

# ジオポリマー繊維強化コンクリートを用いた RC 部材補強手法の可能性探索

Exploring the Possibility of Strengthening Method for RC Members Using Fiber Reinforced Geopolymer Concrete

北海道大学大学院 准教授 白井和貴

## (研究計画ないし研究手法の概略)

近年、セメントを用いないコンクリート系材料として、ジオポリマーが着目されている。ジオポリマーは、アルミナシリカ粉末とアルカリ溶液の縮重合により生成される固化体であり、産業副産物消費や CO<sub>2</sub> 発生量削減の利点から、環境問題解決の一手段として期待されている。また、ジオポリマーに繊維を混入して強化することにより引張強度や靱性能を向上させる検討事例も報告されている。

本研究では、ジオポリマーを繊維強化したコンクリート系材料（以降、Fiber Reinforced Geopolymer Concrete : FRGC と記す）を用いて、既存の鉄筋コンクリート (RC) 部材を補強し、耐震性等の構造性能を向上させることを着想する。本研究の目的は、FRGC 層の付加による RC 部材の補強の可能性について探索することである。具体的な実施内容は、(1)FRGC 供試体の試設計・製作・材料試験に基づく特性把握、(2)数値解析に基づく FRGC-RC 複合部材の力学性能評価、である。

### (1)FRGC 供試体の試設計・製作・材料試験に基づく特性把握

短繊維を混入して強化した繊維補強ジオポリマーの力学性状を明らかにするため、特に原材料として北海道ローカルの産業副産物を利用したジオポリマーを対象にすることも狙いとして、ジオポリマーの調合や条件を変えた種々のテストミックスを行い、テストピースに圧縮強度試験と割裂引張強度試験を行った。

使用材料は、フライアッシュ (FA)、高炉スラグ微粉末 (BS)、水酸化ナトリウム (NaOH)、水ガラス (WG)、細骨材 (S)、シリカフューム (SF)、グルコン酸 Na (GNA)、ポリビニルアルコール繊維 (PVA)、水とした。WG は JIS 1 号、FA は JIS II 種とした。水は、井水 (飲用) または純水を用いた。FA、BS、S、水は、北海道内で生成・産出されたローカル材料を使用した。文献 1),2) を参考に、表 1 に示す配合により、シリーズ A~F の計 6 回に分けてジオポリマー硬化体のテストピース (φ 50mm × 100mm) を作成した。

A~F の全シリーズに対して、圧縮試験を材齢 7 日と 28 日に実施した。基本的に、同配合・同条件のテストピース 3 本の結果の平均値を圧縮強度として採用した。図 1(a) に圧縮強度と養生条件の関係を示す。50℃ 下で 24h 養生後室温養生した場合の方が、50℃ 下で 6h 養生後室温養生した場合と比べて、圧縮強度は大きくなり、その増加率は GNA を入れた場合の方が入れない場合よりも大きくなった。また、GNA を入れた場合の方が全体的に高い圧縮強度を示した。図 1(b) に圧縮強度と繊維添加率の関係を示す。圧縮強度は繊維なし (添加率 0Vol.%) の方が繊維ありの場合よりも高い数値を示す傾向が認められた。室温養

生(材齢 28 日)では、繊維なしで約 50 MPa、繊維ありで添加率 1.5~4.5Vol.%で概ね 40 MPa の圧縮強度を示した。これらから、PVA 繊維は、圧縮強度の増加には寄与せず、若干圧縮強度を低下させる傾向が示された。50℃下で 24h 養生後室温養生(材齢 7 日)の方がどの繊維添加率でも高い圧縮強度を示した。このことから、温度養生が圧縮強度の発現に効果的である事が示された。

シリーズ D、E、F に対して、割裂引張強度試験を材齢 7 日と 28 日に実施した。基本的に、同配合・同条件のテストピース 3 本の結果の平均値を引張強度として採用した。図 2(a) に引張強度と材齢の関係を示す。室温養生では、材齢が増加するほど引張強度が増加する傾向が示された。シリーズ D と F で、引張強度の差異は小さいことから、井水と純水の違いが引張強度に及ぼす影響は小さい事が分かった。図 2(b) に引張強度と繊維添加率の関係を示す。PVA 繊維の添加率の増加に伴い、引張強度が増加する事が分かった。室温養生(材齢 28 日)では、PVA が 1.5Vol.%で概ね 4 MPa、PVA が 3.0Vol.%で概ね 6 MPa の引張強度が示された。圧縮強度と同様に、50℃下で 24h 養生後室温養生したケース(材齢 7 日)が最も高い引張強度を示し、温度養生が引張強度の発現に効果的である事が示された。

表 1 ジオポリマー配合

実験	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
	FA	BS	NaOH	WG	S	SF	GNA	PVA	水*1
A	565.6	99.8	66.4	16.8	1331	31.6	13.3	19.5	182.9
B	565.6	99.8	66.4	16.8	1331	31.6	13.3	*2	182.9
C	549.7	97	76.3	14.9	1293	37.2	12.9*3	19.5	178.6
D	431	287	67	0	1182	42	28	19.5	206
E	431	287	67	0	1182	42	28	0	206
F	431	287	67	0	1182	42	28	*4	206

