。

一方、GP は比較的新しい材料であるため、GP を構造物の部材として利用するための研究報告例は限られており、実用化もまくらぎなどの軌道部材に限定されている⁵⁾。更に GP には、一般的なセメント・コンクリート分野で使用されている空気量や流動性等を調整する混和剤が適用できないことに加え、一般的なコンクリート用の「型枠離型剤」が使用できない事例も報告されている⁶⁾。しかし、GP に適した混和剤及び離型剤に関する詳細な研究は行われていない。

著者らはこれまで、GP の離型剤としてパラフィン

表-1 使用材料

Type	Class	Density (g/cm ³)
Fly ash	JIS Type II	2.3
Fine aggregate	Silica sand (No.5)	2.6
Alkaline activator	Water glass	1.7
	7M NaOH	1.2

表-2 フライアッシュ及び珪砂の特性

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	LOI (%)	Surface area (cm ² / g)
Fly ash	64.5	23.9	4.8	5.3	2.1	3880
Silica sand	95.5	3.1	0.1	0.4	0.1	-

使用しているが、このパラフィン部材の離型剤に適用する場合、鋼製型枠から GP を脱型することが困難かつ、常温で固体であるため、作業性が悪いという問題がある。このことから、GP を建築構造物の部材として実用化するためには、離型性に優れ、作業性が高い離型剤が必要であることがわかる。

以上のことを踏まえ本論では、GP を建築構造物の部材として実用化するために、多種の離型剤を用い、GP モルタルと鋼板との剥離性状に関する検討を行った。剥離性状は、建研式引張試験機を用いた引張接着強さ試験、鋼板への GP モルタル付着量及び、目視による試験体の破壊状況によって評価した。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

(1) フライアッシュ, 細骨材, アルカリ活性化剤

本研究の使用材料を表-1に示す。フライアッシュは JIS A 6201-2008 で規定される II 種灰を使用した。細骨材

*1 日本大学 工学部建築学科 客員研究員 博士(学術) (正会員)

*2 日本大学 工学部建築学科 准教授 博士(工学) (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)

は珪砂 5 号(吸水率：0.28%，粒形：0.5mm)，アルカリ活性化剤には 7M 水酸化ナトリウム溶液及び，JIS K 1408-1966 で規定される 1 号水ガラス(SiO₂：35-38%，Na₂O：17-19%)を使用した。フライアッシュ，珪砂の特性は表-2 に示す。

(2) 離型剤

使用した離型剤及び物性を表-3 に示す。本研究では，鉱油系離型剤は 11 種類，ワックス系離型剤は 4 種類，灯油系，シリコーン油系及び植物油系離型剤はそれぞれ 1 種類，塗膜系離型剤は 9 種類，合計 27 種類の離型剤を使用した。なお，本研究で使用した離型剤には，現在開発中のものも含まれており，密度，動粘度が不明なものもある。

2.2 GP モルタルの作製

GP モルタルの調合を表-4 に示す。GP の調合は水ガラス及び水酸化ナトリウムの比率 1.25，アルカリ活性化剤及びフライアッシュの比率は 47.4 とした。

GP モルタルの練り混ぜにはホバート型ミキサーを用い，フライアッシュ，細骨材を投入し，180 秒間空練りを行い，あらかじめ水ガラスと 7M NaOH を混ぜ合わせたアルカリ活性化剤を加え，300 秒間練り混ぜを行った。

2.3 鋼板の被着面の処理

鋼板の被着面処理は，JIS K 6848-1987 を参考にした。すなわち，ノルマルヘキサンの脱脂後，JIS R 6252-2006 に規定する 240 番の研磨紙で研磨し，アセトンで洗浄した。

2.4 GP モルタルの打ち込み

型枠の寸法は JIS A 1171-2000 に従い，内のり寸法は 40×40×10 mm とした。型枠は円形の鋼板にマスキングテープで固定し，型枠の中央に表-3 に示す離型剤を塗布した。なお，鋼板に塗布する離型剤は，鉱油系，ワックス系，灯油系，シリコーン系及び植物油系では試験後，型枠及び GP モルタルの被着面に付着するため，重量測定は行わず，目視により同一量塗布することとした。塗膜系では，鋼板に塗布する離型剤は重量測定し，全て 0.41g に統一した。

次に作製した GP モルタルを型枠の中央に流し込み，一層で詰め，表面をへらで均一にした後，5 秒間テーブルバイブレータによって鋼板を振動させ，GP モルタルを締め固め，80℃，6 時間の加熱養生を行った。

