

ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究

南 浩輔^{*1}・松林 卓^{*2}・舟橋 政司^{*3}

Study on Physical Properties and Structural Use for Geopolymer

Kosuke MINAMI, Taku MATSUBAYASHI, Masashi FUNAHASHI

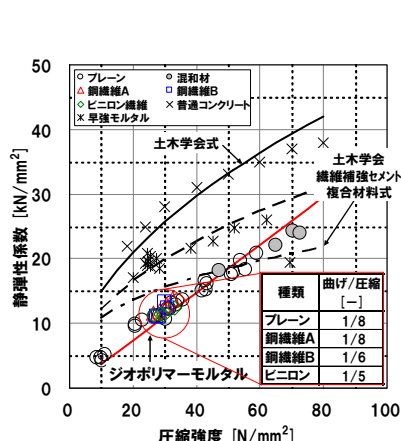


図-1 圧縮強度と静弾性係数の関係

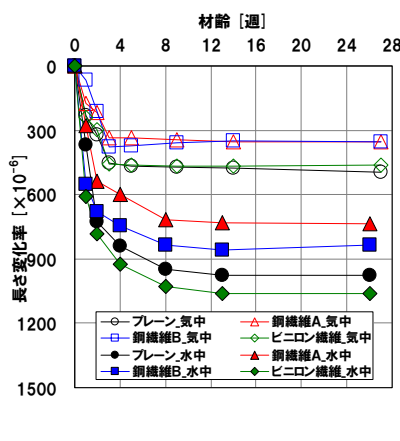


図-2 乾燥収縮試験(長さ変化率)

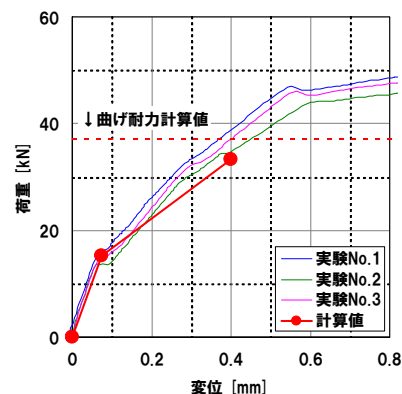


図-3 RC はりの荷重-変位関係

研究の目的

資源小国である我が国において、エネルギーの安全保障は国の根幹を支える重要課題である。エネルギー安全保障の強化の一つにエネルギー源のベストミックスの確保があるが、非化石エネルギーの導入や省エネルギーを最大限進めても、供給ポテンシャル、利便性、経済性の観点からは、将来においても化石燃料をエネルギー供給に利用する必要がある。このような社会背景のもと、石炭火力発電所から排出される石炭灰の発生は年々増加傾向にあり、石炭灰を含めた産業副産物の 3R 活動（発生抑制・再利用・再生利用）を推進する技術の開発は極めて重要となる。

技術の説明

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、石炭灰や高炉スラグなど産業副産物を活性フィラーとして大量に使用でき、かつ一般的なコンクリートと比較して 80%もの CO_2 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とは言い難い。本稿では、GP モルタルおよび短繊維補強 GP モルタルの物性ならびに構造利用に関する実験結果について報告する。

主な結論

圧縮強度が $10 \sim 70 \text{ N/mm}^2$ の範囲においては、プレーン、混和材、短繊維補強に係らず圧縮強度と静弾性係数の関係はいずれも同じ直線回帰式で表すことができる。静弾性係数は、セメント系材料を用いたものに比べ 50～80%程度と小さい値を示すが、圧縮強度が高まるにつれ、その差は狭まる傾向を示す（図-1）。引張強度は圧縮強度の $1/14 \sim 1/10$ 程度であり、セメント系材料と同程度の性能を有していると考えられる。また、繊維補強することで乾燥収縮を低減することが可能である（図-2）。

GP モルタルにコンクリート補強用の短繊維（鋼繊維 2 種類、炭素繊維 1 種類）を混入したはり、ならびに鉄筋を配置した曲げ破壊型のはりの曲げ試験を実施した。その結果、曲げじん性の向上が可能であること、鉄筋を配置した GP モルタルの曲げ挙動は、一般的な鉄筋コンクリートはりと概ね同様であり、鉄筋コンクリートと同じ理論で曲げ挙動を評価できる見込みが得られた（図-3）。

*1 本店 土木事業本部 土木設計・技術部 技術開発グループ *3 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ

*2 本店 技術研究所 企画・知財グループ

ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究

南 浩輔*¹松林 卓*²舟橋 政司*³

要 旨

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、石炭灰や高炉スラグなど産業副産物を活性フィラーとして大量に使用でき、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。

GPモルタルの圧縮強度が10～70N/mm²の範囲では、プレーン、混和材、短繊維補強に係らず圧縮強度と静弾性係数の関係はいずれも同じ直線回帰式で表すことができる。静弾性係数は、セメント系材料を用いたものに比べ50～80%程度と小さい値を示す。引張強度は圧縮強度の1/14～1/10程度であり、セメント系材料と同程度の性能を有していると考えられる。また、短繊維補強することで乾燥収縮を低減することが可能である。コンクリート補強用の短繊維を混入したはり、ならびに鉄筋を配置した曲げ引張破壊型のはりの曲げ試験から、曲げじん性の向上が可能であること、ならびに曲げ挙動が、一般的な鉄筋コンクリートはりと概ね同様であり、鉄筋コンクリートと同じ理論で曲げ挙動を評価できる見込みが得られた。