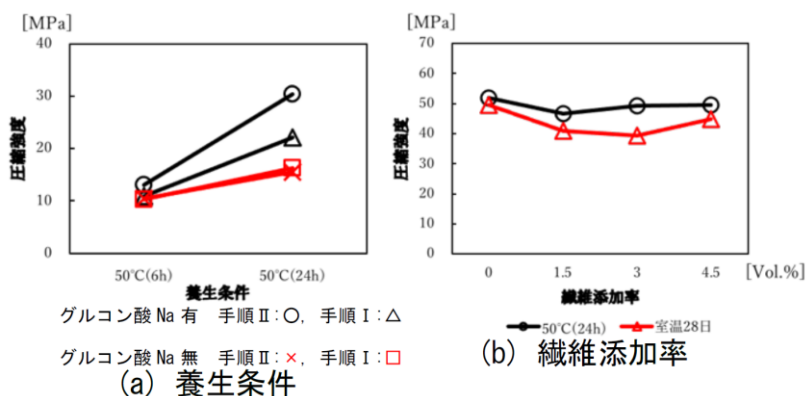


図 1 圧縮強度試験の結果

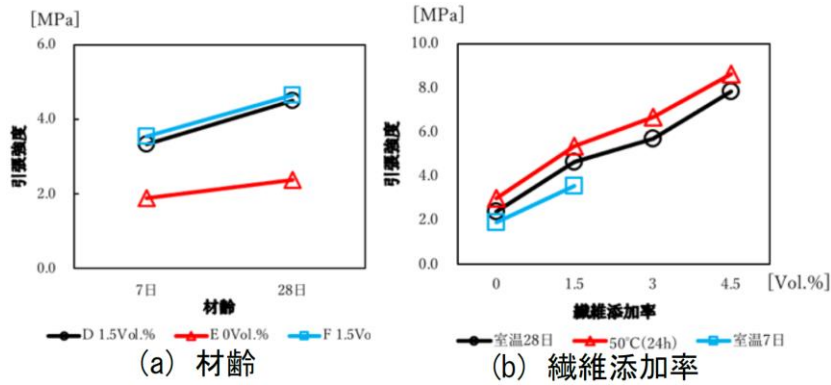


図 2 割裂引張強度試験の結果

(2)数値解析に基づく FRGC-RC 複合部材の力学性能評価

FRGC-RC 複合部材を想定した FEM 静的解析を実施した。解析プログラムは LS-DYNA を使用した。まず、ジオポリマー層が無い RC 部材を想定したモデルを使用した (図 3、RE-0 と記す)。このモデルは、文献 3)において使用された解析モデル RE-0 と同等とした。部材のせいは 100mm、幅は 300mm とした。下側が 2 点で支持され、その間隔は 1200 mm とした。コンクリートの圧縮強度は 23 MPa、引張強度は 3 MPa とした。次に、RE-0 モデルに対して、その引張側に繊維補強ジオポリマー層を想定した補強レイヤーを付加したモデルを作成した (図 4、GP\_OV-50 と呼ぶ)。補強レイヤーは部材の引張側に配置され、層の厚さは 50 mm とした。実施内容(1)の試験結果を反映し、補強レイヤーの圧縮強度は 40 MPa、引張強度は 6 MPa と設定した。補強レイヤーは無筋とした。このモデルは、文献 3)において使用された解析モデル OV-50 をベースとしており、超高性能コンクリート (UHPC) レイヤーの部分、本解析では繊維補強ジオポリマー材料に置き換えたものである。両モデル (RE-0、GP\_OV-50) に対して、中央スパンに荷重を載荷する静的解析を実施した。

得られた解析結果の荷重-変形関係を図 5 に示す。また、有効塑性歪み分布を図 6、図 7 に示す。解析結果から、GP\_OV-50 では、繊維補強ジオポリマー層を付加することにより、RE-0 と比べて、部材の剛性や終局耐力などの力学性能が向上した。

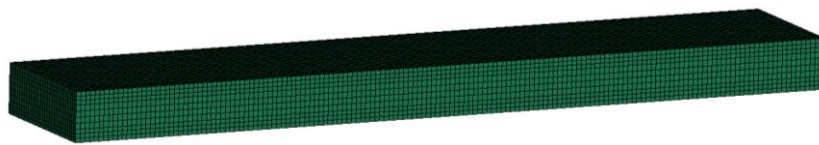


図 3 FEM 解析モデル (RE-0)

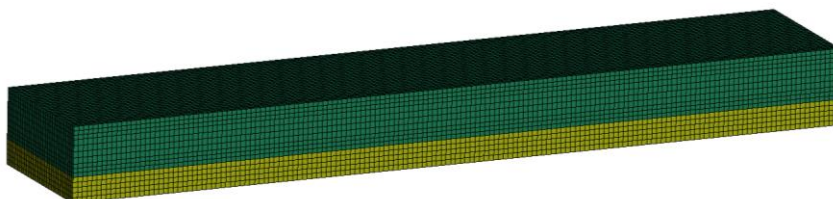


図 4 FEM 解析モデル (GP\_OV-50)

