# 論文　スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートの耐久性に関する研究

三岩　敬孝[*1]・天羽　和夫[*2]・横井　克則[*3]・中本　純次[*4]

**要旨**：産業副産物の有効利用と天然資源の温存を目的として，ポルトランドセメントを全く使用しないスラグ石膏セメントを結合材とし，骨材にも天然砕石に加えスラグ骨材を使用したポーラスコンクリートの耐久性について検討した。その結果，スラグ石膏セメントを結合材としたポーラスコンクリートは，全体的に凍結融解に対する抵抗性は劣った。しかし，圧縮強度が大きいポーラスコンクリートは，耐硫酸塩抵抗性，乾湿繰返しに対する抵抗性が優れ，かつ，水中に浸漬した場合，pH 値の上昇を抑制できることから，水環境への負荷が小さいコンクリートであるということが明らかとなった。

**キーワード**：スラグ石膏セメント，ポーラスコンクリート，耐久性，環境負荷

## 1. はじめに

近年，地球環境の保全を目的とした産業副産物の有効利用に関する研究が盛んとなっている。コンクリートを構成する材料であるセメントは原料となる石灰石が天然資源であり，かつセメントの生産に伴って排出される $CO_2$ は温暖化の原因とされている。また，骨材においては良質な天然骨材の採取が困難であるのが現状である。

鉄鋼業において副産物として生成される高炉スラグ微粉末およびスラグ骨材はコンクリート用材料として利用されてきた。特に高炉スラグ微粉末は潜在水硬性を有し，セメントの代替材料として使用することで，長期強度の増進が大きくなる傾向がある。またセメント量を低減することができ，天然資源である石灰石を節約することができる。スラグ骨材は天然骨材の代替材料として道路用路盤材やコンクリート用骨材として利用されている。

一方，ポーラスコンクリートは透水性，吸音性および植生など環境にやさしいコンクリートとして舗装および護岸ののり面などに利用されてきている[1),2)]。しかしポーラスコンクリートは普通コンクリートに比較して粗骨材の使用量が多く，また，水セメント比が小さいことが特徴であり，その結果単位セメント量が多くなる。

そこで，本研究では産業副産物の有効利用と天然資源の温存，かつ環境負荷低減型のコンクリートの開発を目的とし，高炉スラグ微粉末に少量のアルカリ刺激剤を使用することで水和反応するスラグ石膏セメントを使用することで，ポルトランドセメントを全く使用しないポーラスコンクリートについて，骨材の種類および高炉スラグ微粉末の比表面積が，乾湿繰返しおよび凍結融解等の耐久性に及ぼす影響について実験し，その適用性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

#### (1) 結合材

1)高炉スラグ微粉末：スラグ石膏セメントの主原料である高炉スラグ微粉末は，比表面積が 4000g/cm$^2$ および 6000g/cm$^2$ 程度のものを使用し

*1 和歌山工業高等専門学校　環境都市工学科助手　博(工学)　(正会員)
*2 阿南工業高等専門学校　建設システム工学科教授　博(工学)　(正会員)
*3 高知工業高等専門学校　建設システム工学科助教授　博(工学)　(正会員)
*4 和歌山工業高等専門学校　環境都市工学科助教授　博(工学)　(正会員)

表－１　高炉スラグ微粉末の化学組成

| 記号 | 比表面積 ($cm^2/g$) | 密度 ($g/cm^3$) | 化学組成(%) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | FeO | CaO | MgO | $SO_3$ |
| S4 | 4060 | 2.89 | 33.8 | 13.8 | 0.1 | 42.8 | 5.2 | 1.9 |
| S6 | 6140 | 2.89 | 33.2 | 13.7 | 0.6 | 42.1 | 5.8 | 2.0 |