2.5 接着強さ試験用供試体の作製

図-1 に試験体断面図及び引張接着強さ試験の詳細を示す。試験体の寸法は JIS A 1171-2000 に従った。加熱養生後の試験体は冷却後，慎重に型枠を取り除き，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する。なお，試験体は接着剤が完全に硬化

表-3 使用した離型剤及び物性

No	Type	Main component	Density (g/cm ³)	Viscosity (mm ² /s)
1	No releasing agent (Control)			
2	Mineral oil	Petroleum hydrocarbon	0.86-0.88	-
3			0.83-0.87	10.0±2.0
4			-	11.0
5			0.86-0.90	18.0
6			0.85-0.95	10.0-15.0
7			0.85-0.95	6.5-7.2
8			0.82-0.84	5.4-5.6
9			0.84	4.5
10			0.90	8.76
11			0.82	-
12			0.90-0.92	10.0-14.0
13	Wax	Paraffin	Solid	
14		Petroleum hydrocarbon	0.8	-
15		Aliphatic hydrocarbon	0.78-0.82	1.5-2.5
16		Petrolatum	0.90	-
17	Kerosene	Petroleum hydrocarbon	-	-
18	Silicon oil	Dimethyl silicone	-	-
19	Vegetable oil	Soybean oil	-	-
20	Coating film	Polyester resin	-	-
21		Polyethylene wax	-	-
22		Oxidized polyethylene wax	-	-
23		Polyethylene wax	-	-
24		Aliphatic hydrocarbon	-	-
25		Paraffin	-	-
26		Boron	-	-
27		Teflon	-	-
28		Organic solvent	-	-

表-4 GP モルタルの調合

W/NaOH	A/F	Fly ash	Silica sand	Water glass	7M NaOH
		(By Wt. %)			
1.25	47.4	38	44	10	8

*1 W/NaOH：Water glass / 7M NaOH Ratio

*2 A/F：Alkaline activator (Water glass / 7M NaOH) / Fly ash ratio

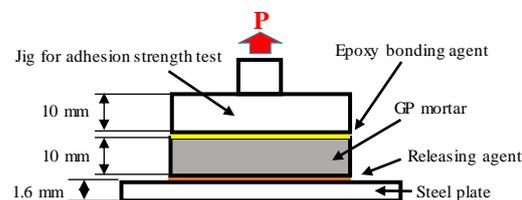


図-1 試験体断面図及び引張接着強さ試験の詳細

するまで，試験室内に静置する。

2.6 試験方法

(1) 引張接着強さ試験

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する。ここで，最大荷重は 3 つの試験体の平均値とした。引張接着強さは測定した最大荷重から式 (1) によって算出した。

$$\sigma_a = \frac{P}{A} \quad (1)$$

ここで、

- σ_a : 接着強さ (N/mm²)
- A : 接着面の断面積 (mm²)
- P : 最大荷重 (N)

(2) 鋼板への GP モルタル付着量の測定

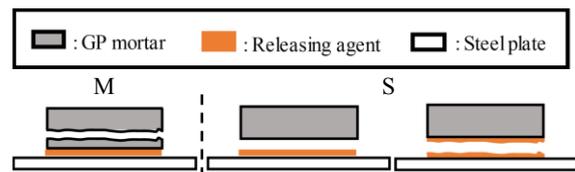
鋼板に付着した GP モルタル量は、引張接着強さ試験の前後の重量変化から算出した。なお、塗膜系離型剤を除く鋼板に付着した余分な離型剤は、引張接着強さ試験後、鋼板を n-ヘキサンでふき取り、重量測定を行った。

(3) 目視による試験体の破壊状況による評価

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鋼板は、破壊状況に応じて、GP モルタルの凝集破壊 (M) と離型剤と GP モルタルの界面破壊及び離型剤の凝集破壊 (S) の 2 つのタイプに分類し、目視によって M と S の面積比の全体合計得点が 10 となるよう、評価した。なお、試験体の破壊状況の評価した得点は、3 つの試験体の平均値とし、小数点以下第一位までの値として算出した。



図-2 引張接着強さ試験の状況



- M : Cohesive failure of GP mortar
- S : Adhesive failure between releasing agent and GP mortar or Cohesive failure in releasing agent

