# 論文　圧縮強度と骨材量を変化させたジオポリマー硬化体のヤング係数に関する基礎的研究

ポンマハーサイ　パラミ[*1]・伊藤　彰利[*1]・畑中　重光[*2]

**要旨**：本研究では高炉スラグ微粉末置換率と骨材率を変化させたジオポリマーの圧縮特性を実験的に調べた。また，複合則理論によりジオポリマーのヤング係数を推定した。その結果，高炉スラグ微粉末置換率が大きいほど圧縮強度とともにヤング係数が増加すること，骨材率が増加するほど圧縮強度が低下し，ヤング係数が増加することが確認された。また，並列モデルを用いた複合則理論によるヤング係数の推定値は全体的に過大となったが，ジオポリマーモルタルで高炉スラグ微粉末の置換がある場合，かつ細骨材率（モルタル全容積に対する細骨材の割合）が40%以下の場合においては概ね精度よく推定できた。

**キーワード**：ジオポリマー，圧縮試験，ヤング係数，骨材率，複合則理論

## 1. はじめに

コンクリートは，世界中に多用される建設材料の一つである。一般的にコンクリートで使用される結合材は普通ポルトランドセメントであるが，その製造工程において地球温暖化の一因とされる$CO_2$ガスを大量に排出することが問題視されている。その解決方法の一つとして，セメント使用量を削減するため，その代替としてフライアッシュ（以下，FA）や高炉スラグ微粉末（以下，BS）などの産業副産物を有効に利用していくことが考えられる。

そこで，1988年にJoseph Davidovitsに提唱されたジオポリマー（以下，GP）は，環境に優しい材料として様々な研究者から注目を集めた。GPとは，セメントクリンカを使用せず，産業副産物であるFAやBSなどに多く含まれているアルミナシリカ粉末とアルカリ溶液との反応によって得られる非晶質の縮重合体（ポリマー）である。

既往の研究[1)]によると，GPは価格がセメントの1.5～2倍程になるが，普通コンクリートと同等なレベルまで強度発現が可能で，凝結時間や養生時間が短く，コンクリートおよび鉄筋との付着が良く，また耐火性や耐酸性が優れるなどの特徴があるといえる。まだ基礎的な品質や建設用材料としての性質・性能を解明にする段階にあるが，土木分野および建築分野における構造物への利用が期待できる。

しかし，GPの場合，同一強度のセメント硬化体に比べヤング係数が低くなることが報告されている[2),3)]。南ら[4)]は，GPコンクリートの圧縮強度と静弾性係数との間には相関性が認められ，一般的なセメント系材料を用いた硬化体と同様に，圧縮強度を指標とした指数関数で表すことができると報告している。ヤング係数は，その部材の剛性や変形を評価する際に用いられる。配（調）合条件よりヤング係数を推定できればGPを構造部材へ利用する際に設計上寄与するものと考えられる。

セメントコンクリートのヤング係数の評価方法としては，骨材および混和剤による係数，単位容積質量および圧縮強度をパラメータとする建築学会式などの実験式と，セメントペーストと骨材のヤング係数とそれらの構成比を用いて算出する複合則を用いた理論式による推定方法があり，後者による評価方法のほうが適切であると報告している[5)]。

表－1 使用材料

| 種別 | 材料名 | 密度 (g/cm³) |
|---|---|---|
| 粉体 | 普通ポルトランドセメント | 3.15 |
| | フライアッシュII種 (JIS A 6201) | 2.29 |
| | 高炉スラグ微粉末4000 (JIS A 6206) | 2.91 |
| アルカリ溶液 | 水ガラス2号　原液 | 1.45 |
| | 水酸化ナトリウム水溶液（10mol/L） | 1.35 |
| 細骨材 | 三重県町屋川産川砂 （吸水率　2.15%） | 2.59 |
| 粗骨材 | 三重県志摩産5号砕石 （吸水率　0.93%） | 2.66 |
| | 三重県志摩産6号砕石 （吸水率　1.29%） | 2.66 |

*1 三重大学大学院　工学研究科建築学専攻　(学生会員)
*2 三重大学大学院　工学研究科建築学専攻教授　工博　(正会員)