表－２　ポーラスコンクリートの配合

| 配合の種類 | 目標空隙率 (%) | 石膏置換率 (%) | $Ca(OH)_2$ 置換率 (%) | 水粉体比 (%) | 単位量($kg/m^3$) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 水 | ｾﾒﾝﾄ | スラグ | 石膏 | $Ca(OH)_2$ | 粗骨材 | |
| | | | | | | | | | | 天然砕石 | スラグ |
| C-N | 20 | 0 | 0 | 30 | 122 | 405 | 0 | 0 | 0 | 1447 | 0 |
| C-S | | | | 30 | 123 | 411 | | | | 0 | 1450 |
| S4-N | | 4.8 | 0.2 | 30 | 115 | 0 | 365 | 18.4 | 0.774 | 1447 | 0 |
| S4-S | | | | 30 | 117 | | 371 | 18.7 | 0.786 | 0 | 1450 |
| S6-N | | | | 34 | 123 | | 344 | 17.4 | 0.730 | 1447 | 0 |
| S6-S | | | | 34 | 125 | | 350 | 17.7 | 0.742 | 0 | 1450 |

た。実験に使用した高炉スラグ微粉末の化学組成を**表－１**に示す。

2)アルカリ刺激剤:アルカリ刺激剤として火力発電所から副産される排煙脱硫石膏（以後石膏と呼ぶ，密度 2.13g/$cm^3$，二水石膏）および試薬である水酸化カルシウム($Ca(OH)_2$)を使用した。

3)ポルトランドセメント:比較用として普通ポルトランドセメント(密度3.15g/$cm^3$)を使用した。

**(2) 骨材**

ポーラスコンクリート用骨材として高炉除冷スラグ骨材(表乾密度 2.66g/$cm^3$, 吸水率 2.93%，粗粒率 6.67，最大寸法 15mm，実積率 54.6%）および兵庫県赤穂産砕石(表乾密度 2.63g/$cm^3$，吸水率 0.56%，粗粒率 6.50，最大寸法 15mm，実積率 55.0%)を使用した。

**2.2 ポーラスコンクリートの配合**

実験に使用したポーラスコンクリートの配合は，目標空隙率を 20%の一定とし，スラグ石膏セメントの刺激剤は，全粉体質量に対して 4.8%の石膏および 0.2%の水酸化カルシウムとした。

水粉体比は，高炉スラグ微粉末の比表面積が異なることから，結合材となるペーストの流動性が 160±10mm となるように調整した。

本実験で使用したポーラスコンクリートの配合を**表－２**に示す。

**2.3 供試体の作成方法および養生方法**

**(1) 供試体の作製**

ポーラスコンクリートは，所定量の粉体および骨材をミキサ(水平二軸強制練りミキサ，容量 55 リットル)に投入し, 30 秒間空練りを行った後，水を投入し２分 30 秒間の計３分間練り混ぜた。

凍結融解試験用供試体は□100×100×400mm の角柱供試体とし，コンクリートは２層に詰め，各層突き棒により突き固めた。

また，乾湿繰返し試験，耐硫酸塩試験および pH 測定用供試体は，φ100×200mm の円柱供試体とし，コンクリートは３層に詰め，各層突き棒による突固めを行った。なお，供試体の上下面は，ポーラスコンクリートと同配合のペーストによりキャッピングを施した。

**(2) 養生方法**

供試体は，コンクリート打設後，材齢３日まで恒温室内(室温 20℃，湿度 50%)に静置し，脱型後，各試験の開始材齢（材齢 28 日）まで水中

養生(水温 20± 1 ℃)した。

### 2.4 実験項目および方法

#### (1) 圧縮強度試験

ポーラスコンクリートの圧縮強度試験は，JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。

#### (2) 乾湿繰返し試験

乾湿繰返し試験には，自動制御式乾湿繰返し試験装置を使用した。乾湿繰返し条件は，自然環境を配慮し，湿潤条件を 20℃水中，乾燥条件を 40℃気中(45%RH)とした。また，湿潤期間は 1 日，乾燥期間は 2 日で 1 サイクルとし，2 サイクル毎に動弾性係数の測定を行った。なお，測定時の供試体における湿潤状態の変動を抑制するため，水中から取り出した供試体は，30 分間静置し，表面の水分をふき取った後測定を行うこととした。