図-3 試験体のタイプ別破壊状況

3. 実験結果及び考察

3.1 引張接着強さ試験

表-5 に各種試験結果のまとめを示す。ここで、表-5 の試験体 (Sample No.1-28) で使用した離型剤は表-3 の No.1-28 と一致しており、Sample No.1 は離型剤を塗布していない試験体である。

鉱油系の離型剤を使用した試験体の引張接着強さについては、試験体 2, 7, 9 及び 11 で高い値を示し、試験体 4 で最も低い値を示した。また表-3 より、試験体 8 を除いて、粘度が 8.0 以上の離型剤を使用した試験体の引張接着強さは、粘度が 8.0 未満の離型剤のそれと比較し、低い値となる傾向を示した。ワックス系については、試験体 14 で高い値を示し、試験体 16 で低い値を示した。同様に灯油系の離型剤においては、引張接着強さは 0.048 N/mm² と低い値を示したが、シリコン油系及び植物油系においては、いずれも引張接着強さは約 0.1 N/mm² 以上であり、比較的高い値を示した。一方、塗膜系の離型剤を使用した試験体の引張接着強さは、試験体 1-19 までと異なり、大きく低下し、特に試験体 28 で最も低い値を示した。

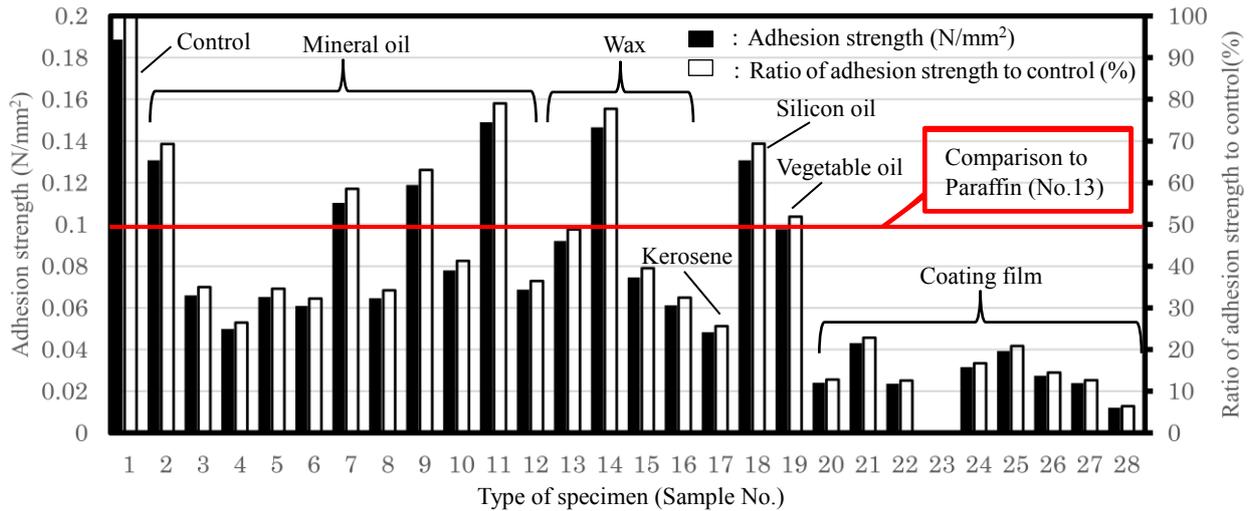
図-4 に接着強さ試験と剥離指数の結果を示す。ここで、剥離指数は試験体 1 の引張接着強さを 100 とした際の各種試験体の引張接着強さの相対値である。試験体 13 で使用した離型剤はパラフィンであるが、このパラフィンは、GP モルタルの離型剤として部材に使用し