キーワード ジオポリマー／石炭灰／フライアッシュ／産業副産物／CO₂削減／短繊維補強

目 次

- | | |
|-------------|---------------|
| 1. はじめに | 5. 物性試験結果 |
| 2. ジオポリマーとは | 6. 構造利用検討試験結果 |
| 3. 実験概要 | 7. おわりに |
| 4. 使用材料 | |

STUDY ON PHYSICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL USE FOR GEOPOLYMER

Kosuke MINAMI

Taku MATSUBAYASHI

Masashi FUNAHASHI

Synopsis:

Geopolymer is a material that used a large amount of industrial by-products (coal ash and blast furnace slag etc...) as revitalization filler. It is paid attention as a material that can reduce CO₂ more than concrete by about 80%.

The relation between compressive strength and the quietness elasticity coefficient of Geopolymer (plainness and mixture material and short fiber reinforcement) can be shown by the linear regression type when compressive strength is in the range of 10-70N/mm². The quietness elasticity coefficient indicates a value that is about 20-50% smaller compared with the cementitious material. It is thought that tensile strength is about 1/14-1/10 of the compressive strength, and the same degree of the performance as the cementitious material is possessed. Moreover, the drying shrinkage can be decreased by reinforcing a short fiber. The performance of flexural ductility improves to the Geopolymer beam where a short fiber was reinforced. And, the bending behavior is appreciable by the same theory as a ferroconcrete beam in the beam of the flexural failure type that arranges the reinforced concrete.

* 1 本店 土木事業本部 土木設計・技術部 技術開発グループ

* 3 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ

* 2 本店 技術研究所 企画・知財グループ

1. はじめに

資源小国である我が国において、エネルギーの安全保障は国の根幹を支える重要課題である。エネルギー安全保障の強化の一つにエネルギー源のベストミックスの確保があるが、非化石エネルギーの導入や省エネルギーを最大限進めても、供給ポテンシャル、利便性、経済性の観点からは、将来においても化石燃料をエネルギー供給に利用する必要がある。

このような社会背景のもと、石炭火力発電所から排出される石炭灰の発生は年々増加傾向にあり、石炭灰を含めた産業副産物の 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。

ジオポリマー法による硬化体は、石炭灰や高炉スラグなど産業副産物を素材として大量に使用でき、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¹⁾として注目されている。また、セメント系材料を使用しないこの硬化体は、いわゆる水和反応を伴わない硬化体である。

近年、基礎理論や実用化に向けた研究^{2),3),4)}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とは言い難い。

本稿では、ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究結果について報告する（以下、ジオポリマーを GP と記す）。

2. ジオポリマーとは

GP は 1970～1980 年代にフランスの Davidvits により提唱された無機ポリマーであり、石炭灰やメタカオリンなどシリカ（Si）やアルミニウム（Al）を含む非晶質物質（以下、活性フィラーと記す）と、珪酸ナトリウムや水酸化ナトリウムを用いたアルカリシリカ溶液との反応によって得られる非晶質の縮重合体である。GP の固化概念図を図-1 に示す。

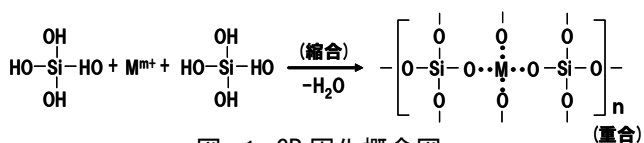


図-1 GP 固化概念図

3. 実験概要

GP モルタルおよび短繊維補強 GP モルタルの硬化物性を把握するため、幅広い強度範囲（10～70N/mm²）において圧縮強度（JSCE-G505）と静弾性係数（JIS A1149）および引張強度（JIS A1113）を測定した。また、初期養生条件と繊維補強（鋼繊維：2 種類、ビニロン繊維：1 種類）が GP モルタルの乾燥収縮に及ぼす影響を把握するため、乾燥収縮試験（JIS A1129-3）を実施した。乾燥収縮試験については、土木構造物で使用頻度の高い 30N/mm² 級の配合を用いた。

構造利用に係る基礎的研究として、コンクリート補強用の短繊維を混入した GP モルタルはりの曲げ性状の確認（JSCE-G 552），ならびに GP モルタル内に鉄筋を配置した曲げ引張破壊型のはりの曲げ挙動（JCI-S-003）について検討を実施した。

4. 使用材料

実験に使用した材料を表-1 に示す。活性フィラーとしてフライアッシュ I 種および混和材として高炉スラグ微粉末を、細骨材として山砂、砕砂および珪砂を用いた。アルカリシリカ溶液には珪酸ナトリウムと水酸化カリウムおよび水酸化ナトリウムをそれぞれ混合したものを用いた。使用したコンクリート補強用短繊維を表-2 に示す。

短繊維補強 GP モルタルの各試験に用いた配合を表-3 に示す。配合に際しては、各種試験体が良好に作製可能なフレッシュ性状を有するものとした。なお、GP モルタルの作製方法は既報²⁾に準じて行い、練混ぜにはモルタルミキサーを用いた。