#### (3) 凍結融解試験

ポーラスコンクリートの凍結融解試験方法はいくつか提案されているが，代表的なものとして水中凍結融解試験方法(A 法)，気中凍結水中融解試験方法(B 法)および CIF 法などがある [3),4)]。本実験では，予備実験において水中凍結融解試験方法を行った結果，供試体の劣化が激しく，実験初期において動弾性係数を測定できなかった。このため，本実験では，気中凍結水中融解試験方法を行った。

凍結融解条件として凍結温度は-18±2℃，融解温度は 5℃±2 とし，凍結融解 1 サイクルに要する時間は，3 時間以上，4 時間以内となるように設定した。

また，劣化の程度はたわみ振動の一次共鳴振動数から相対動弾性係数を計算して評価した。

#### (4) 耐硫酸塩試験

耐硫酸塩試験として，硫酸マグネシウム溶液に対する抵抗性について検討した。浸漬溶液の濃度は 10%とし，総本数 18 本の供試体を 40 リットルの溶液中に全て浸かるように浸漬した。なお，浸漬材齢 28 日毎に溶液交換を行った。

また，劣化の程度は，一次共鳴振動数から相対動弾性係数を計算して評価した。

#### (5) pH 試験

pH 試験として，1 本の供試体(φ100×200mm)を 20 リットルの水中(水道水)に浸漬した場合における pH 値を測定した。測定には pH メータを使用し，浸漬材齢 7 日毎に行った。なお pH 値測定後，容器を洗浄し溶液の交換を行った。

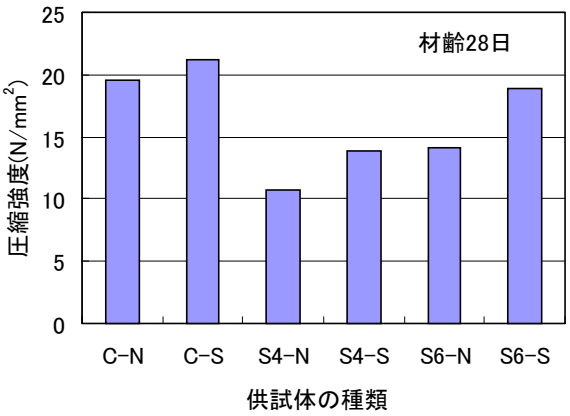
## 3. 結果および考察

### 3.1 圧縮強度

材齢 28 日における圧縮強度試験結果を**図－1**に示す。スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートの圧縮強度は，普通ポルトランドセメントを使用したものより小さくなる。しかし，高炉スラグ微粉末の比表面積を大きくすることで，ある程度強度を改善することができるといえる。

また，いずれの配合においても，スラグ骨材を使用したポーラスコンクリートの圧縮強度が，砕石を使用したものに比較して大きくなっている。一般に砕石の表面はセメントペーストと化学反応を起こさないが，スラグ骨材は化学反応を起こし，その結果，ペーストと骨材との付着力が大きくなったためと考えられる [5)]。

このことから，スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートでは，スラグ骨材の使用および比表面積の大きな高炉スラグ微粉末の使用は，強度改善に有効であるといえる。




**図－1　圧縮強度試験結果**

### 3.2 乾湿繰返しに対する抵抗性

乾湿繰返し試験による動弾性係数の変化を**図－２**に示す。

骨材に砕石を使用したポーラスコンクリートは，結合材の種類に関係なく，乾湿繰返しにより動弾性係数が低下した。特に，その傾向は，結合材としての強度が小さいスラグ石膏セメントを使用したものほど顕著であった。しかし，スラグ骨材を使用したものの低下は緩やかであり，特に，結合材にポルトランドセメントを使用したポーラスコンクリートはほとんど低下しなかった。

