

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に関する基礎研究

三岩 敬孝^{*1}・天羽 和夫^{*2}・中本 純次^{*3}・戸川 一夫^{*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、骨材にもスラグ骨材を使用したポーラスコンクリートの作製と強度に及ぼす養生条件の影響について検討した。その結果、スラグ石膏セメントを結合材としてポーラスコンクリートを作製することは可能であるものの、水酸化カルシウムを全く使用しない場合、初期強度が小さく、水中養生から気中養生に移した場合、強度が低下する。しかし、少量の水酸化カルシウムを使用することによって、セメントを使用したポーラスコンクリートと同等の圧縮強度を得ることができる。

キーワード：高炉スラグ微粉末，ポーラスコンクリート，養生方法，圧縮強度，スラグ骨材

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 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。

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。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，耐海水性や化学抵抗性が大きく，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り面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。

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を目的とし，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石膏を加え，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に着目した。そして，粗骨材にもスラグ骨材を使用して，ポルトランドセメントを全く使用せず，産業副産物のみからなるポーラスコンクリートを製造し，強度や中性化などに及ぼす養生条件の影響等の諸特性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(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，一般に使用されている粉末度がス

*1 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科助手 博(工) (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) (正会員)

*3 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科助教授 博(工) (正会員)

*4 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科教授 工博 (正会員)

表 - 1 高炉スラグ微粉末の化学組成

粉末度 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	化学組成 (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃
4040	2.89	32.8	13.6	0.2	42.4	5.8	2.0

スラグ 4000cm²/g 程度のものを使用した。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) 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/cm³、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) 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/cm³, 吸水率 2.93%, 粗粒率 6.67, 最大寸法 15mm, 実積率 54.6%)を使用した。

2.2 ペーストおよびポーラスコンクリートの配合

(1) ペーストの配合

ポーラスコンクリートの結合材となるペーストの配合は、水粉体比を 30%の一定とし、粉体質量に対し、0, 5, 10 および 15%の石膏を使用した。さらに粉体質量に対して 5%の石膏を使用した配合に対して、0, 0.1, 0.2 および 0.3%の水酸化カルシウムを使用した。

また、ポーラスコンクリートの配合は、水粉

体比を 30%とし、粉体質量に対して 5%の石膏を使用したもの、さらに、0.2%の水酸化カルシウムを使用したものおよび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について検討した。

なお、目標空隙率はそれぞれの配合に対して 15, 20 および 25%とした。

実験に使用したペーストの配合条件およびポーラスコンクリートの配合を表 - 2 および表 - 3 にそれぞれ示す。

表 - 2 ペーストの配合条件

配合記号	水粉体比 (%)	置換率 (%)				
		セメント	スラグ	石膏	Ca(OH) ₂	
S100-0-0	30	0	100	0	0	
S95-5-0			95	5		0.1
S95-4.9-0.1				4.9		
S95-4.8-0.2				4.8	0.2	
S95-4.7-0.3				4.7		
S90-10-0			90	10	0	
S85-15-0			85	15		
C			100	0	0	

表 - 3 実験で使用したポーラスコンクリートの配合

配合記号	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	
S95-5-0	15	5	0	30	140	0	443	23.3	0	1450	
	20				117		370	19.5			
	25				94		297	15.6			
S95-4.8-0.2	15	4.8	0.2		140		444	22.4	0.941		
	20				117		371	18.7	0.786		
	25				94		298	15.0	0.632		
C	15	0	0		148		492	0	0		0
	20				123		411				
	25				99		330				

2.3 供試体の作成方法および養生方法

(1) 供試体の作製

ペーストは、JIS R 5201(セメントの物理試験方法)に準じて練り混ぜた後、50×100mmの円柱型枠に1層で詰めた。

ポーラスコンクリートは、所定量の粉体およびスラグ骨材をミキサ(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。供試体は100×200mm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。

(2) 養生方法

ペースト供試体は、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの初期強度発現が遅れることを考慮し、型枠にペースト打設後、表面をシートで密封し材齢7日まで恒温室(室温20℃、湿度50%)に静置した。そして、脱型を行い、以後、所定の材齢まで水中養生(水温20±1℃)および気中養生(室温20℃、湿度50%)を行った。