表-1 使用材料

種別	材料	物性値
活性フィラー	フライアッシュ I 種	密度 : 2.40 g/cm ³ 比表面積 : 5390 cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末	密度 : 2.91 g/cm ³ 比表面積 : 4200 cm ² /g
アルカリシリカ溶液	珪酸ナトリウム、水酸化ナトリウムおよび水酸化カリウム	密度 : 1.25～1.60 g/cm ³
細骨材	山砂 砕砂 珪砂	密度 : 2.56 g/cm ³ 密度 : 2.70 g/cm ³ 密度 : 2.61 g/cm ³

表-2 短繊維の物性値

種類	直径 [mm]	標準長 [mm]	アスペクト比	比重	引張強度 [N/mm ²]
鋼繊維 A	0.50	20	40	7.8	1000 以上
鋼繊維 B	0.16	13	81	7.8	2000 以上
ビニロン繊維	0.66	30	45	1.3	900

表-3 GP モルタル配合例：30N/mm² 級 [kg/m³]

配合名	F	S	AL	短繊維	混入率 [vol%]
P	530	1415	265	なし	0
A				鋼繊維 A	2.0
B				鋼繊維 B	1.0
C				ビニロン繊維	2.0

F: 活性フィラー, S: 細骨材, AL: アルカリシリカ溶液

※短繊維の混入率は外割り

5. 物性試験結果

5.1 GP モルタルの加温時間と圧縮強度

GP モルタルの加温時間と圧縮強度の関係を図-2に示す。加温条件は、温度 80℃、湿度 90%RH とし、前養生期間は設けていない。試験の結果、加温初期に大きな強度増加 (5.4MPa/hr) が認められ、加温時間が 12 時間以降の強度増加 (0.1MPa/hr) は小さい結果となった。なお、加温を行わず常温固化させた場合、材齢 28 日の圧縮強度は加温 6 時間と同程度となった。所要の強度が得られる加温時間は、活性フィラーの種類や反応性によりそれぞれ異なるが、GP モルタルが持つポテンシャルを効果的に引き出すためには初期の加温温度と時間が重要となる。

加温条件を適切に調節・管理することは、2次製品の製造サイクルの効率化を図ることが可能であるとともに、GP 製造過程における CO₂ 発生量の抑制ならびに省エネルギー化に資することができる。

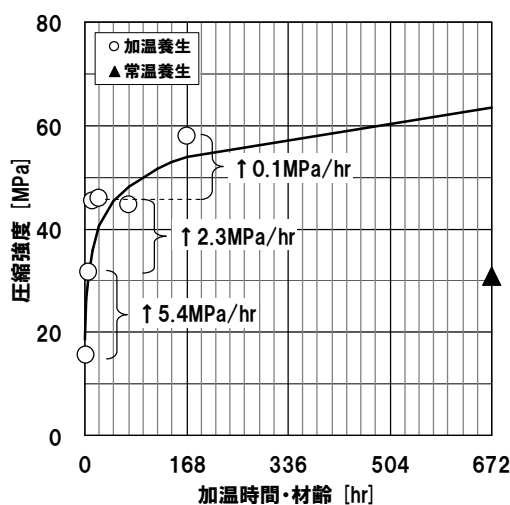


図-2 加温時間と圧縮強度の関係

5.2 GP モルタルの配合強度と混和材置換率

混和材が GP モルタルの圧縮強度に及ぼす影響を把握するため、強度レベルの異なる GP モルタル (2水準: 30,80N/mm² 級) に対し、フライアッシュに対する混和材置換率をパラメータ (3水準: 10,20,30vol%) とした圧縮強度試験を実施した。加温条件は、温度 80℃、湿度 90%RH とし、前養生期間は設けていない。図-3に示す通り、ベース配合の強度レベルが高い場合、混和材置換率の増加に伴う圧縮強度の増進効果が小さい結果となった。

強度レベルが低いケースでは、フィラーの一部を活性度の高い混和材に置換したことで、配合中に含まれる水酸基によって Si や Al などの架橋金属の溶出が進み、モノマーとの縮合が促進されたため大幅な強度増進効果が得られたと推察される。一方、強度レベルの高いケースでは、混和材置換率が 0% の場合でも、配合中に既に十分な架橋金属が溶出する土壌が形成されており、結果的に混和材置換による強度増進効果が現れにくいものと推察される。

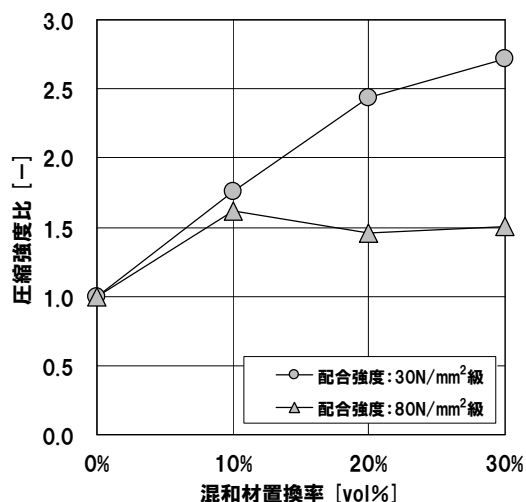


図-3 強度に対する混和材置換率の効果

5.3 GP モルタルおよび短繊維補強 GP モルタルの圧縮強度と静弾性係数

図-4に圧縮強度と静弾性係数の関係を、図-5に両者の材齢変化を示す。一般的な土木構造物に適用される機会の多い圧縮強度が 10~70N/mm² の範囲においては、短繊維補強の有無に係らず圧縮強度と静弾性係数の関係は、いずれも同じ直線回帰式で表すことができる。GP モルタルおよび短繊維補強 GP モルタルの静弾性係数は、セメント系材料⁵⁾を用いたものに比べ 50~80%程度と小さい値を示すが、圧縮強度が高まるにつれ、その差は狭まる傾向を示す。また、加温養生後の圧縮強度および静弾性係数は、緩やかに上昇するものの材齢による顕著な伸びは認められない。