本研究では，BS が粉体の全容積に占める割合（以下，BS 置換率）と骨材率を変化させた GP 硬化体のヤング係数を実験的に調べ，複合則理論によるヤング係数の推定方法について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配（調）合

**表－1** に使用材料を，**表－2** に蛍光 X 線分析（XRF）による粉体の化学組成を示す。

GP の粉体としては，JIS A 6201 に規定されている FAⅡ種および JIS A 6206 に規定されている 4000 ブレーンの BS を使用した。アルカリ溶液には，水ガラス 2 号（以下，WG2）および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液（以下，NH）を使用した。比較用のセメント硬化体の粉体には，普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には三重県町屋川産川砂を使用し，粗骨材には三重県志摩産砕石 5 号と 6 号を質量比 1：1 で混合させたものを使用した。

**表－3** に実験の要因と水準を示す。セメント硬化体の調合は，水セメント比を 0.5 とし，細骨材および粗骨材率を変化させ，セメントペースト，モルタルおよびコンクリートの供試体を作製した。セメントモルタルの場合は，細骨材率（モルタル全容積に対する細骨材の割合）を 0%（ペースト）から 60%まで 10%ずつ増加させ，7 種類のセメントモルタルの供試体を作製した。セメントコンクリートの場合は，粗骨材率を 0%（細骨材率 50%のセメントモルタル）から 50%まで 10%ずつ増加させ，6 種類のセメントコンクリートの供試体を作製した。

GP の調合は，アルカリ溶液と粉体の質量比を 0.5 とし，アルカリ溶液は，質量比で WG2:NH=2:1 となるように混合したものを使用した。FA のみを用いた GP は，凝結時間が遅く初期強度発現に劣り，実用的な強度発現を得るには加温養生が必要とされている。したがって，常温硬化型の GP とするために，BS と FA を併用する検討例が多く報告されている [1]。市川ら [6]によれば，BS の添加量の増加に伴い，圧縮強度が増加すると報告している。そのため，本実験では主粉体とした FA の一部を BS に置換したことによる影響も調べた。BS 置換率を 0%，10%，20%の 3 水準とし，GP 硬化体の種類（ペースト，モルタルおよびコンクリート），細骨材および粗骨材率はセメントと同様とした。

### 2.2 供試体の作製方法

GP 硬化体を作製する際に用いたアルカリ溶液は前日に WG2 と NH を質量比で 2:1 となるように混ぜ，20℃，60%RH の養生室で保管したものとした。

**表－2 活性フィラーの化学組成**

| | FA(%) | BS(%) |
|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | 23.64 | 14.94 |
| $SiO_2$ | 60.49 | 34.04 |
| CaO | 2.90 | 42.72 |
| $Fe_2O_3$ | 4.68 | 0.35 |
| $K_2O$ | 1.21 | 0.26 |
| MgO | 0.53 | 5.81 |
| $Na_2O$ | 0.49 | 0.26 |
| Ig.loss | 3.05 | 0.00 |
| 合計 | 96.99 | 98.38 |

**表－3　実験の要因と水準**

| 種別 | | 要因 | 水準 |
|---|---|---|---|
| モルタル | GP | $V_{BS}$（%） | 0，10，20 |
| | セメント | $V_s$（%） | 0（ペースト），10，20，30，40，50，60 |
| コンクリート | GP | $V_{BS}$（%） | 0，10，20 |
| | セメント | $V_g$（%） | 0（$V_s$＝50%のモルタル），10，20，30，40，50 |

$V_{BS}$：BS置換率
$V_s$：細骨材率，$V_g$：粗骨材率

セメントおよびGPペーストの練混ぜには，ハンドミキサーを用いた。練混ぜ方法としては，特にGPペーストの場合は，最初にハンドスコップで粉体のみを空練りした後，アルカリ溶液を追加し，モルタル用ハンドミキサーを用い60秒間練り混ぜ，30秒間掻き落としをした後，再び120秒間練り混ぜた。硬化前のフレッシュ性状を確認するために，JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に基づいてフロー試験を行った。その後，φ50×100mmのプラスチック製型枠に打ち込んだ。打込み後，型枠上面をビニルシートで覆い，輪ゴムで留め，材齢28日まで20℃，60%RHの環境で養生を行った。