ポーラスコンクリート供試体に対する養生方法は、水中養生(水温20±1℃)、気中養生(室温20℃、湿度50%)、湿布養生および途中気中養生(材齢28日まで水中養生した後、気中養生を実施)の4種類とした。水中養生および途中気中養生用供試体は、材齢3日まで恒温室内(室温20℃、湿度50%)に静置した後、型枠のまま水中養生に供し、気中養生および湿布養生用供試体は材齢7日まで恒温室に静置した。

なお、脱型はペースト供試体と同様に材齢7日とし、湿布養生用供試体は材齢7日より湿布した。

3. 結果および考察

3.1 ペーストの流動性

ポーラスコンクリートの作製上重要な性能であるペーストの流動性についてフロー試験結果を図-1および図-2にそれぞれ示す。

これらの図より、水粉体比を一定としているものの、石膏の置換率を増加させるとフロー値

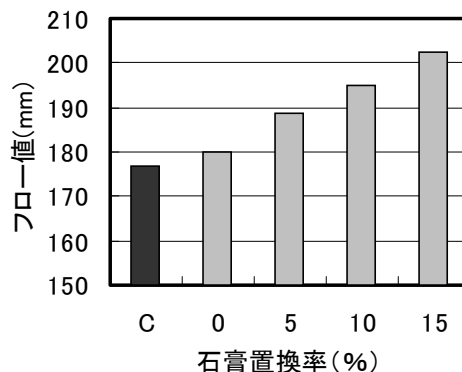


図-1 石膏置換率とフロー値との関係

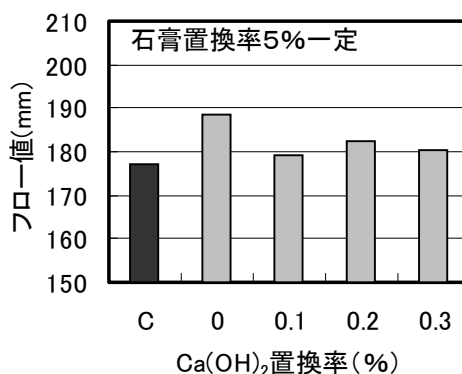


図-2 Ca(OH)₂置換率とフロー値との関係

が増加する傾向にある。しかし、石膏置換率5%の配合に対してさらに水酸化カルシウムを置換した場合には、その使用量がごく少量であることからフロー値に影響を及ぼさないことがいえる。

また、セメントのみを使用したペーストとほぼ同等のフロー値を示した。

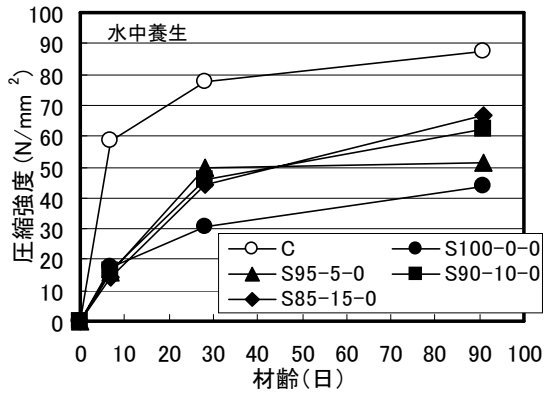
3.2 ペースト強度

(1) 養生条件の影響

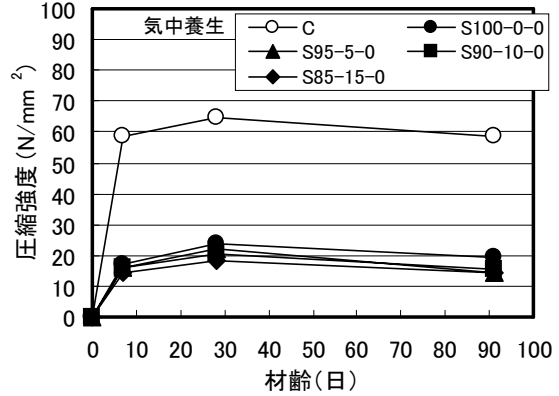
養生条件の影響として、水中養生および気中養生を行った場合における材齢とペースト強度との関係を図-3および図-4にそれぞれ示す。