本試験で得られた圧縮強度、静弾性係数の変動係数は、それぞれ、0.9~11.2%、0.1~8.8% (サンプル数 45 組の変動係数の幅) であり、セメント系材料と遜色ない安定した品質が得られている。今後は、高強度域を含めたデータの拡充を図るとともに、変動要因の把握に努めたい。

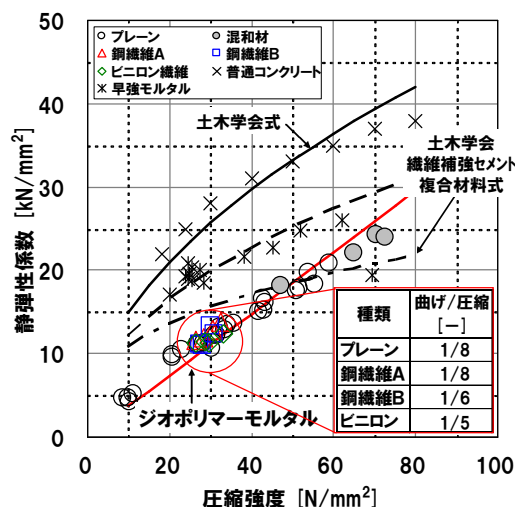


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

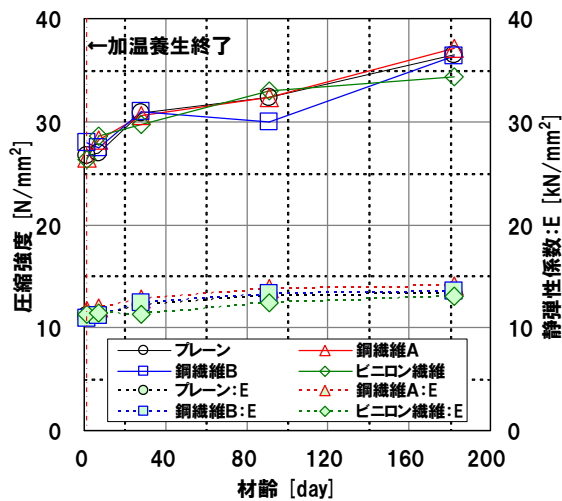


図-5 圧縮強度と静弾性係数の材齢変化

5.4 GP モルタルの圧縮強度と引張強度

図-6に示す通り、GP モルタルの引張強度は圧縮強度の1/14～1/9程度であり、圧縮強度との高い相関性が伺える。また、引張強度についても、概ねセメント系材料と同程度の性能を有していると考えられる。

一般的に引張強度はばらつきが大きく、GP モルタルは加温条件による発現強度も異なることから、今後、データの拡充を図り精度の向上に努めたい。

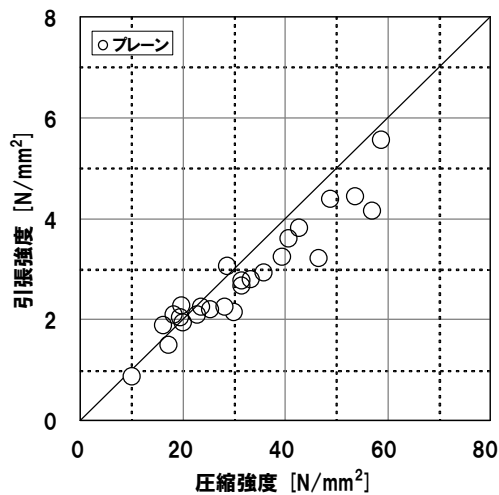


図-6 圧縮強度と引張強度の関係

5.5 GP モルタルおよび短繊維補強 GP モルタルの乾燥収縮

図-7に乾燥収縮試験結果を示す。

本試験では、加温後の養生を2次製品の製造工程を模擬した気中養生（脱型直後から温度 20℃、湿度 60%RH の恒温恒湿室内で養生）と、JIS 規準に準じた水中養生（脱型後1週間水中養生（水温 20℃）を施し、その後、恒温恒湿室内で養生）の2通りとした。計測に際しては、

気中養生は脱型直後を、水中養生は乾燥開始時をそれぞれ基長とした。

気中養生の場合、一般的なセメント系材料を用いたモルタルに比べ、長さ変化率（ $350 \sim 500 \times 10^{-6}$: 26 週）は小さく、質量減少率（ $-4.2 \sim -4.8\%$: 26 週）は同程度の結果が得られた。