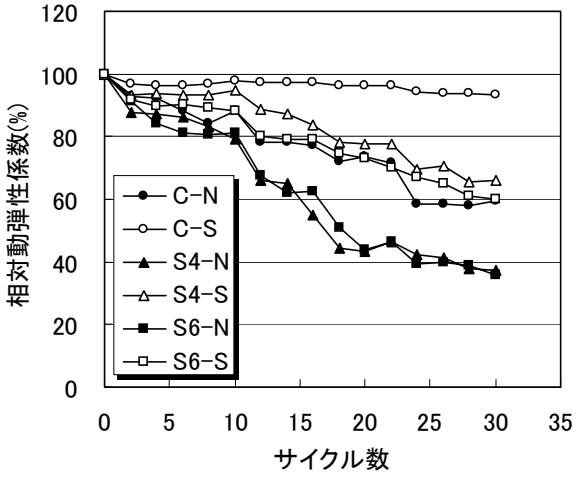
これらのことから，スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートでは，圧縮強度の大きいものほど乾湿繰返しに対する抵抗性が優れているといえる。

### 3.3 凍結融解に対する抵抗性

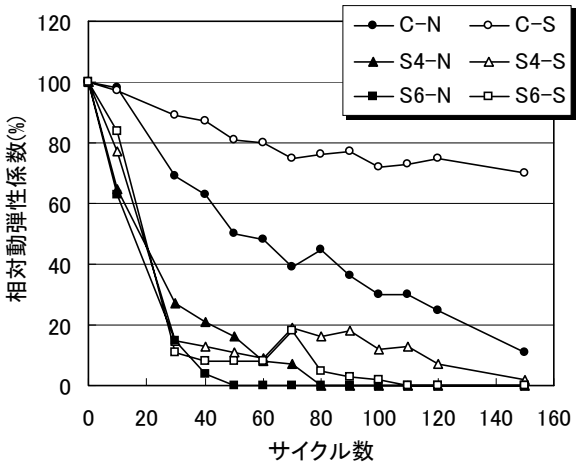
凍結融解試験による動弾性係数の変化を**図－３**に示す。

スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートは，高炉スラグ微粉末の比表面積の大きさおよび骨材の種類に関係なく，普通ポルトランドセメントを使用したものに比較して早期に動弾性係数が低下した。これはスラグ石膏セメントを使用したコンクリートは，気中養生を行った場合，早期に中性化し，コンクリート表面の全空隙が増大することから強度が低下することが報告されており [6]，本試験では気中凍結水中融解試験を適用したことにより，湿潤時間より乾燥時間が長く，その結果，ペーストの中性化が進行し，結合材としての強度が低下したことが原因であると考えられる。

一方，結合材として普通ポルトランドセメントを使用した場合，砕石を使用したポーラスコンクリートの劣化が著しくなっている。ポーラスコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は，圧縮強度に大きく影響され，結合材量を多くし圧縮強度を大きくすることで抵抗性は改善される [7]。本実験では，スラグ骨材を使用したポーラスコンクリートの方が圧縮強度が大きいことが原因であると考えられる。




**図－２　乾湿繰返し試験結果**



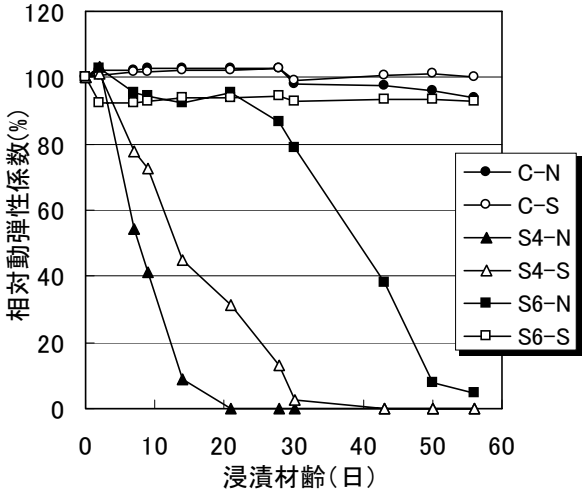

**図－３　凍結融解試験結果**

これらのことから，スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートは，凍結融解に対する抵抗性に劣り，今後はコンクリートとしての強度改善および結合材の表面劣化の抑制について検討する必要がある。

