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

前田建設工業(株)　正会員　○南　浩輔　正会員　松林 卓　正会員　舟橋 政司
(公財)鉄道総合技術研究所　正会員　上原 元樹　正会員　佐藤 隆恒

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[1]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[2]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のうち，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に関して報告する(以下，ジオポリマーを GP と記す)．

2. 試験概要

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，初期養生環境と繊維補強(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(呼び強度 24 あるいは 27 相当)を用いた．

使用材料は，活性フィラーとしてフライアッシュⅠ種(密度 2.40g/cm³)および混和材として高炉スラグ微粉末(密度 2.91g/cm³)を，細骨材として山砂(密度 2.56g/cm³)，砕砂(密度 2.70g/cm³)，珪砂(密度 2.61g/cm³)を，アルカリ溶液には水ガラスと水酸化カリウム，水酸化ナトリウムを混合したものを用いた．配合例を表 1 に示す．なお，GP 硬化体の作製方法は既報[2]に準じて行った．

3. 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 1 に示す．加温条件は，温度 80℃，湿度 90%RH とした．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．また，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その反応性によりそれぞれ異なるが，配合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．

加温条件の調節による強度コントロールは，２次製品の製造サイクルの効率化および養生における CO_2 削減，省エネルギー化につながる．

表1　GP モルタル配合例［kg/m³］

F	S	AL	フロー値［mm］
530	1415	265	234×240

F:フィラー,S:細骨材,AL:アルカリ溶液

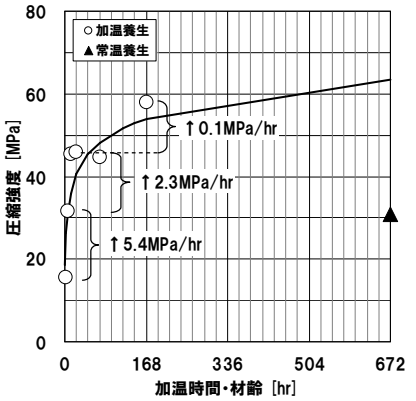

図1　加温時間と圧縮強度の関係

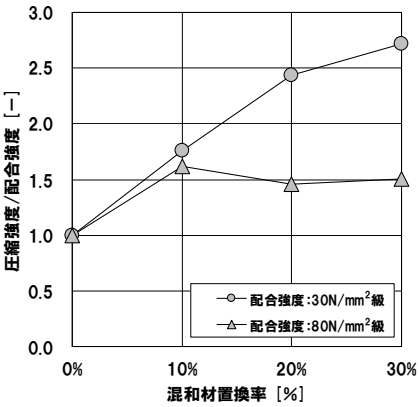

図2　配合強度に対する混和材置換率の効果

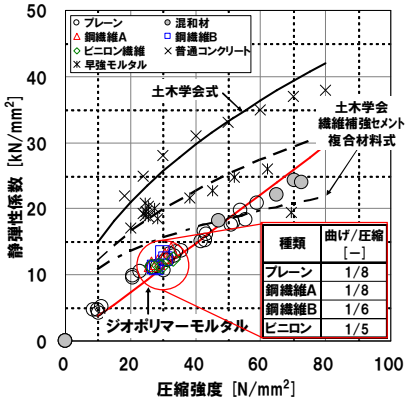

図3　圧縮強度と静弾性係数の関係

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，CO_2 削減，短繊維補強
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

4. 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，配合強度の異なる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：10,20,30%)とした圧縮強度試験を実施した．図2に示す通り，ベース配合の強度が高い場合，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．

配合強度が低いケースでは，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，配合強度の高いケースでは，配合中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．

5. 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3に圧縮強度と静弾性係数の関係を，図4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，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．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[3]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，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%(n=45)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．

6. GPモルタルの圧縮強度と引張強度

図5に示す通り，GPモルタルの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．

7. GPモルタルおよび短繊維補強GPモルタルの乾燥収縮

図6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，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．

計測中ではあるが，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(350～470×10⁻⁶：13週)は小さく，質量減少率(－4.2～－4.8%：13週)は同程度の結果が得られた．一方，水中養生では，気中養生に比べ長さ変化率(720～1030×10⁻⁶：8週)，質量減少率(－7.0～－7.2%：8週)とも大幅に増加する結果となった．ただし，長さ変化率は，セメント系材料やフライアッシュを用いたモルタルと同程度[4]であり，十分実用レベルであると考えられる．

また，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り，要求性能に応じた補強繊維を選択することで，最適な配合が選定できると考えられる．

＜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) 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
4) 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

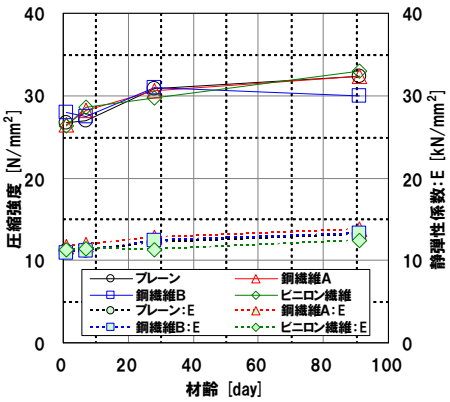

図4 圧縮強度と静弾性係数の材齢変化

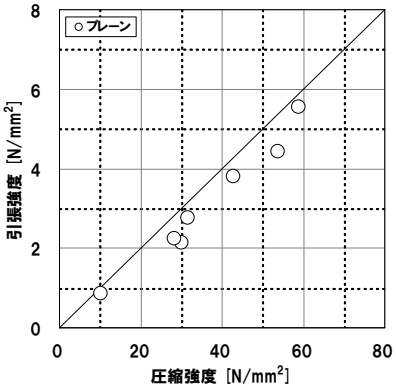

図5 圧縮強度と引張強度の関係

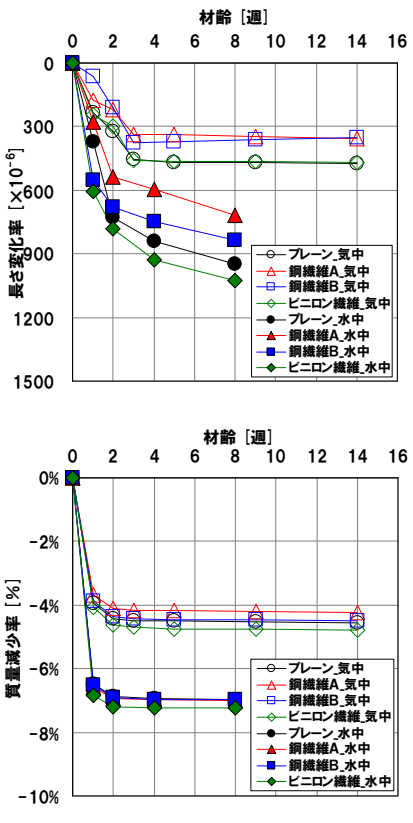

図6 乾燥収縮試験
(上：長さ変化率，下：質量減少率)