表-5 各種試験結果のまとめ

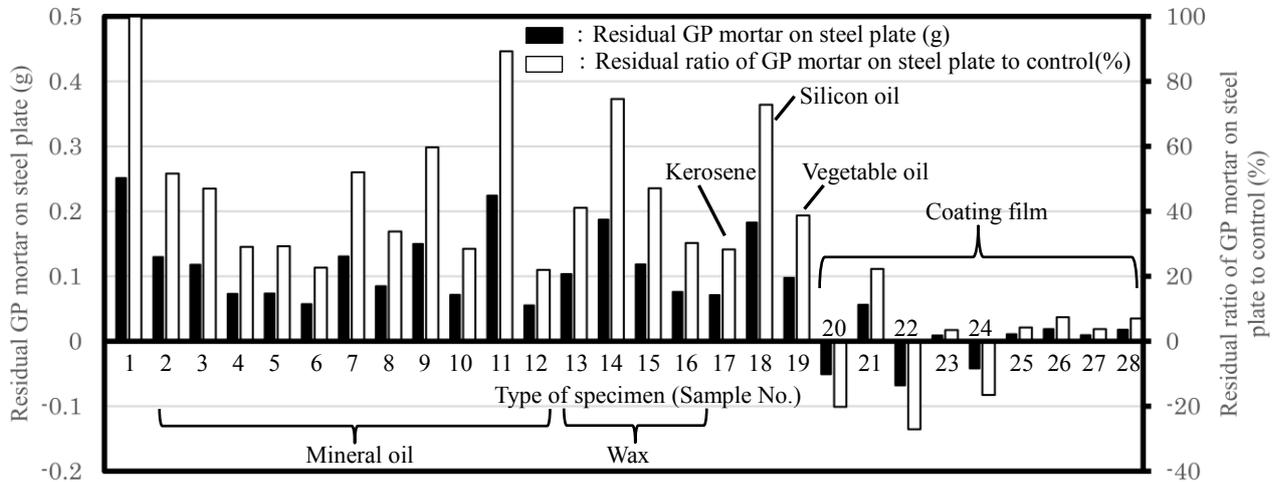
Type of specimen (Sample No.)	Type *1	Adhesion strength (N/mm ²)	Residual GP mortar on steel plate (g)	Failure Modes *2	
				M	S
1	Co	0.189	0.251	10	0
2	M	0.131	0.130	8.2	1.8
3		0.066	0.118	6.7	3.3
4		0.050	0.073	0.7	9.3
5		0.065	0.074	7.3	2.7
6		0.061	0.057	1.7	8.3
7		0.110	0.131	4.7	5.3
8		0.065	0.085	5.7	4.3
9		0.119	0.150	9.2	0.8
10		0.078	0.072	8.0	2.0
11		0.149	0.224	10	0
12		0.069	0.055	4.8	5.2
13	W	0.092	0.103	0	10
14		0.147	0.187	10	0
15		0.075	0.118	4.3	5.7
16		0.061	0.076	8.3	1.7
17	K	0.048	0.071	7.0	3.0
18	S	0.131	0.183	9.0	1.0
19	V	0.098	0.097	8.0	2.0
20	CF	0.024	-0.051	6.7	3.3
21		0.043	0.056	0	10
22		0.024	-0.068	0	10
23		-	0.009	0	10
24		0.032	-0.042	0	10
25		0.039	0.011	2.7	7.3
26		0.027	0.019	0	10
27		0.024	0.009	0	10
28		0.012	0.018	0	10

*1 : Co (Control), M (Mineral oil), W (Wax), K (Kerosene), S (Silicon oil), V (Vegetable oil), CF (Coating film)

*2 : M (Cohesive failure of GP mortar)
S (Adhesive failure between releasing agent and GP mortar or Cohesive failure in releasing agent)



図—4 引張接着強さ試験と剥離指数の結果



図—5 鋼板への GP モルタル付着量と GP モルタル付着指数の結果

た場合、鋼製型枠から GP モルタルを脱型することが困難である。よって、パラフィンの剥離指数を基準として、それ以下の値を示した離型剤は、引張接着強さ試験のみの結果から評価した場合、剥離性良好であると判断した。その結果、鉱油系離型剤では 7 種類、ワックス系では 2 種類、灯油系、塗膜系離型剤においては全ての試験体が剥離性良好であった。なお、試験体 23 は型枠を取り外す段階で試験体が鋼板から剥離したため、引張接着強さの測定は行っていないが、試験体が鋼板から型枠と同時に剥離したことから、試験体 23 で使用した離型剤が剥離性能の面において、最も優れていると言える。

3.2 鋼板への GP モルタル付着量の測定

図-5 に鋼板への GP モルタル付着量と GP モルタル付着指数の結果を示す。ここで、GP モルタル付着指数は試験体 1 の鋼板への GP モルタル付着量を 100 とした際の各種試験体の相対値である。鉱油系の離型剤を使用した際の鋼板への GP モルタル付着量については、試験体 2, 3, 7, 9 及び 11 で高い値を示し、それ以外の試験体はい

