

論文 スラグ系材料を使用したポーラスコンクリートに関する基礎研究

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環境負荷低減を目的として、高炉スラグ微粉末に少量のアルカリ刺激材を使用することで硬化するスラグ石膏セメントに着目し、製鋼スラグ骨材に含まれる遊離石灰等をアルカリ刺激材としたモルタルおよびポーラスコンクリートの諸特性について検討した。その結果、製鋼スラグ骨材に含まれるアルカリ成分が刺激材となり、高炉スラグ微粉末を硬化させることができる。また、硫酸塩に対する抵抗性は、圧縮強度を向上することで改善される可能性が高く、さらに、乾湿繰返しに対する抵抗性は普通ポルトランドセメントとほぼ同様の傾向であることが明らかとなった。

キーワード：ポーラスコンクリート、スラグ石膏セメント、製鋼スラグ骨材、耐久性

1. はじめに

一般に、コンクリートを構成する材料として使用されるセメントは原料となる石灰石が天然資源であり、その生成に伴って排出される CO₂ 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。このため地球環境の保全を目的とし、産業副産物をコンクリート材料として有効利用する研究が盛んとなっている。

鉄鋼業において副産物として生成される鉄鋼スラグは古くからコンクリート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、長期強度の増進や化学抵抗性が大きくなる傾向があり、また、アルカリ骨材反応抑制対策としても利用されている。

また、製鋼スラグは、製鋼工程で生成され、鉄やマンガンなどの金属元素が酸化物の形でスラグ中に取り込まれていることや、副原料である石灰の一部が未消化のまま遊離石灰として残存している。このため密度が大きいことや水と接触した場合、膨張する性質を示すことから、

アスファルト用骨材あるいは道路用路盤材として利用されてきている。

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優しいコンクリートとして舗装、護岸ののり面および魚礁などに利用されてきている。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傾向がある。

そこで、本研究では、天然資源の温存をはかり、環境負荷低減型のコンクリートの開発を目的とし、結合材として高炉スラグ微粉末に少量のアルカリ刺激材を添加したスラグ石膏セメントに着目した。特に、従来から使用されてきた石膏あるいはポルトランドセメントなどのアルカリ刺激材の代替材料として、製鋼スラグ骨材に含まれる遊離石灰等アルカリ成分を利用した天然資源を全く使用せず、産業副産物のみからなるモルタルについて強度および長さ変化特性およびポーラスコンクリートとした場合の強度および耐久性について検討した。

*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)

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材料である高炉スラグ微粉末は、比表面積 $4060\text{cm}^2/\text{g}$ のものを使用した。なお、本実験ではJISの範囲内で使用が認められている石膏が予め添加されているものを使用した。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)ポルトランドセメント:比較用結合材として普通ポルトランドセメント(密度 $3.15\text{g}/\text{cm}^3$)を使用した。

(2) 骨材

モルタル用細骨材として、製鋼スラグ骨材(転炉スラグ、表乾密度 $2.98\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 4.96%、粗粒率 3.25)、ポーラスコンクリート用骨材として製鋼スラグ粗骨材(転炉スラグ、表乾密度 $3.01\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 5.17%、最大寸法 15mm、実積率 60.5%)および兵庫県赤穂産砕石(表乾密度

$2.63\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.56%、最大寸法 15mm、実積率 55.0%)を使用した。なお、いずれの製鋼スラグ骨材もエージング処理したのものを使用した。

2.2 モルタルおよびポーラスコンクリートの配合

(1) モルタルの配合

実験に使用したモルタルの配合は、水粉体比を 32%、モルタル容積中の細骨材容積を 20%の一定とした。また、アルカリ刺激材の有無について検討するため、全粉体質量に対して 4.8%の排煙脱硫石膏および 0.2%の水酸化カルシウムを添加した供試体を作製した。

本実験で使用したモルタルの配合を表 - 2 に示す。

(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、水粉体比を 30%、目標空隙率を 20%の一定とした。また、比較用として普通ポルトランドセメントを使用した配合およびモルタル容積中