モルタルおよびコンクリートの練混ぜには，セメント，GPともに揺動撹拌型ミキサを用いた。練混ぜ方法は，粗骨材，細骨材，粉体（セメントあるいはGPの場合はFAとBSを事前に混ぜた粉体）の順に投入し，30秒間空練りを行った。次に，水あるいはアルカリ溶液を投入し60秒間練り混ぜた後，掻き落としを行い，高速で120秒間の練混ぜを行った。打ち込む前にスランプと空気量の試験を実施した。供試体は，モルタルの場

Vs=40%　　Vs=50%　　Vs=60%

**写真－1　セメントモルタル供試験体の様子（例）**

合にはφ50×100mmの円柱供試体，コンクリートの場合にはφ100×200mmの円柱供試体とし，材齢28日まで20℃，60%RHの環境で型枠内封かん養生とした。

所定材齢に達した後に脱型した供試体は，コンクリート研磨機を用いて端面を平滑に整えた。

### 2.3 実験方法

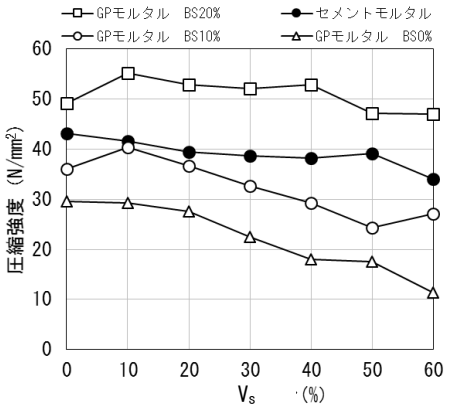
圧縮試験は JIS A 1108 に準拠した。各調合につき 3 本ずつの供試体を用いて圧縮試験を行った。また，ヤング係数の測定に関しては，JIS A 1149 に従い，圧縮試験を行い，圧縮応力－ひずみ曲線を描き，ヤング係数を求めた。ここで，コンクリート供試体にはコンプレッソメータを，ペーストおよびモルタル供試体にはワイヤストレインゲージを用いて縦ひずみの測定を行った。

## 3. 実験結果

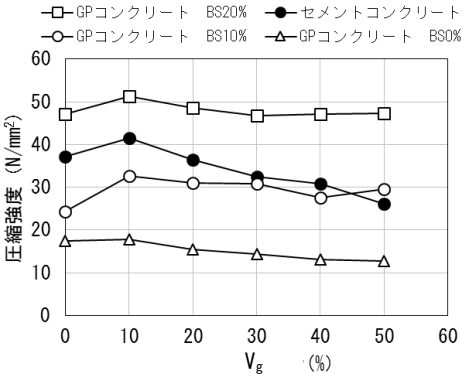
### 3.1 圧縮強度

**図－1** に，モルタルの圧縮強度と細骨材率の関係を示す。セメントモルタルは，細骨材率 0%（ペースト）の圧縮強度が最も大きく，細骨材率を 20%まで増加させるに伴って圧縮強度がわずかに減少するが，20%と 50%の間ではほぼ等しく，細骨材率が 50%を超えると圧縮強度が大きく低下した。川上ら [8]の過去の実験結果と同様な傾向である。これは，**写真－1** から分かるように細骨材率 60%のセメントモルタル供試体では表面に気泡が多く，セメントモルタルの充填不良が原因と考えられる。

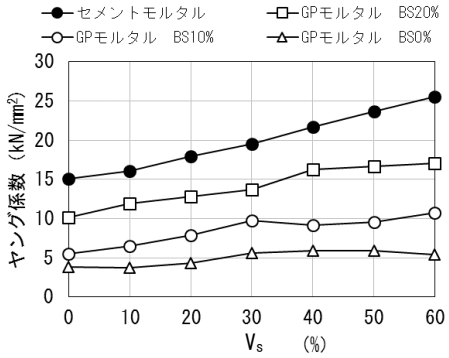
一方，GP モルタルの場合，特に BS を置換したものでは，細骨材率を 0%から 10%に増加させたとき，セメントの場合と異なり，圧縮強度の増加がみられた。また，BS 置換率 0%と 10%のとき，細骨材率を大きくするに伴って圧縮強度が低下したのに対し，BS 置換率 20%では細骨材率が 40%を超えるまで圧縮強度の低下が確認されなかった。これは BS 置換率の増加によって C-S-H 系の生成物が増加し，GP ペーストの強度が大きくなることに起因すると考えられる。