一方、水中養生では、長さ変化率（ $740 \sim 1060 \times 10^{-6}$: 26 週）、質量減少率（ $-7.0 \sim -7.2\%$: 26 週）とも気中養生に比べて大幅に増加する結果となった。ただし、長さ変化率はセメント系材料を用いたモルタルと同程度⁶⁾であり、質量減少率においてもフライアッシュを使用したモルタルと同程度であり、十分実用レベルであると考えられる。

本試験の結果から、GP モルタルを繊維補強することで乾燥収縮を低減することが可能であることが確認できた。なお、本試験に用いた配合では、鋼繊維の乾燥収縮低減効果が高い結果となったが、混入率やワーカビリティ、費用対効果など、構造物の要求性能に応じた補強繊維を選択し、長繊維を含めその適用性を確認することで、より適した繊維補強 GP の配合選定が可能と考えられる。

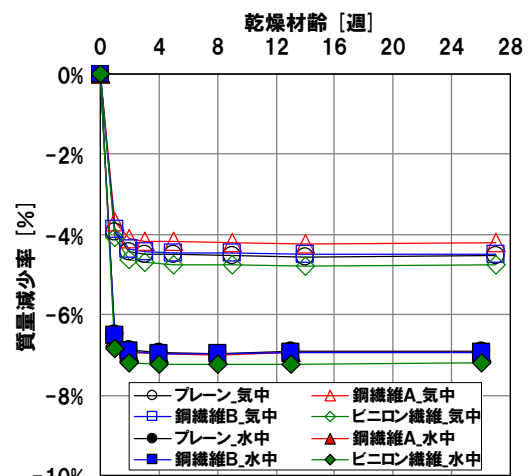
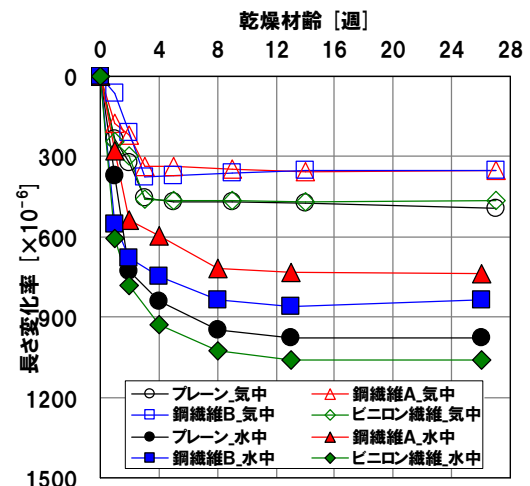


図-7 乾燥収縮試験
(上：長さ変化率，下：質量減少率)

6. 構造利用検討試験結果

6.1 短繊維を混入した GP モルタルの曲げ破壊性状

試験体寸法は 10cm×10cm×40cm とし、曲げ試験は土木学会規準 JSCE-G 552 に準じて行なった。ただし、GP モルタルの打込み面を載荷面としたため、載荷面に厚さ 3mm、幅 20mm の鉄板を石膏を介して設置し、平滑面を確保した上で載荷を行った。計測項目は、荷重、スパン中央部の鉛直変位、試験体側面の変位とした。試験体側面の変位測定位置は、鉛直変位を計測するための変位計設置面と反対側の側面において、パイ型変位計を用いて計測した。写真-1 に計測位置ならびに載荷状況を示す。同一配合に対する試験体数は 4 体とし、載荷はスパン中央の鉛直変位が 2.5mm に達するまで実施した。

短繊維は、鋼繊維 2 種類、ビニロン繊維 1 種類の計 3 種類とし、それぞれ 1 vol% 以上の混入率（外割）を目標に、ワーカビリティを考慮して混入率の上限値を設定した。

試験体の加温条件は温度 80℃、湿度 90%RH とし、前養生期間は設けていない。加温後は、温度 20℃、湿度 60%RH の恒温恒湿室内で試験材齢（28 日）まで気中養生を施した。試験日における GP モルタルの物性値を表-4 に示す。

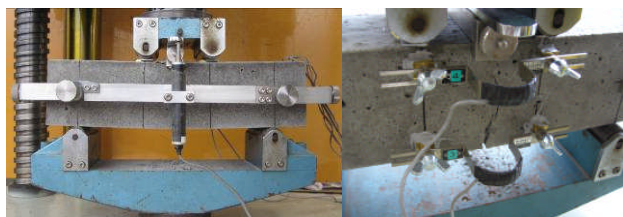


写真-1 計測位置および載荷状況

表-4 GP モルタルの物性値

配合名	圧縮強度 [N/mm ²]	静弾性係数 [kN/mm ²]	短繊維
P	30.3	10.7	なし
A	32.4	11.7	鋼繊維 A
B	33.3	11.3	鋼繊維 B
C	32.4	11.5	ビニロン繊維

(1) 破壊状況

各配合における試験体のひび割れ発生状況の例を図-8 に示す。短繊維を混入していない配合 P は曲げひび割れが生じるとほぼ同時に脆性的に曲げ破壊した。短繊維を混入した配合 A、B および C は、いずれも曲げひび割れ発生後直ちに破壊することなく変形が増大した。なお、試験体に発生した曲げひび割れの本数は、短繊維の有無に関わらずほぼ 1 本であり、ビニロン繊維を混入した配合 C の試験体 4 体のうち 1 体のみ 2 本のひび割れが発生した。