表 - 1 高炉スラグ微粉末の化学組成

比表面積 (cm^2/g)	密度 (g/cm^3)	化学組成(%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃
4060	2.89	33.8	13.8	0.1	42.8	5.2	1.9

表 - 2 モルタルの配合条件

配合の種類	水粉体比(%)	ペースト中の各粉体置換率(%)				モルタル中の細骨材容積率(%)	細骨材の種類
		セメント	高炉スラグ微粉末	石膏	Ca(OH) ₂		
S-S	32	0	100	0	0	20	製鋼スラグ
SA-S		0	95	4.8	0.2		製鋼スラグ
C-S		100	0	0	0		製鋼スラグ
C-N		100	0	0	0		川砂

表 - 3 ポーラスコンクリートの配合

配合の種類	目標空隙率(%)	水粉体比(%)	細骨材容積率(%)	単用量(kg/m^3)					
				水	セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材(製鋼スラグ)	粗骨材	
								天然砕石	製鋼スラグ
S-N	20	30	0	121	0	404	0	1418	0
S-S			0	96	0	321	0	0	1785
SM-S			20	77	0	257	123	0	1785
C-N			0	127	423	0	0	1418	0
C-S			0	101	335	0	0	0	1785
CM-S			20	81	268	0	123	0	1785

の細骨材容積を 20%とした配合について検討した。なお、製鋼スラグ骨材に含まれるアルカリ成分を刺激材とするため、水酸化カルシウム等のアルカリ刺激材の添加は行っていない。

本実験で使用したポーラスコンクリートの配合を表 - 3 に示す。

2.3 供試体の作製方法および養生方法

(1) 供試体の作製

1)モルタル供試体の作製

強度試験用モルタル供試体は、JIS R 5201(セメントの物理試験方法)に準じて練り混ぜた後、三連型枠に二層で詰めた。

2)ポーラスコンクリート供試体の作製

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 1 分 30 秒間の計 2 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、圧縮強度試験、乾湿繰返し試験および耐硫酸塩試験用供試体は、100×200mm の円柱供試体とし、コンクリートは 1 層に詰め、振動台(振幅 1mm、3000rpm)で 5 秒間の振動締固めを行った。なお、円柱供試体の上下面は、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

モルタルおよびポーラスコンクリートのいずれの供試体も、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、各試験材齢まで水中養生(水温 20±1℃)を行った。

なお、長さ変化測定用供試体については、脱型後、直ちに第 1 回目の測長を行い、材齢 7 日まで水中養生した後、保存箱(温度 20℃、湿度 58%)で養生した。

2.4 実験項目および方法

(1) 長さ変化試験

モルタル供試体の長さ変化は、JIS A 6202-1997 付属書 1 (膨張剤のモルタルによる膨張性試験方法)に準じた拘束端板を有した場合および自由膨張による場合の 2 種類の方法で測定した。

(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、劣化の度合いは 2 サイクル毎に供試体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。

(3) 凍結融解試験

凍結融解試験には供試体の劣化の度合いを考慮し、気中凍結水中融解試験方法(B 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、全ての供試体を 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。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、溶液から取り出した供試体は 30 分間静置し、表面の溶液を拭き取った後測定を行うこととした。

3. 結果および考察

3.1 強度

モルタル供試体の圧縮および曲げ強度試験結果を図 - 1 にそれぞれ示す。

これらの図より、普通ポルトランドセメントを使用したモルタルに比較していずれの強度も小さいものの、アルカリ刺激材を全く使用せずとも、製鋼スラグ骨材を使用することで、高炉スラグ微粉末は反応し、材齢とともに強度発現するといえる。