いずれの配合においても、セメントを使用したペーストに比較してスラグ石膏セメントを使用したペーストの圧縮強度は小さくなる。

しかし、水酸化カルシウムを使用し水中養生を行った場合、良好な強度発現が見られ、粉体質量に対して0.1%の水酸化カルシウムを使用することによって、材齢28日で50N/mm²を越える高強度が得られることが分かった。特に水酸化カルシウムを使用した場合、使用しない配合に

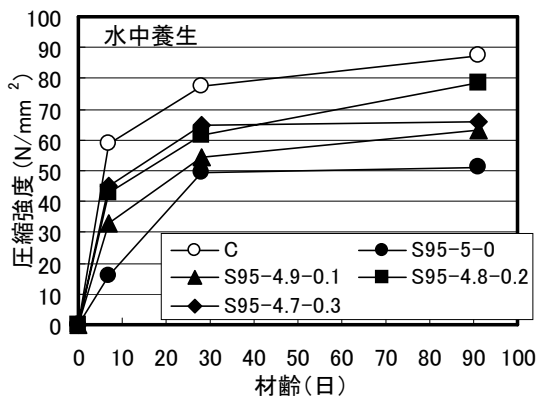


(a) 水中養生

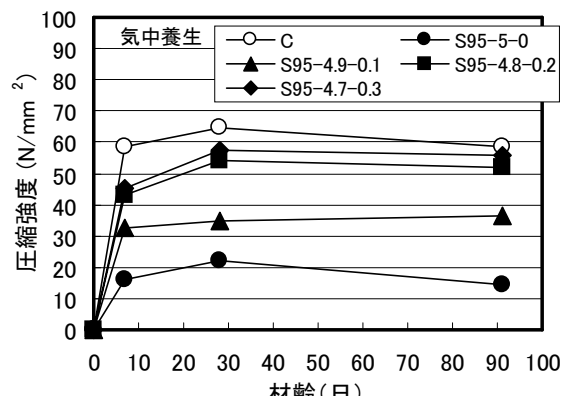


(b) 気中養生

図 - 3 材齢とペースト強度との関係 (石膏の影響)



(a) 水中養生



(b) 気中養生

図 - 4 材齢とペースト強度との関係 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ の影響)

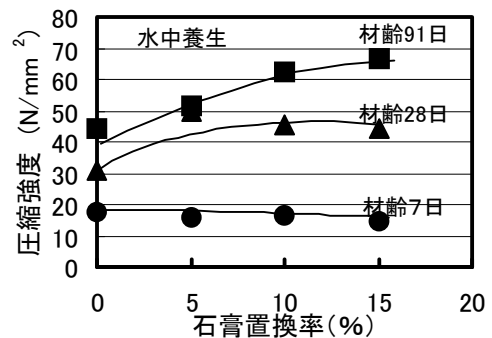
比較して初期強度発現が大きいことがいえる。

また、同配合の供試体に対して気中養生を行った場合、強度発現性が著しく低く、長期強度の増進が見られない。これは、高炉スラグ微粉末は、潜在水硬性を有し、アルカリに刺激されて水硬性を発揮する特性をもち、このため、強度発現するためにはコンクリート中をアルカリ状態にする必要がある。しかし、初期養生から気中状態にさらされることにより、反応に必要な水分が逸散し、さらに、空気中の炭酸ガスによる中性化が進行したためと考えられる。