ずれも低い値を示した。同様にワックス系については、試験体 14 で高い値を示し、試験体 16 で低い値を示した。灯油系、植物油系の離型剤においては、低い値を示したものの、シリコン油系では高い値を示した。一方、塗膜系の離型剤を使用した試験体の鋼板への GP モルタル付着量は、試験体 1-19 までと異なり、大きく低下し、中にはマイナスの値を示す試験体も存在した。

図-6 に引張接着強さ試験後の鋼板及び試験体の被着面の外観を示す。引張接着強さと鋼板への GP モルタル付着量の高い試験体 1, 2, 11, 14 及び 19 では、鋼板の全面に GP モルタルが付着しており、被着面に大小様々な気泡や亀裂が確認できる。引張接着強さと鋼板への GP モルタル付着量の低い試験体 4, 16 及び 17 は、鋼板の全面に GP モルタルが付着しているものの、付着量は少ないことがわかる。同様に塗膜系離型剤を使用した試験体 22, 23, 27 及び 28 では、鋼板に GP モルタルは付着しておらず、試験体の被着面に気泡も少なく、滑らかであることが確認できる。加えて試験体 22 では、試験体の被着

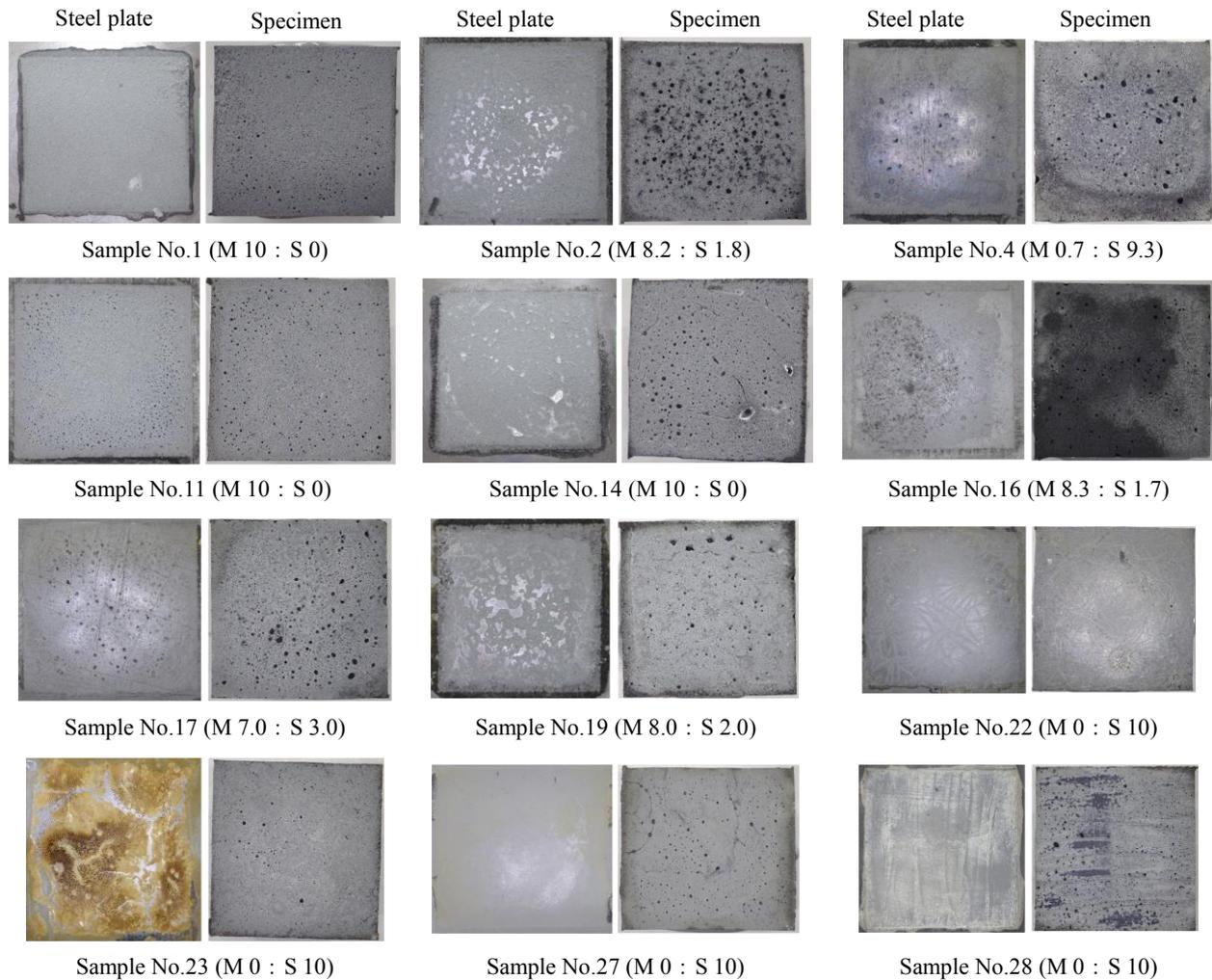


図-6 引張接着強さ試験後の鋼板及び試験体の被着面の外観