また、材齢 28 日における強度は、アルカリ刺

激材を添加した場合より大きい。

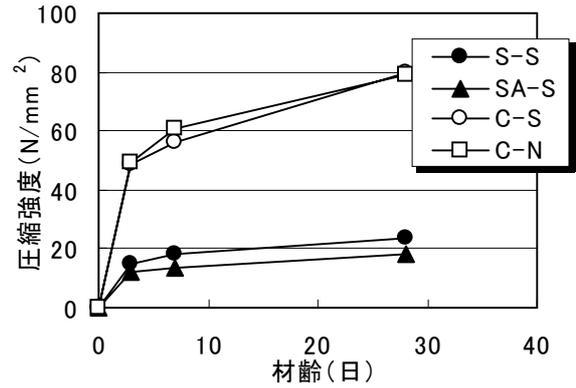
スラグ石膏セメントを使用したコンクリートは、高炉スラグ微粉末の反応に寄与するアルカリ刺激材の添加量によって強度は異なり、過剰添加することによって強度は低下するといわれている¹⁾。今回の配合では、製鋼スラグ骨材に加え、さらにアルカリ刺激材を添加したことにより、モルタル中のアルカリ成分が過剰となり強度が小さくなったものと考えられる。

図 - 2 に材齢 28 日におけるポーラスコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

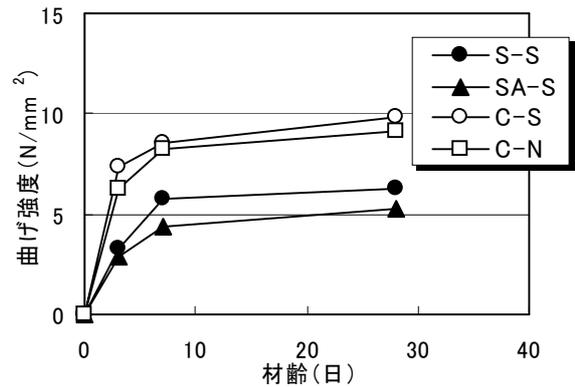
結合材にスラグ石膏セメント、粗骨材に天然砕石を使用したポーラスコンクリートは、材齢 3 日の脱型時には硬化しなかった。一般にスラグ石膏セメントを使用したコンクリートは強度発現が遅く、かつ、アルカリ刺激材は初期強度発現に大きく寄与している。天然砕石からは反応に必要なアルカリ成分が溶出されないため硬化しなかったものと考えられる。このことから、上述したように、製鋼スラグ骨材は、高炉スラグ微粉末の反応に寄与しているといえる。

また、天然砕石と製鋼スラグ骨材を比較すると製鋼スラグ骨材を使用した方は、圧縮強度が小さくなっている。一般に、骨材としてスラグ骨材を使用した場合、天然砕石を使用したコンクリートに比較して強度は大きくなる。これは、天然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、また、骨材表面に凹凸があること等から、ペーストとの付着力が大きくなるためといわれている²⁾。本実験で使用した製鋼スラグは、天然砕石に比較して実積率が大きいことから、配合上水粉体比を一定としたことにより単位セメント量が減少した。このため、特に細骨材を使用した配合では、強度の低下が著しい。

強度を向上させるためには単位結合材量を増加し、さらに、製鋼スラグ骨材は、表面に微粒分が付着している場合が多く、本実験でも破壊面を観察すると、骨材とペーストが剥離しており、ペースト側の剥離面には、骨材に付着して



(a) 圧縮強度試験結果



(b) 曲げ強度試験結果

図 - 1 強度試験結果 (モルタル)