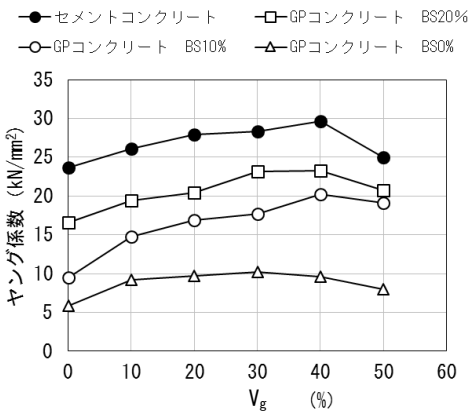

**図－1　モルタルの圧縮強度と細骨材率の関係**




**図－2　コンクリートの圧縮強度と粗骨材率の関係**




**図－3　モルタルのヤング係数と細骨材率の関係**




**図－4　コンクリートのヤング係数と粗骨材率の関係**

**図－2** に，コンクリートの圧縮強度と粗骨材率の関係を示す。セメントコンクリートは，粗骨材率を 10%増加させたことにより，圧縮強度がわずか増加したが， 10%を超えると圧縮強度が徐々に低下した。過去の研究には，粗骨材率と圧縮強度の間にほぼ直線的な関係が認められると報告されている [9]。本実験結果においては，粗骨材率 10%以上の場合に同様の傾向が確認された。一方，GP コンクリートは，粗骨材率 10%においてはセメントコンクリートと同様に圧縮強度が増加し，10%を超えると粗骨材率の増加に伴い圧縮強度の低下が見られたが，その低下の程度はわずかであり，セメントコンクリートほど大きくない。この理由として，GP コンクリートの場合，モルタルと粗骨材の間の付着がセメントよりも優れているのではないかと考えられ，今後の検討課題としたい。

### 3.2 ヤング係数

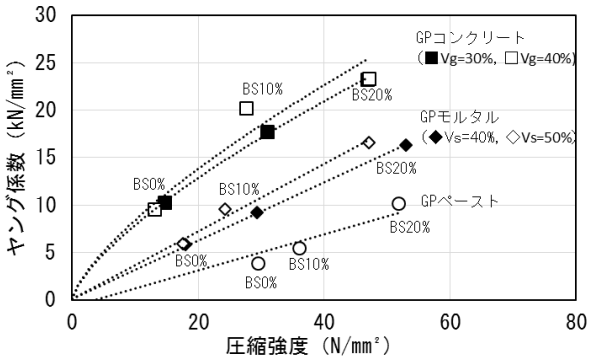
**図－3** にモルタルのヤング係数と細骨材率の関係を，**図－4** にコンクリートのヤング係数と粗骨材率の関係を示す。

**図－3** より，セメントモルタルのヤング係数は細骨材率が 60%まで増加するに伴ってほぼ直線的に増加している。また，GP モルタルの場合も細骨材率の増加とともにヤング係数の増加がみられ，その増加量は BS 置換率が大きいほど大きくなる。しかし，細骨材率が 40%を超えると GP モルタルのヤング係数に若干の低下が見られた。

**図－4** より，セメント，GP コンクリートともに粗骨材率の増加に伴いヤング係数は増加するが，BS 置換率 0%の GP コンクリートの場合だけはその増加の程度が極くわずかである。また，セメント，GP コンクリートともに粗骨材率が 40%を超えるとヤング係数が低下した。

セメント，GP 硬化体ともに骨材率の増加に伴いヤング係数が増加するが，ある割合（本実験では約 40%）を超えると，施工性の低下に伴う充填の不良や母材マトリックスと骨材との境界面の影響を受け，ヤング係数の増加が頭打ちとなる。

