

引抜き試験による各種鉄筋とジオポリマーコンクリートとの付着強度

前田建設工業(株) 正会員 ○南 浩輔 正会員 松林 卓
梶田 秀幸 正会員 舟橋 政司

1. はじめに

石炭火力発電所から排出される石炭灰や製鉄所から排出される高炉スラグ等の産業副産物は、資源小国である我が国において有用な資源として捉えられ、3R 活動（発生抑制・再利用・再生利用）の推進は極めて重要となる。しかし、産業副産物の資源化から利活用に至る過程において、適用先や利用方法の拡大など多くの課題が残されていることも事実である。

ジオポリマー法（以下、ジオポリマーを GP と記す）による硬化体は、フライアッシュ（以下、FA と記す）や高炉スラグ（以下、BS と記す）などの非晶質粉体とケイ酸アルカリ溶液（以下、ASS と記す）との反応により、ゼオライト類似の非晶質ポリマーが生じて硬化したものである（写真 1）。GP 硬化体は産業副産物を大量に使用でき、かつ一般的なコンクリートと比較して 80%もの CO₂削減を可能とする材料として注目されている。近年、基礎理論や実用化に向けた研究^{1)~5)}が行われているが、基礎的な物性を含めその諸性状は未だ明らかになっていないと言いき難い。本稿では、構造利用に向け GP コンクリートの基礎物性の取得を目的とした、各種鉄筋と GP コンクリートとの付着強度について報告する。

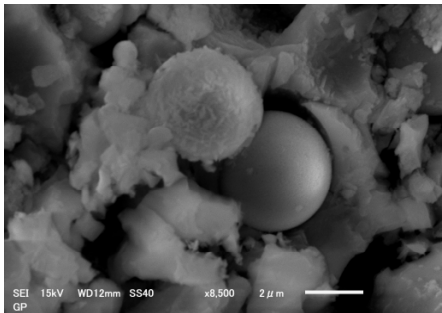


写真1 GP コンクリートの SEM 像(×8,500 倍)

2. GP配合の考え方

GP 配合は、ASS 溶液に含まれるアルカリ成分と水の比（モル比）（以下、AL/W と記す）や、Si 成分とアルカリ成分の比（モル比）（以下、Si/AL と記す）、単位溶

液量、単位粉体量、単位粗骨材量から決定される。

3. 試験概要

GP コンクリートの付着強度を把握するため、引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法（案）（JSCE-G503-2013）に準じ、各種鉄筋 D25（普通鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋（以下、エポ鉄筋と記す）、高付着エポキシ樹脂塗装鉄筋（以下、高付着エポ鉄筋と記す）の 3 種類）との付着強度を確認した。比較用として普通鉄筋を用いたケースのみ、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート（以下、N コンクリートと記す）による引抜き試験を実施した。GP コンクリートならびに N コンクリートの基準圧縮強度は 50N/mm² とし、付着応力度の算定は式(1)に基づいて行った。

$$\tau = P / 4 \pi D^2 \times \alpha \tag{1}$$

ここに、
τ：付着応力度（N/mm²）
P：引張荷重（N）
D：鉄筋の直径（mm）
α：各コンクリートの圧縮強度に対する補正係数
α=50/f'c
f'c：同時に作製した円柱供試体の試験日材齢における圧縮強度（N/mm²）

4. 供試体作製

GP コンクリートおよび N コンクリート供試体(□150×150×150mm)の作製に際しては、骨材（細骨材・粗骨材）は同じ材料を用いた。使用材料は、粗骨材に硬質砂岩碎石 2010（絶乾密度：2.70g/cm³）および硬質砂岩碎石 1305（絶乾密度：2.71g/cm³）を、細骨材として珪砂（絶乾密度：2.60g/cm³）を用いた。また、GP コンクリートには、非晶質粉体として FA（JIS II 種、密度：2.23g/cm³）および BS（比表面積：4000cm²/g、密度：2.89g/cm³）を、ASS 溶液には水ガラス、水酸化カリウムと蒸留水を所定の濃度で混合したものを用いた。N コンクリートは、固化材として普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³）を用いた。なお、GP コンクリート

表1 各コンクリートの配合および試験結果

項目	AL/W (-)	Si/AL (-)	単位量 (kg/m ³)							試験結果			
			ASS	FA +BS	S	G1	G2	A1	A3	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	圧縮σ1 (N/mm ²)	引張σ1 (N/mm ²)
GP コンクリート	0.15	0.30	236	608	469	446	446	12.2	0.973	64.5×64.5	5.4	50.9	3.41
項目	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							試験結果			
			W	C	S	G1	G2	A2	A3	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮σ27 (N/mm ²)	引張σ27 (N/mm ²)
N コンクリート	45.0	41.0	175	389	706	529	529	1.36	0.023	4.5	5.0	48.1	3.90

A1:流動・遅延剤, A2:AE 減水剤, A3:助剤

キーワード ジオポリマー、付着強度、フライアッシュ、産業副産物、CO₂削減、エポキシ樹脂塗装鉄筋
連絡先 〒179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16 前田建設工業(株) 技術研究所 TEL：03-3977-2241

の作製には強制二軸式ミキサ(容量 55L)を用い、80℃、12hr 相当の養生を施した。表 1 に各コンクリートの配合ならびにフレッシュ試験結果および圧縮強度、割裂引張強度を示す。