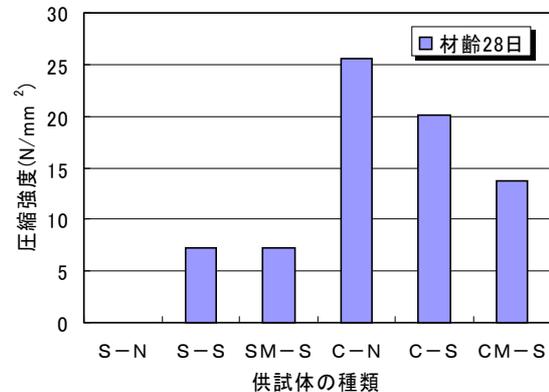


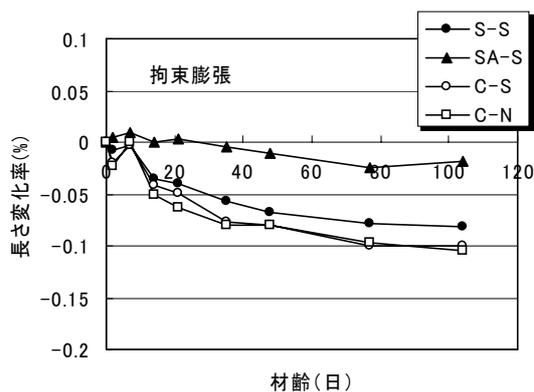
図 - 2 圧縮強度試験結果 (ポーラスコンクリート)

いた微粒分がそのまま付着していたことから骨材表面の微粒分の除去等の対策が必要であると考えられる。

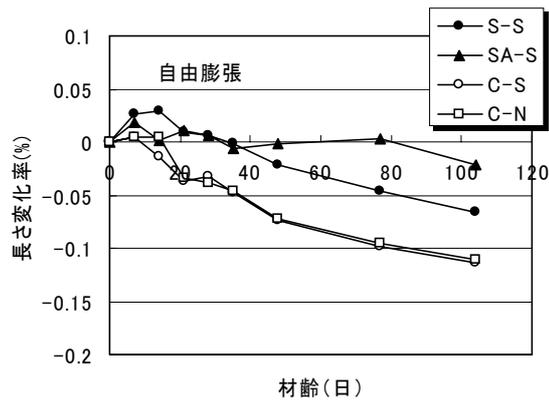
3.2 膨張量試験による長さ変化

図 - 3 に膨張量試験によるモルタルの長さ変化を示す。

製鋼スラグ骨材を使用したコンクリートは、骨材中の遊離石灰が水と反応し膨張するといわ



(a) 両端拘束膨張



(b) 自由膨張

図 - 3 長さ変化試験結果

れている³⁾。しかし、本実験で使用したモルタルは全ての配合について、材齢初期では若干膨張しているものの長期材齢では逆に収縮する結果となった。初期材齢での膨張は、水中養生による膨潤および高炉スラグ微粉末中のアルミナの反応による膨張が考えられる。長期材齢では、今回のモルタルがポーラスコンクリートへの適用を考慮し、水粉体比を 32%と非常に小さくしていることから、膨張に必要な水量が少なく、さらに自己収縮が大きいと考えられる。また、普通ポルトランドセメントを使用したモルタルに比較して、スラグ石膏セメントを使用したモルタルは、収縮量が小さくなっている。スラグ石膏セメントを使用したコンクリートは気中に曝されると、水分が逸散することにより表面が多孔質となり、早期に炭酸化する⁴⁾。その結果、コンクリート中のアルカリ度が低下し反応速度が低下したためと考えられる。

3.3 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 - 4 に示す。

この図より、結合材として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乾湿繰返し 30 サイクル経過後、若干動弾性係数は低下しているものの、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とほぼ同様の傾向を示した。