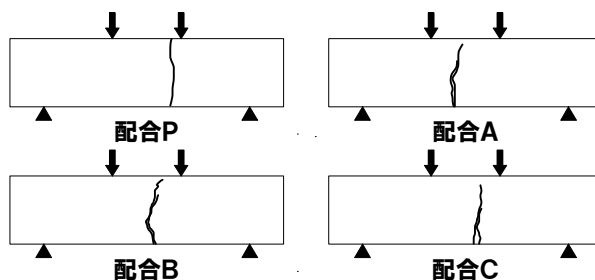


図-8 載荷後のひび割れ発生状況

(2) 短繊維の分散状況

短繊維を混入した配合 A、B および C の試験体について、載荷により発生した曲げひび割れ面で試験体を 2 つに分断し、その断面における短繊維の分散状況を確認した。写真-2 に、各試験体の断面を示す。目視観察によれば、3 種類の短繊維はいずれも良好に分散しており、局所的に短繊維が偏在することはなかった。これより、本研究で使用した短繊維の種類、混入率の範囲内では、GP モルタル内においても通常のセメント系材料と同様に均一に分散させることが可能であることがわかった。



写真-2 短繊維の分散状況（左から配合 A、B、C）

(3) 荷重－変位関係および曲げじん性係数

各配合の代表的な荷重－変位関係を図-9 a)に、短繊維を混入した配合 A、B、C の荷重－変位関係を図-9 b)～d) に示す。なお、図-9 a)は、ひび割れ発生までの挙動を確認するため、変位 0.3mm までの範囲を示している。図-9 a)によれば、配合 A、B、C の試験体は、荷重が 14～16kN 程度において変位が急激に増加しており、この時点でひび割れが発生したものと考えられる。ひび割れ発生に至るまでの荷重－変位関係の勾配は、短繊維の有無および短繊維種類によらず同等であった。図-9 b)～d)によれば、鋼繊維 A を混入した配合 A では、ひび割れ発生とほぼ同時に荷重がピークを迎え、その後なだらかに荷重が低下する傾向がみられる。鋼繊維 B を混入した配合 B では、変位が 0.5mm 程度まではひび割れ発生後も荷重が増加し、その後なだらかに荷重が低下する傾向がみられる。また、ビニロン繊維を混入した配合 C では、ひび割れ発生直後に一旦荷重が低下し、その後、変位が 1.5mm 程度まで荷重が増加する傾向がみられる結果となった。

ひび割れ発生後の荷重の低下傾向や同一配合における耐荷性能のばらつきの程度に差はあるものの、いずれの

短繊維も繊維補強効果によりひび割れ発生後も荷重を負担していることが確認できる。このことから、本研究の範囲内において、短繊維によって GP モルタルを補強することで、曲げじん性を向上させることができるといえる。

JSCE-G 552 に基づいて算定した短繊維を混入した試験体の曲げじん性係数を表-5に示す。本研究で使用した短繊維の種類および混入率の範囲では、曲げじん性係数は 2.90～5.29 となった。先に述べたように、短繊維の種類によって荷重の低下傾向が異なるため、曲げじん性係数に加え、短繊維の特徴と構造物に要求される性能を考慮した上で短繊維を選定する必要がある。

表-5 曲げじん性係数

配合名	曲げじん性係数 [N/mm ²]
A	2.90
B	4.43
C	5.29

(4) まとめ

GP モルタルを短繊維補強することで曲げじん性の向上が可能である。また、短繊維を GP モルタル内に均一に分散させることが可能である。

6.2 鉄筋を配置した GP モルタルはりの曲げ挙動

試験体寸法は 10×10×40cm とし、鉄筋を図-10 に示すように配置した。試験体数は 3 体とし、載荷はスパン 30cm の 3 等分点載荷により行った。試験日における GP モルタルの物性値を表-6 に、鉄筋の物性値を表-7 に示す。計測項目は、荷重、スパン中央部の鉛直変位、試験体側面の変位、スパン中央部における引張側主鉄筋のひずみとした。試験体側面の変位測定位置は、鉛直変位を計測するための変位計設置面と反対側の側面において、パイ型変位計を用いて計測した。

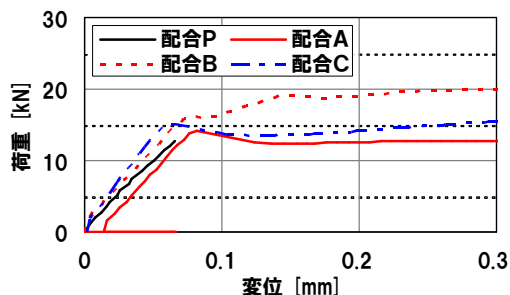


図-9 a) 荷重－変位関係(全配合:変位 0.3mm まで)

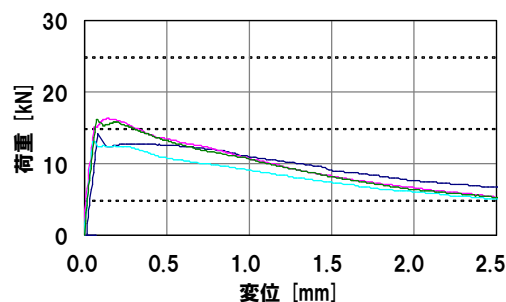


図-9 b) 荷重－変位関係(配合 A)