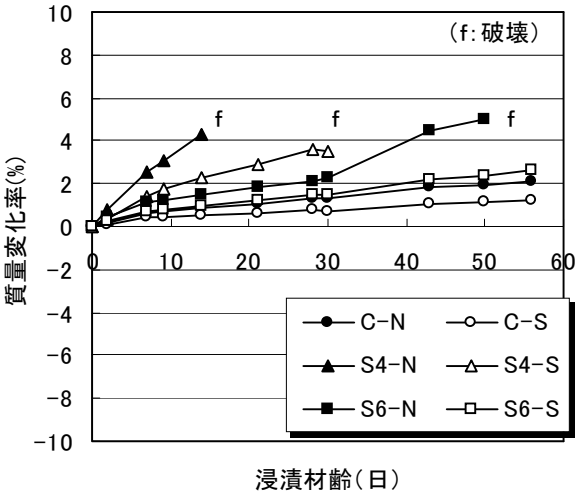
### 3.4 硫酸塩に対する抵抗性

耐硫酸塩試験による動弾性係数の変化を**図－４**に示す。また，質量変化率を**図－５**にそれぞれ示す。

スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートは，ポーラスコンクリートとしての強度の小さい配合から順に動弾性係数が低下した。特に，比表面積 4000cm$^2$/g の高炉スラグ微粉末を使用したものの低下は著しい。




図－４　耐硫酸塩試験結果




図－５　質量変化率

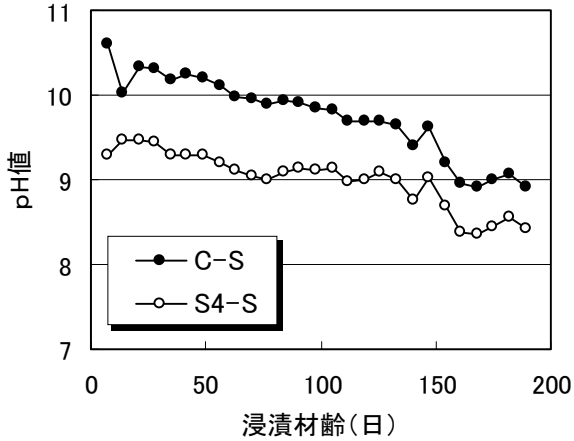
硫酸塩によるコンクリートの劣化は，水酸化カルシウムと硫酸マグネシウムが反応し，石膏および水酸化マグネシウムが生成され，さらに石膏がアルミン酸三石灰と反応することによる体積膨張が原因である[8]。しかし，スラグ石膏セメントはアルミン酸三石灰をほとんど含んでいない[9]ことから，水酸化マグネシウムによる体積膨張が原因であると考えられる。

また，ポーラスコンクリートの質量も普通のコンクリートと同様に増加する傾向が見られた[10]。特に早期に低下したスラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートは質量増加の傾向が著しい。

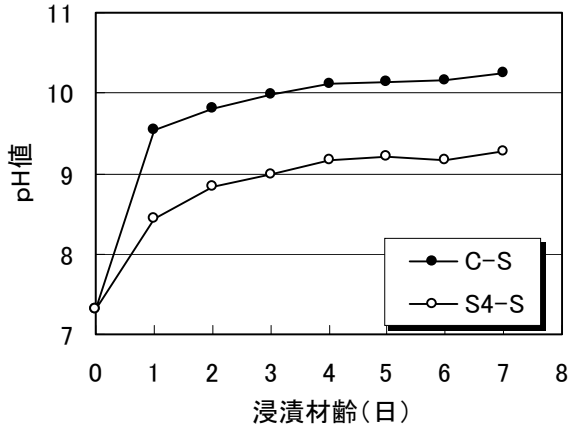
これらのことから，スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートの劣化機構は，普通のコンクリートと異なるものの，強度発現性は水中養生を行うことによりポルトランドセメントを使用したものと同様の傾向を示すことから[11]，ポーラスコンクリートとしての強度を改善することで，耐硫酸塩抵抗性を向上させることができ，海洋構造物への適用も可能であると思われる。