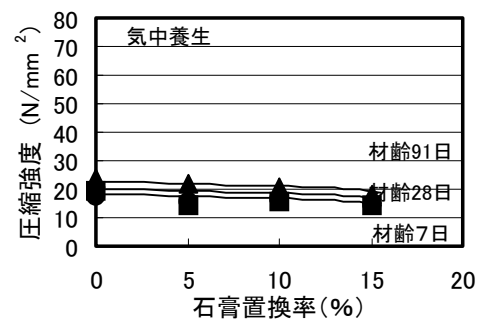
(2) 石膏置換率の影響

全粉体量に対する石膏置換率の影響について図 - 5 に示す。

気中養生を行った場合、石膏置換率が強度に及ぼす影響はほとんどないといえる。しかし、水中養生を行うと石膏置換率が大きいほど長期強度の増大が著しい。



(a) 水中養生



(b) 気中養生

図 - 5 石膏置換率の影響

(3) Ca(OH)₂ 置換率の影響

Ca(OH)₂ 置換率の影響について図 - 6 に示す。

アルカリ刺激剤として少量の水酸化カルシウムを使用すると強度が著しく増加する。特に初期強度の改善に寄与しているといえる。

また、長期強度の増加は見られないものの、気中養生を行っても、水酸化カルシウムを 0.2% 使用することにより、材齢 28 日において 50N/mm² を越える高強度が得られることが分かった。

(4) 中性化深さ

材齢 175 日における中性化深さを図 - 7 に示す。

スラグ石膏セメントの中性化速度は非常に速いとの報告¹⁾があるように、本実験においても水酸化カルシウムを混入していない配合においては中性化の進行が著しく、水酸化カルシウム置換率を増加するほど、中性化の進行を抑制することが出来ることが分かった。

特に、気中養生における強度低下は、図 - 7 に示すように、中性化が進行することにより、高炉スラグ微粉末の反応が停止もしくは遅延されているためと考えられる。

3.3 ポーラスコンクリートの強度

(1) 材齢と圧縮強度との関係

図 - 8 に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材齢と圧縮強度との関係を示す。

水酸化カルシウムを使用しない場合、初期強度発現は小さいものの、長期にわたって強度増加が見られる。また、水酸化カルシウムを 0.2% 混入したポーラスコンクリートは、材齢 7 日ではセメントを使用したポーラスコンクリートに比較して強度は小さいものの、材齢 28 日では同等、さらに、長期材齢ではセメントを上回る強度発現が見られた。

これらのことから、結合材であるペーストの強度特性(たとえば図 - 4)についても考慮すると、水酸化カルシウムを 0.2% 混入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、

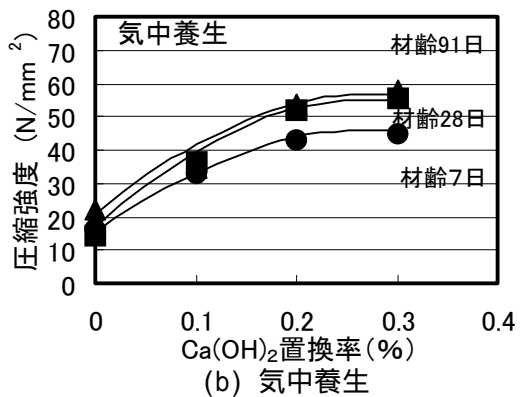
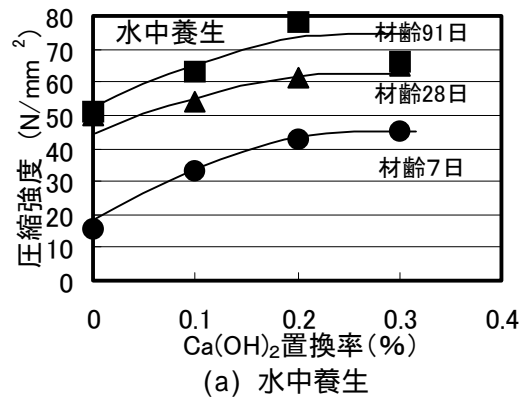