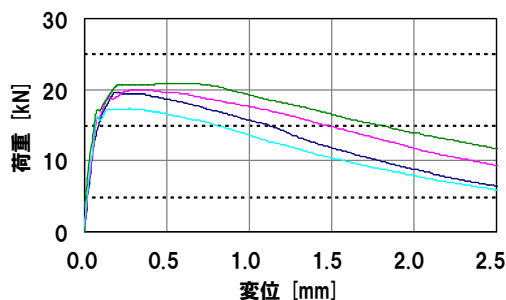


図-9 c) 荷重－変位関係(配合 B)

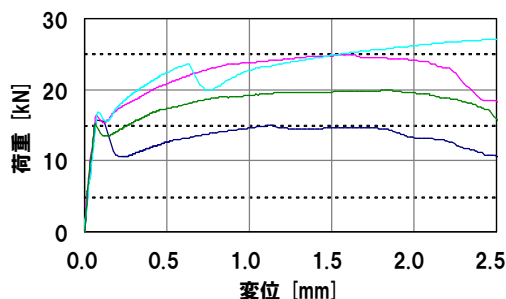


図-9 d) 荷重－変位関係(配合 C)

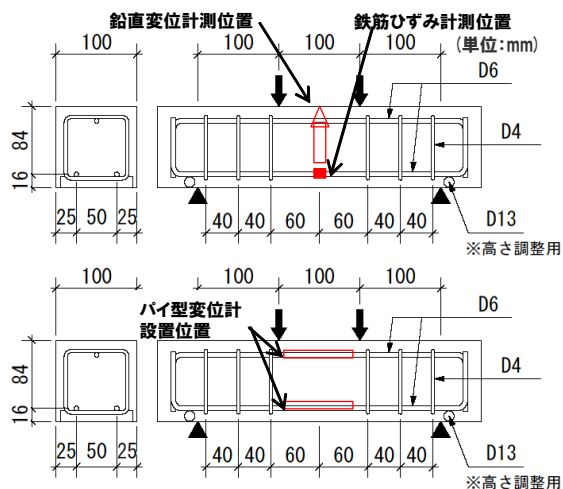


図-10 試験体の配筋および計測位置

表-6 GP モルタルの物性値

試験項目	物性値	試験方法
圧縮強度	28.5 N/mm ²	JSCE-G 505
静弾性係数	11.3 kN/mm ²	供試体作製: JSCE-F 506 試験方法: JIS A 1149
曲げ強度	3.62 N/mm ²	JIS A 1106

表-7 鉄筋の物性値

呼び名	降伏点 [N/mm ²]	ヤング係数 [kN/mm ²]	使用箇所
D6	362	194	主筋
D4	388	184	スターラップ

(1) 破壊状況および荷重－変位関係

各試験体の荷重－変位関係を図-11 に示す。試験体は、荷重 13～15kN 程度で曲げひび割れが発生し、44～47kN 程度で鉄筋が降伏し、その後、若干荷重が増加した後に圧縮側の GP モルタルが圧壊した。試験終了後の試験体のひび割れ発生状況の例を図-12 に示す。3 体の試験体の破壊状況に特筆すべき相違はみられなかった。

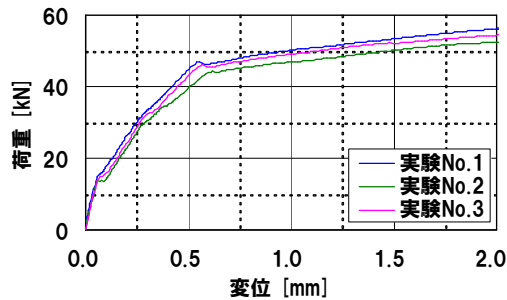


図-11 荷重－変位関係

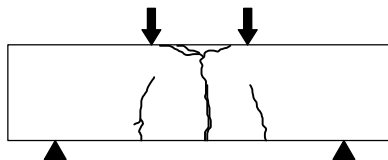


図-12 載荷終了時のひび割れ発生状況

(2) ひび割れ発生前後における中立軸の変化

代表的な荷重時（5,15,20,30,40kN 付近）における部材軸方向ひずみの断面高さ方向の分布例を図-13 に示す。ひずみは試験体側面で計測した変位を換長で除することにより求めた。

同図には、一般的な鉄筋コンクリートはりの理論に基づいて算出した、全断面有効およびひび割れ断面における中立軸位置（ x_g および x_{cr} ）を併せて示した。一般的な鉄筋コンクリートでは、ひび割れの発生に伴い中立軸が圧縮側に近づいていくことが知られている。同図から、ひび割れ発生荷重である 14.8kN 以降、中立軸の位置が x_g から x_{cr} 付近に移動していることがわかる。