**図－5** に，GP 硬化体のヤング係数と圧縮強度の関係の一例を示す。GP ペーストの場合，BS 置換率が増加するほど，圧縮強度，ヤング係数ともにほぼ直線的に増加し，圧縮強度とヤング係数の間に直線的な関係が認められた。一方で，本実験で取り扱ったコンクリートの場合は，セメントコンクリートと同様に圧縮強度とヤング係数の間には，非線形の関係が見られる。




**図－5　ヤング係数と圧縮強度の関係**

### 3.3 複合則理論によるヤング係数の検討

コンクリートのような複合材料の弾性係数を評価するために，複合則理論に基づいていくつかの力学モデルが提案されてきた。

本研究では，そのなかの簡易的な直列と並列モデルおよび比較的精緻とされる Hashin-Hansen モデルを用いて検討を行った。各モデルの計算式を**表－4** に示す [11]。

ここで，モルタルの場合はペーストと細骨材の 2 相複合体として，コンクリートの場合は細骨材含有率 50%のモルタルと粗骨材の 2 相複合体として取り扱うこととする。

セメントペーストのヤング係数は，清原ら [5]の推定式（式(1)）により求めた。また，GP ペーストについては，アルカリ溶液粉体比が 0.5 のとき，GP ペーストのヤング係数と BS 置換率の間に式(2)の関係が本実験から得られている。したがって，今回の GP ペーストのヤング係数は式(2)により求めることとした。

$$E_p = a + b \log (C/W) \qquad (1)$$

ここに，$E_p$：セメントペーストのヤング係数（kN/mm²）

$a,b$：材料係数（$a = -3700 + 4200 \log (t)$，$b = 39500 - 2276 \log (t)$）

$t$ ：供試体の材齢（日）

$C/W$ ：セメント水比

$$E_p = 243 V_{BS} + 4480 \qquad (2)$$

ここに，$E_p$：GP ペーストのヤング係数（kN/mm²）

$V_{BS}$：BS 置換率（%）

**表－4　複合則モデル**

| モデル | 計算式 |
|---|---|
| 並列 | $E_c = V_g E_g + V_m E_m$ |
| 直列 | $E_c = \dfrac{1}{\left(\dfrac{V_g}{E_g} + \dfrac{V_m}{E_m}\right)}$ |
| Hashin-Hansen | $E_c = E_m \times \dfrac{\left[V_m E_m + (1+V_g) E_g\right]}{\left[(1+V_g) E_m + V_m E_g\right]}$ |
| $E_c$ ，$E_m$（$E_p$），$E_g$（$E_s$）：コンクリート，モルタル（ペースト），粗骨材（細骨材）のヤング係数<br>$V_m$（$V_p$），$V_g$（$V_s$）：モルタル（ペースト）体積率，粗骨材（細骨材）率 | |

また，コンクリートの母材モルタルのヤング係数は，式(1)により求められたペーストのヤング係数と後述する式(3)により求められた細骨材のヤング係数を Hashin-Hansen モデル式に代入して算出した値を用いた。

$$E_a = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \qquad (3)$$

ここに，$E_a$：骨材のヤング係数（$\times 10^4$ N/mm$^2$）

$\mu$：吸水率（%）

細骨材および粗骨材のヤング係数は，直接求めることは困難であった。よって，今回は，清原ら [7]が骨材の吸水率をパラメータとして提示した実験式（式(3)）を用いて求めることとした。その結果，細骨材のヤング係数 $E_s$ は $4.98\times10^4$ N/mm$^2$ となった。粗骨材に関しては，今回の実験では 5 号と 6 号砕石の 2 種類を 1：1 で用いたため，まずそれぞれの吸水率を使って砕石のヤング係数の推定値を求めた。次に，式(4)により 5 号および 6 号砕石のヤング係数の推定値にコンクリート中の両者の絶対容積比を乗じて全粗骨材のヤング係数（$E_g = 5.78\times10^4$ N/mm$^2$）とした [7]。