面に離型剤が付着していることが確認できる。これが鋼板への GP モルタル付着量がマイナスとなった主因であると考えられる。

図-7 に引張接着強さと鋼板への GP モルタル付着量との相関を示す。この結果から、引張接着強さと鋼板に付着した GP モルタル量には高い相関があり、鋼板への GP モルタルの付着量の増加に比例し、引張接着強さは上昇することが明らかとなった。つまり、剥離性能が高い離型剤ほど、引張接着強さ及び鋼板への GP モルタル付着量は減少する。

3.3 目視による試験体の破壊状況による評価

図-8 に目視による試験体の破壊状況の比較、図-9 に引張接着強さと目視による試験体の破壊状況との相関、図-10 に鋼板への GP モルタル付着量と目視による試験体の破壊状況との相関を示す。この結果から、GP モルタルの凝集破壊の割合が高くなるに従い、引張接着強さ及び鋼板への GP モルタル付着量も向上する傾向が認められた。以上の結果を踏まえ GP モルタルには、塗膜系離型剤のような、あらかじめ鋼板に塗布することで試験体の被着面と鋼板との間に塗膜を形成し、物理的に鋼板

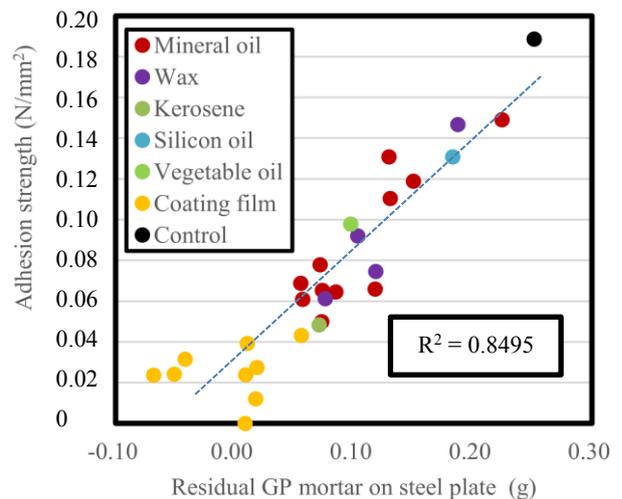
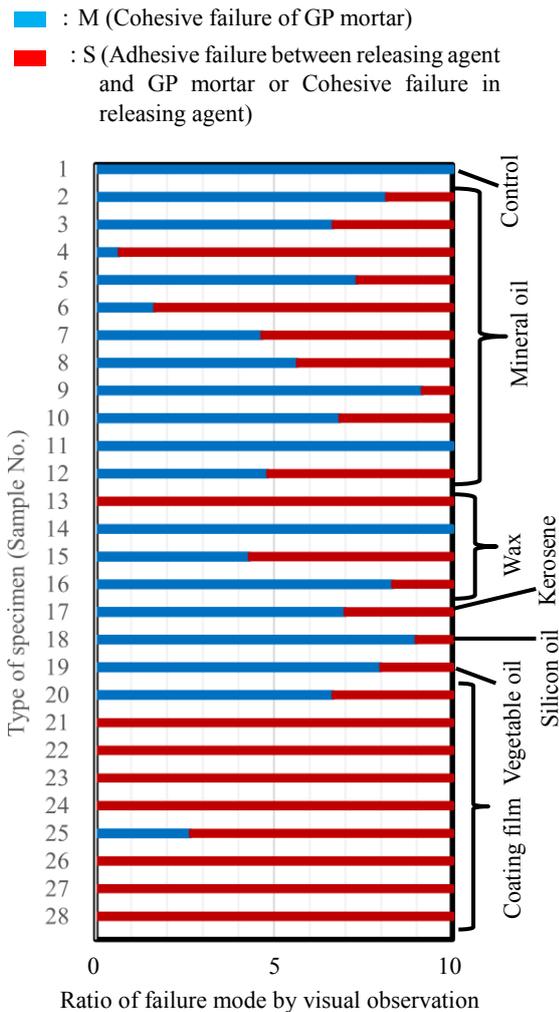