3.4 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 -

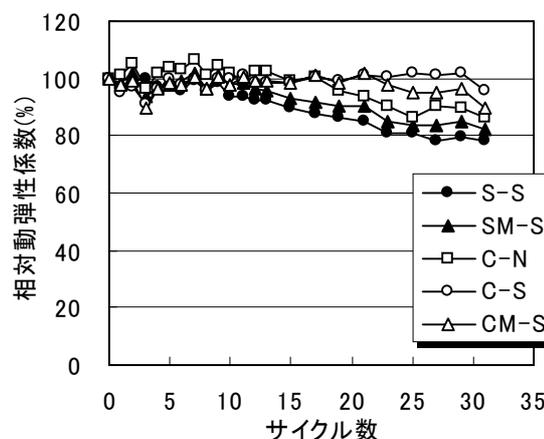


図 - 4 乾湿繰返し試験結果

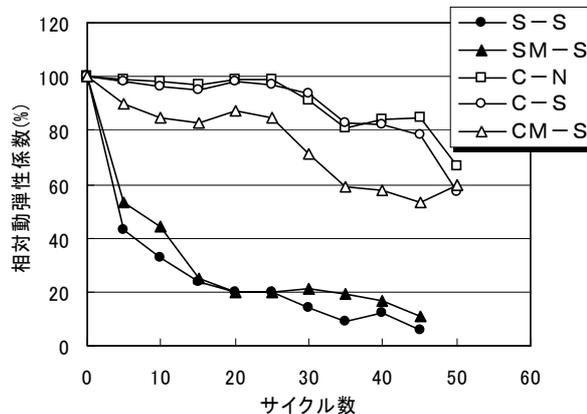


図 - 5 凍結融解試験結果

5 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、結合材にペーストおよびモルタルを使用したいずれの配合も、早期に動弾性係数が低下した。

スラグ石膏セメントを使用したコンクリートでは、普通コンクリートに比べて、空気量を大きくすることで凍結融解に対する抵抗性が向上

することが報告されているが，そのためには水粉体比を小さくし，強度を大きくする必要があり，このため，スラグ石膏セメントを凍結融解作用の厳しい構造物に用いることは不利であるとされている¹⁾。

特に，ポーラスコンクリートは多孔質であり表面積が大きくなることから，気中凍結水中融解試験では，供試体が気中に曝されることにより強度が低下することが考えられる。

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の凍結融解に対する抵抗性は劣ると判断できる。

3.5 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 - 6 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ポーラスコンクリートとして強度の小さい配合から順に動弾性係数が低下した。

圧縮強度は，使用する高炉スラグ微粉末の粉末度を大きくすること等で改善できることから⁵⁾，ポーラスコンクリートとしての強度を改善することで，耐硫酸塩に対する抵抗性を向上させることができると考えられる。

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，製鋼スラグ骨材に含有している遊離石灰等をアルカリ刺激材としたポルトランドセメントを全く使用しないモルタルの強度およびポーラスコンクリートの強度および耐久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。

(1) 製鋼スラグ骨材は，その骨材に含まれる遊離石灰等のアルカリ成分が刺激材となり，スラグ石膏セメントを硬化させることができる。

(2) 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とした場合，凍結融解に対する抵抗性は劣る。しかし，硫酸塩に対する抵抗性は，圧縮強度を向上することで改善される可能性が高く，さらに，乾湿繰返しに対する

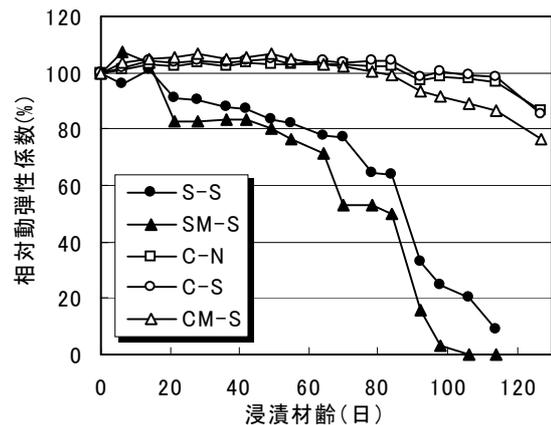


図 - 6 耐硫酸塩試験結果

抵抗性は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とほぼ同様の傾向を示した。

参考文献

- 1) 小林一輔，魚本健人：高炉水砕スラグ・排煙脱硫せっこう系セメントを用いたコンクリートの諸問題とその対策，セメント・コンクリート，No.409，pp-8-15，1981.3
- 2) 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
- 3) セメント協会：C&C エンサイクロペディア，1996
- 4) 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
- 5) 三岩敬孝，天羽和夫，横井克則，中本純次：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1285-1290，2005