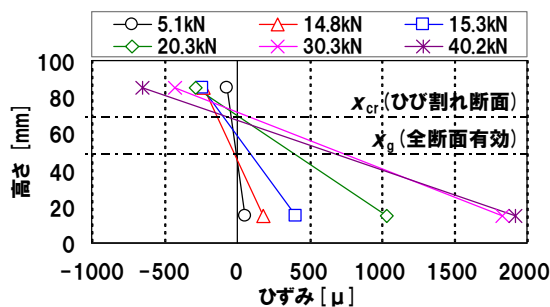


図-13 部材軸方向ひずみの高さ方向の分布例

(3) ひび割れ発生前後における曲げ剛性の変化

曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係例を図-14 に示す。 M

および ϕ は、日本コンクリート工学会規準 JCI-S-003 に基づいて算出した。同図には、一般的な鉄筋コンクリートはりの理論に基づいて算出した、全断面有効およびひび割れ断面における M と ϕ の関係を併せて示した。 M と ϕ の関係は、曲げ剛性 EI を勾配とする直線で表され、ひび割れ発生以前は全断面有効の曲げ剛性である $E_c I_g$ に沿い、ひび割れ発生以降は、ひび割れ断面の曲げ剛性である $E_c I_{cr}$ に漸近していく。

同図から、鉄筋を配置した GP モルタルはりの曲げ試験においても、ひび割れ発生以前（ひび割れ発生荷重：14.8kN）は、全断面有効の曲げ剛性の勾配とほぼ一致しており、ひび割れ発生以降にはひび割れ断面の曲げ剛性の勾配に漸近する傾向が認められる。

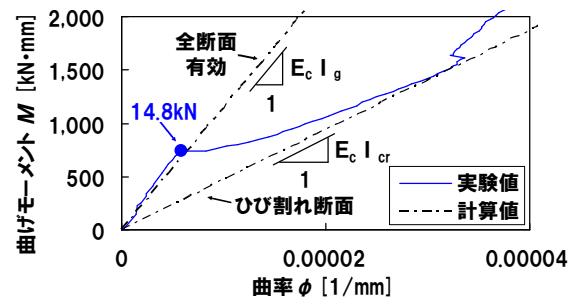


図-14 曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係例

(4) ひび割れ発生、鉄筋降伏荷重および曲げ耐力

一般的な鉄筋コンクリートはりの理論を用いて求めたひび割れ発生荷重と変位、鉄筋降伏荷重と変位、ならびに等価応力ブロックを用いて算出した曲げ耐力（材料係数および部材係数は 1.0 とした）を計算値として、実験値とともに図-15 に示す。

ひび割れ発生以降の変位に対する荷重や鉄筋降伏荷重の実験値が計算値よりも大きい結果となったが、鉄筋を配置した GP モルタルの荷重－変位関係は計算によって概ね推定できることが明らかとなった。

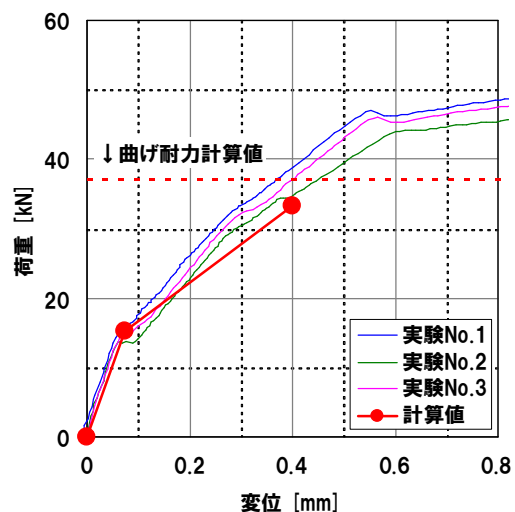


図-15 荷重－変位関係（計算値との比較）

(5) まとめ

鉄筋を配置した GP モルタルはりの曲げ挙動は、一般的な鉄筋コンクリートはりと概ね同様であり、鉄筋コンクリートと同じ理論で曲げ挙動を評価できる見込みが得られた。

7. おわりに

ジオポリマー技術は、産業副産物の有効利用ならびに低炭素社会の構築において有望な新技術として注目されている。また、化学的耐久性に優れるなどの特性を有しているため、下水道施設、地熱発電所施設ならびに温泉地や酸性土壌における建設材料としての活用が期待できる。

当社は環境経営 No.1 を目指し、当該分野の研究・技術開発に精力的に取り組んでいる。今後も新たな技術と価値の創造に努め、社会に貢献していく。

謝辞：本研究の成果の一部は(公財)鉄道総合技術研究所との共同研究による。関係各位には数多くの貴重なご助言と激励を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 相原直樹 他：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
- 2) 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
- 3) 池田攻：ジオポリマーバインダーによる鉱物質粉体の常温固化と材料化，資源と素材，Vol.114，pp.497-500，1998
- 4) 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，Vol.33，No.1，pp.1943-1948，2011
- 5) 小阪義夫 他：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響 第1報：モデル解析法による検討，日本建築学会論文報告集，第228号，1975
- 6) 出雲健司 他：二つの異なる温度環境下でのフライアッシュを使用したモルタルの収縮ひずみ挙動，土木学会論文集，No.739/V-60，pp.221-236，2003
- 7) 土木学会：コンクリートライブラリー127 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)，平成19年3月
- 8) 南浩輔 他：ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究 (1)ジオポリマーモルタルおよび短繊維補強ジオポリマーモルタルの基礎物性，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.67，pp.875-876，2012
- 9) 舟橋政司 他：ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究 (2)短繊維を混入したジオポリマーモルタルの曲げ破壊性状，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.67，pp.877-878，2012
- 10) 松林卓 他：ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究 (3)鉄筋を配置したジオポリマーモルタルはりの曲げ挙動，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.67，pp.879-880，2012