### 3.5 pH 試験

スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートの水中浸漬にともなう溶液の pH 値の変化を**図－６**に示す。また，浸漬材齢 5 週間から 1 日毎に 7 日間測定した変化を**図－７**に示す。




図－６　pH 値の変化




図－７　pH 値の変化(1 週間)

スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートの測定開始時点での pH 値は約 9.4 に対し，普通ポルトランドセメントを使用したポー

ラスコンクリートは約 10.5 であり，pH 値で約 1 の違いが見られる。その後，材齢の経過とともに，いずれのポーラスコンクリートも pH 値が徐々に低下しているが，その差はあまり変わらない傾向を示した。

また，7 日間の傾向を見ると，溶液交換を行った直後から 1 日で急激に pH 値が上昇し，その後 3，4 日でほぼ収束していることが分かる。つまり，比較的早期に水酸化カルシウムが溶出し，飽和していることが分かる。

これらのことから，スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートは，アルカリ分の溶出に伴う水環境への負荷の小さいコンクリートであるといえる。

## 4. まとめ

産業副産物の有効利用と天然資源の温存を目的として，ポルトランドセメントを全く使用しないスラグ石膏セメントを結合材としたポーラスコンクリートの耐久性について実験し，その適用性について検討した。

本実験により得られた結果をまとめると次のとおりとなる。

スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートは，普通ポルトランドセメントを使用したものに比較して凍結融解に対する抵抗性は劣る。しかし，水中浸漬した場合，pH 値の上昇を抑制することができ，また，骨材にスラグ骨材，比表面積の大きな高炉スラグ微粉末を使用することで，圧縮強度，耐硫酸塩抵抗性，乾湿繰返しに対する抵抗性を向上させることができることから，凍結融解作用が起こらない水環境に対する適用性を備え，環境負荷の小さいコンクリートである。

## 参考文献


1) 玉井元治：地球環境とコンクリート―ポーラスコンクリート・エココンクリートがはたす役割―，セメント・コンクリート，No.619，pp.1-9，1998.9
2) 玉井元治：ポーラスコンクリート河川護岸工法の概要，コンクリート工学，Vol.39，No.8，pp.10-15，2001.8
3) ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会：委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.71-77，2003.5
4) 片平博，河野広隆：実環境を考慮したポーラスコンクリートの凍結融解耐久性の検討，セメント技術大会講演要旨，No.55，pp.310-311，2001
5) 依田彰彦：特殊な材料を用いたコンクリート(その 15)高炉スラグ骨材，コンクリート工学，Vol.25，No.2，pp.77-83，1987.2
6) 小林一輔，魚本健人：スラグ石こう系セメントを用いたコンクリートの耐久性，生産研究，32 巻，3 号，pp.4-10，1980.3
7) 玉井元治：まぶしコンクリートの動弾性係数と凍結融解に対する抵抗性，セメント・コンクリート論文集，No.43，pp.376-381，1989
8) 松下博通，中島馨生，白木重治：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの耐薬品性に関する実験的研究，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム，土木学会，pp.135-142，1987.3
9) 小林一輔，魚本健人：高炉水砕スラグと回収石こうによるセメントの大量置換について，生産研究，31 巻，3 号，pp.4-10，1979.3
10) 鳥居和之，川村満紀，谷口裕史：フライアッシュ，シリカフュームの使用によるモルタルの耐硫酸塩性の改善効果，セメント技術年報，No.42，pp.124-127，1988
11) 三岩敬孝，天羽和夫，中本純次，戸川一夫：スラグ石膏セメントを使用したポーラスコンクリートに関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26 ，pp.1449-1454，2004.7