5. 各種鉄筋との付着強度

引抜き試験結果および試験後の供試体と各種鉄筋の付着状況を図 1～図 4 に示す。

付着応力度は、普通鉄筋+N コンクリート、普通鉄筋+GP コンクリート>高付着エポ鉄筋+GP コンクリート>エポ鉄筋+GP コンクリートの順となった。

普通鉄筋における N コンクリートと GP コンクリートの付着応力度 (0.002D) は同等であり、最大付着応力度もほぼ同程度の結果となった。試験後の鉄筋への試料の付着状況から、両者とも良好な付着力が発揮されていることが確認された。最大付着応力度に達した後の付着応力度とすべり量に着目すると、N コンクリートでは、付着応力度が一定の状態ですべり量だけが增大する状況が認められたが、GP コンクリートでは最大付着応力度に達した後、供試体への割裂ひび割れの発生に伴い急激に付着応力度が低下して終局に至る結果となった。これは、GP コンクリートの引張強度が N コンクリートに比べやや小さいことや破壊時の挙動が脆性的であることが要因と思われる。ただし、GP コンクリートの付着応力は十分確保されており、設計に際しては特に問題は生じないものと考えられる。

沿岸部や降雪地など塩分の影響が予想される地域では、鉄筋腐食対策が重要となり、エポキシ樹脂塗装鉄筋が効果を発揮する。GP コンクリートとの付着応力度 (0.002D) をみると普通鉄筋に比べ、高付着エポ鉄筋で 10%程度、エポ鉄筋で 55%程度の低下が認められた。高付着エポ鉄筋では、応力が集中する節部のエポキシ樹脂が捲れる状況が観察され (図 3)、部分的な塗装の剥がれが付着応力度の低下の要因となったと思われる。一方、エポ鉄筋は引抜き直後から鉄筋のすべりが確認され、観察結果からも鉄筋への試料の付着はほとんど認められなかった。

6. おわりに

普通鉄筋や高付着エポ鉄筋を用い、所要の定着長を設定することにより、GP コンクリートと鉄筋の複合構造の構築が可能であると推察される。

著者らは、GP コンクリートと鉄筋の基本定着長の設定を目的とした、はり部材をモデルとした鉄筋の引抜き試験についても試みており、良好な感触を得ている。今後、これら成果についても順次報告していく予定である。

<参考文献>

- 1) 上原元樹: ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.4, pp.41-46, 2008
- 2) 一宮一夫 他: ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 第 33 巻 1 号, pp.575-580, 2011
- 3) 河尻留奈 他: ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 第 33 巻 1 号, pp.1943-1948, 2011
- 4) 南浩輔 他: ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 第 35 巻 1 号, pp.1957-1962, 2013
- 5) 国枝稔 他: ジオポリマーコンクリートおよびモルタルの曲げ破壊性状, コンクリート工学年次論文集, 第 35 巻 1 号, pp.1999-2004, 2013

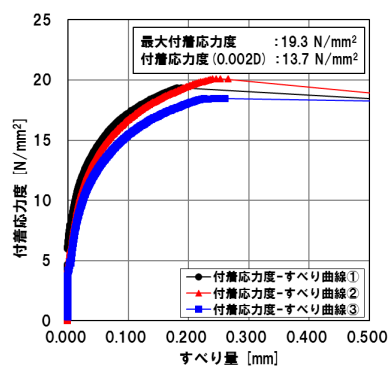


図1 引抜き試験結果と付着状況 (普通鉄筋と N コンクリート)

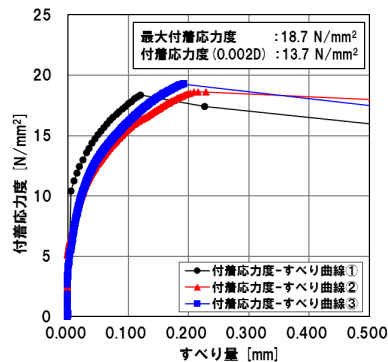


図2 引抜き試験結果と付着状況 (普通鉄筋と GP コンクリート)

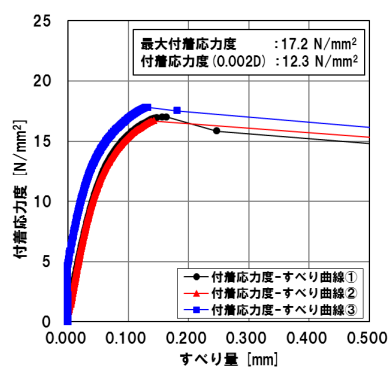
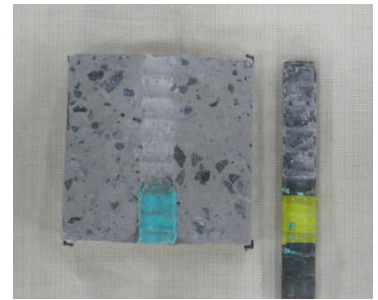


図3 引抜き試験結果と付着状況 (高付着エポ鉄筋と GP コンクリート)

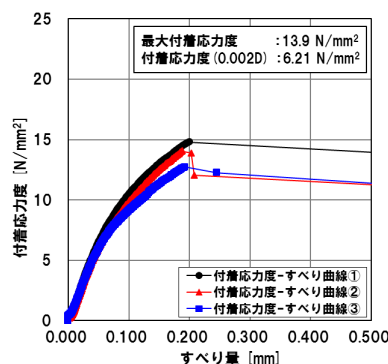


図4 引抜き試験結果と付着状況 (エポ鉄筋と GP コンクリート)