$$E_g = V_{g1}\,E_{g1} + V_{g2}\,E_{g2} \qquad (4)$$

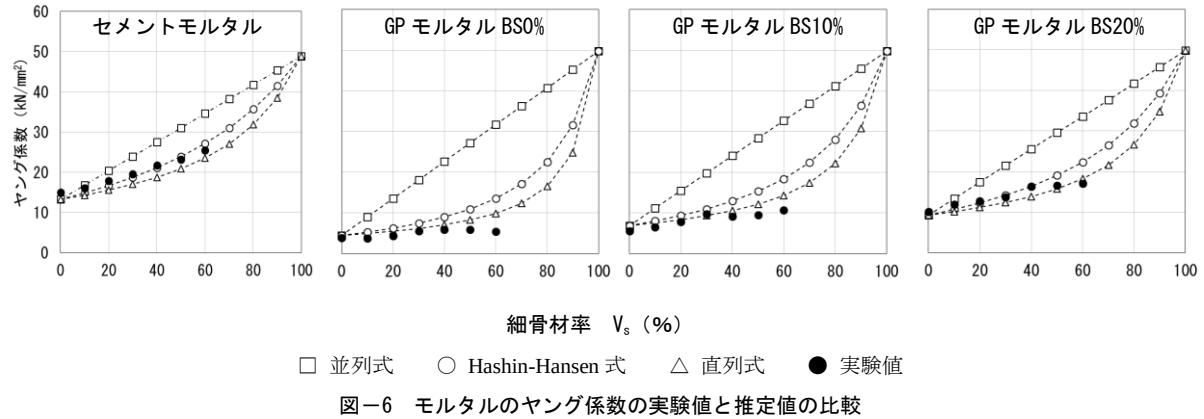
ここに，$E_{g1}$，$E_{g2}$ ：5 号，6 号砕石のヤング係数

$V_{g1}$，$V_{g2}$ ：5 号，6 号砕石の骨材率

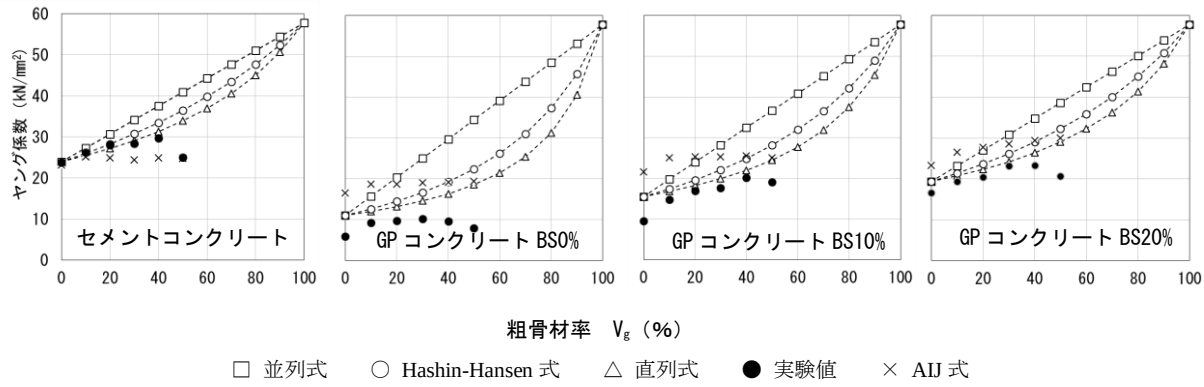
複合則理論により推定したモルタルおよびコンクリートの計算結果を，それぞれ**図－6** および**図－7** に示す。**図－7** には，建築学会（AIJ）式により算出したコンクリートのヤング係数も併示した。

**図－6** によれば，Hashin-Hansen 式によるセメントモルタルおよび BS 置換率 20%の細骨材率 0～40%の GP モルタルのヤング係数の推定結果は，実験結果とほぼ一致している。一方， GP モルタルは，直列モデルで概ね推定することが可能であるが，実験値に比べ計算値のほうが大きく，その差は BS 置換率が大きいほど小さくなる。これは酸化カルシウム成分の多い BS の添加によって GP モルタルがより緻密になることが一因と考えられる。また，細骨材率の増加に伴い，その割合が 40%を超えると実験値が計算値を大きく下回る。この傾向は細骨材率の増加に伴いペーストと骨材との界面に生じるマイクロクラックや遷移帯の増加および充填不良に起因するものと考えられる。