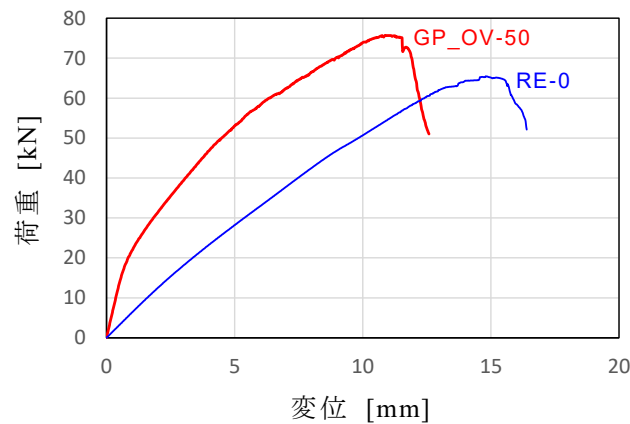


図 5 FEM 解析結果の荷重－変形関係（RE-0、GP\_OV-50）

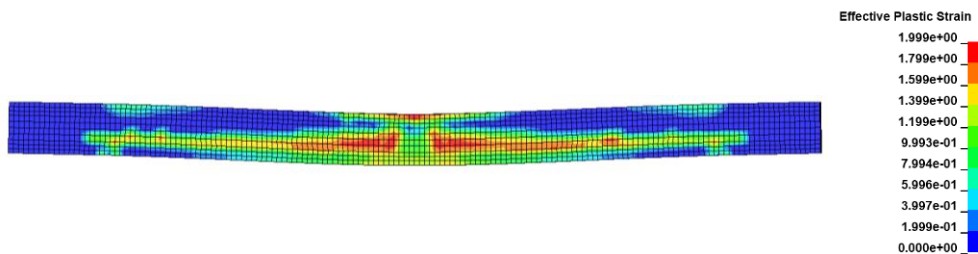


図 6 FEM 解析結果の有効塑性歪み（RE-0）

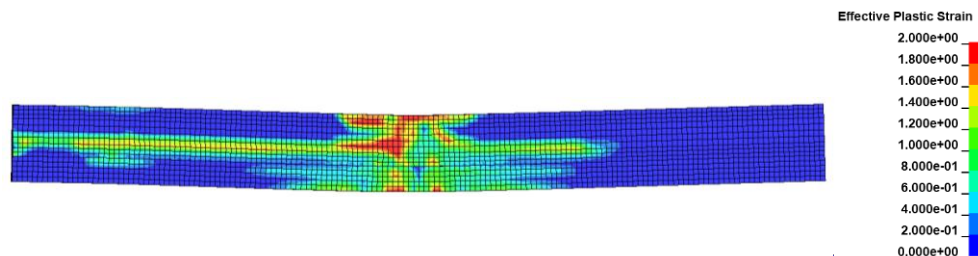


図 7 FEM 解析結果の有効塑性歪み（GP\_OV-50）

### （実験調査によって得られた新しい知見）

北海道ローカル材料を用いた短繊維入りのジオポリマー硬化体を作製し、圧縮試験と割裂試験を行い、次の知見が得られた。

- ・圧縮強度は、室温養生よりも 50℃養生後室温養生した方が大きな値が得られた。PVA 繊維を添加する事で、圧縮強度は若干ながら低下する傾向を示した。また、グルコン酸 Na の有無や、練り混ぜ手順の違いも圧縮強度に影響を与える事が確認された。
- ・引張強度は繊維添加率に大きく依存し、繊維なしと比べて PVA が 3.0Vol.%では引張強度が 3 倍ほど向上した。

さらに、FRGC-RC 複合部材を想定した FEM 静的解析を実施した。解析結果から、繊維補強ジオポリマー層を付加することにより、RC 構造部材の剛性や終局耐力などの力学性能を向上できる可能性があることが示された。

## ( 発 表 論 文 )

- [1] 白井和貴, 中牟田晃基: 短繊維補強ジオポリマー硬化体の力学性能に関する基礎検討  
その1: 方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021 (投稿済み)
- [2] 中牟田晃基, 白井和貴: 短繊維補強ジオポリマー硬化体の力学性能に関する基礎検討  
その2: 試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021 (投稿済み)

## 【参考文献】

- 1) 佐藤隆恒, 大木信洋, 東原実, 上原元樹: 石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短ま  
くらぎの試作, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 2) 佐藤隆恒, 上原元樹, 南浩輔, 山崎淳司: ジオポリマー硬化体の種々の配合, 作製法における  
生成物と pH 等諸性質との関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016
- 3) Hor YIN, Kazutaka SHIRAI, Wee TEO: Numerical model for predicting the  
structural response of composite UHPC-concrete members considering the bond  
strength at the interface, Composite Structures, 215, 185-197, 2019.