図-7 引張接着強さと鋼板への GP モルタル付着量との相関

と GP モルタルとの接着を阻害する離型剤が最適であると言える。さらに塗膜系離型剤はいずれも常温で液体であるため、固形のパラフィンと比較し、効率的に鋼板に塗布でき、作業性の向上が認められた。



図—8 目視による試験体の破壊状況の比較

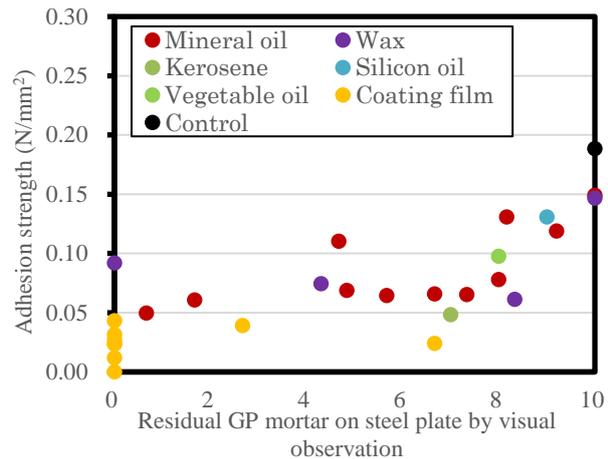
4. まとめ

本論では多種の離型剤を用い、GP モルタルと鋼板との剥離性状に関する検討を行った。以下に得られた知見を記す。

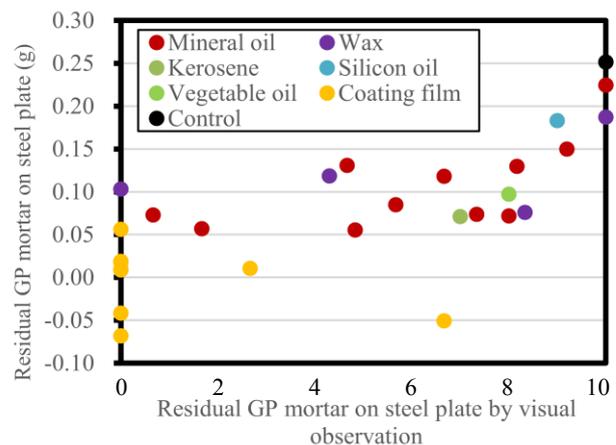
- 1) 離型剤として塗膜系を使用した場合、引張接着強さはそれ以外の離型剤を使用した場合と比較し、すべてにおいて低い値を示した。
- 2) 引張接着強さと鋼板への GP モルタル付着量には高い相関が認められ、引張接着強さに比例し、鋼板への GP モルタル付着量は増加した。
- 3) GP モルタルには、塗膜系離型剤のような、鋼板との接着を物理的に阻害することができる離型剤が適していることが明らかとなった。

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。



図—9 引張接着強さと目視による試験体の破壊状況との相関



図—10 鋼板への GP モルタル付着量と目視による試験体の破壊状況との相関

参考文献

- 1) 李柱国, ジオポリマーおよびその建材分野における実用化に向けて その 1, 硬化機構および反応生成物, 建材試験情報, Vol.53, pp.2-7, 2016.9
- 2) 相原直樹, 辻村太郎, 上原元樹, 土屋広志, 鉄道用材料の LCA による環境評価, 鉄道総研報告, Vol.23, No.6, pp.5-10, 2009. 6
- 3) T. W. Cheng, J. P. Chiu, Fire-resistant geopolymers produced by granulated blast furnace slag, Minerals Engineering, Vol.16, No.3, pp.205-210, March. 2003
- 4) 原田耕司, 一宮一夫, 津郷俊二, 池田攻, ジオポリマーモルタルの耐久性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011. 7
- 5) 上原元樹, 佐藤隆恒, ジオポリマー法による繊維補強短まくらぎの試作, 鉄道総研報告, Vol.28, No.2, pp.11-16, 2014. 2
- 6) 上原元樹, 佐藤隆恒, ジオポリマー法でコンクリートの環境負荷を低減する, Railway Research Review, Vol.68, No.11, pp.10-13, 2011. 11