**図－7** によれば，Hashin-Hansen 式によるセメントコンクリートのヤング係数の推定結果は，粗骨材率が 0～20%では実験値とほぼ一致する。一方，粗骨材率が 20%を超えたセメントコンクリート，GP コンクリートともに，たとえ直列モデルを用いた場合でも計算値が実験値より大きく，その差は粗骨材率が大きいほど大きくなる。また，GP コンクリートの場合，BS 置換率が大きいほどその差




**図－6　モルタルのヤング係数の実験値と推定値の比較**




**図－7　コンクリートのヤング係数の実験値と推定値の比較**

は小さくなっている。これらの傾向は，モルタルの場合と類似している。複合則理論を用いてセメントモルタルおよびコンクリートのヤング係数を評価している既往の研究 [12), 13)]によれば，より精度よく推定するためにペーストと細骨材あるいは母材モルタルと粗骨材の境界面（遷移帯）の影響や骨材を混入させることにより巻き込まれた空隙の影響などを考慮する必要があると報告している。したがって，GP 硬化体においてもそれらの影響を考慮し，推定式に反映させる必要があると考えられる。また，BS を置換した場合，置換しないものと比べて生成物が異なり，硬化体の構造がより緻密になる。GP の固化体の特性が複合則理論による推定式に与える影響についての詳しい検討は今後の課題としたい。

## 4. まとめ

FA の一部として置換する BS の量，および細骨材あるいは粗骨材率を変化させた GP 硬化体の圧縮特性について実験的に調べ，複合則理論に基づいてヤング係数を推定した。本実験の範囲において以下の知見が得られた。

1）細骨材率（モルタル全容積に対する細骨材の割合）の増加に伴い GP モルタルの圧縮強度が低下する。その低下の程度は BS 置換率が大きいほど小さくなる。
2）粗骨材率の増加に伴い GP コンクリートの圧縮強度が低下する。しかし，その低下の程度はセメントコンクリートと比較して小さい。
3）骨材率の増加に伴い，GP モルタルおよびコンクリートのヤング係数は増加するが，骨材率が 40%を超えると充填不良によると思われる空隙の増加の影響や遷移帯の増加などによりヤング係数が増加しなくなる，もしくは低下する。
4）BS の置換がある場合（10～20%）の GP モルタルのヤング係数は，細骨材率 40%以下においては複合則理論により概ね推定することが可能である。

［謝辞］

本実験に際し，本学学部 4 年生の五百蔵沙耶さんに協力いただいた。また，本研究費の一部は科学研究費基盤研究（B）17H03291（研究代表者：一宮一夫　大分高専教授）によった。付記して謝意を表します。

## 参考文献

1）　日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017.9
2）　永井伴英，李柱国，高垣内仁志，菅彰：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとしたジオポリマーコンクリートの力学性能に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，No.39，No.1，pp.2077-2082，2017.7
3）　河尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：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, 2011.7
4）　南浩輔，松林卓，舟橋政司：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，Vol.35，No.1，pp.1987-1992，2013.7
5）　清原千鶴，永松静也，佐藤嘉昭，三橋博三：複合則理論を用いたコンクリートのヤング係数の推定式に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.576, pp.7-14，2004.2
6）　市川敬悟：高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーの基礎物性に関する研究，三重大学平成 27 年修士論文，pp.49-55，2016.2
7）　清原千鶴，永松静也，佐藤嘉昭，上田賢司：コンクリートのヤング係数の推定式，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.601-606，1999.6
8）　川上英男，脇敬一，中村いずみ：セメントモルタルのヤング係数評価, 福井大学工学部研究報告, Vol.43, No.2，1995.9
9）　川上英男：粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究（その 1）, 日本建築学会論文報告集, No.166, pp.19-27，1969.12
10）　川上英男 : コンクリートの弾性係数と複合理論の適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.619-624，1999.6
11）　趙力采，小林一輔 : コンクリートの弾性係数における複合特性, コンクリートジャーナル, Vol.12, No.7, pp.23-34，1974.7
12）　塚原絵万，魚本健人 : 多相複合理論に基づいたモルタルのヤング係数に関する一考察, コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.481-486，2000.6
13）　齋藤俊克，出村克宣 : 複合則を適用したポーラスコンクリートの静弾性係数推定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.723, pp.825-832, 2016.5