図 - 6 Ca(OH)₂ 置換率の影響

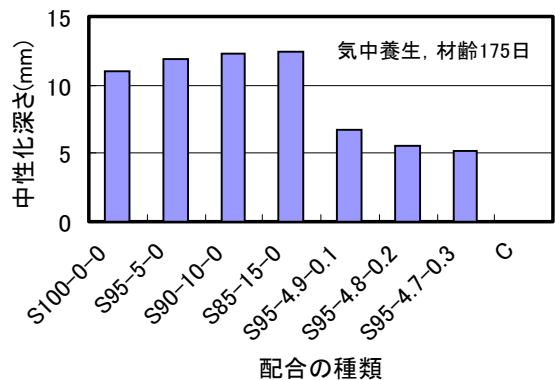


図 - 7 中性化深さ

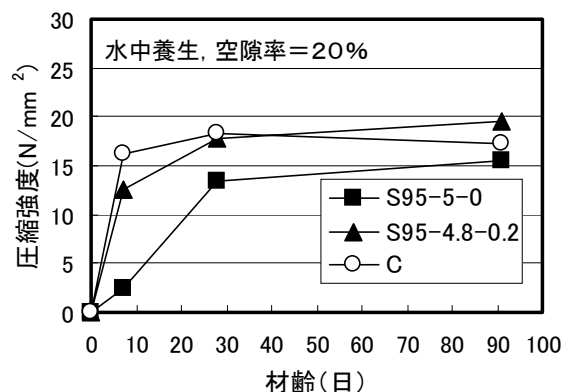
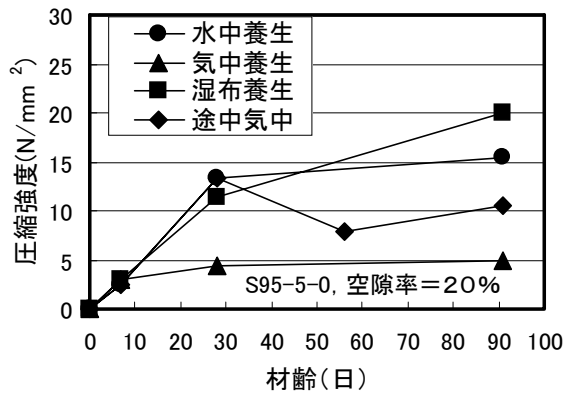
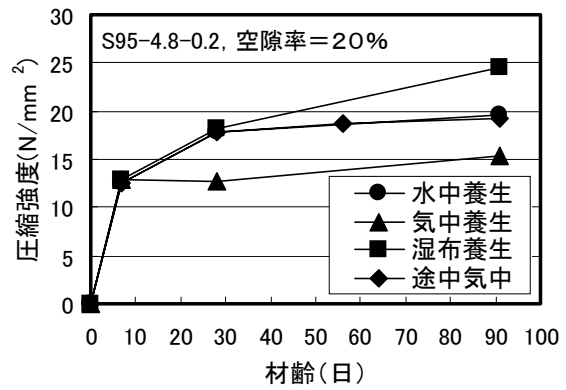


図 - 8 材齢と圧縮強度との関係



(a) Ca(OH)₂を使用しない場合



(b) Ca(OH)₂を0.2%使用した場合

図 - 9 養生条件の影響

セメントを使用したポーラスコンクリートとほぼ同等の圧縮強度を有することがいえる。

(2) 養生条件の影響

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に及ぼす養生条件の影響について図 - 9 に示す。

水酸化カルシウムを使用しない場合、ペーストの強度特性と同様に、気中養生では強度増進が見られない。また、水中養生から気中養生へ移行(途中気中)した場合、強度が低下した。

一方、水酸化カルシウムを混入したポーラスコンクリートの強度低下は見られず、長期にわたって強度増進が見られる。これは、あらかじめ使用された水酸化カルシウムによりコンクリート中がアルカリ状態で保持されたためと考えられる。

また、いずれの配合においても、湿布養生を行った場合、長期強度の増加は著しい。これは、水中養生に比較して湿布養生は、コンクリート表面から溶出された水酸化カルシウムが、コンクリート表面にとどまり、その結果、表面が高アルカリ状態で保持されたためと考えられる。

(3) 空隙率の影響

水酸化カルシウムを0.2%混入したポーラスコンクリートの強度に及ぼす空隙率の影響について図 - 10 に示す。

一般に空隙率の大きなコンクリートの圧縮強度は小さい。本実験においても、同様の結果が得られた。

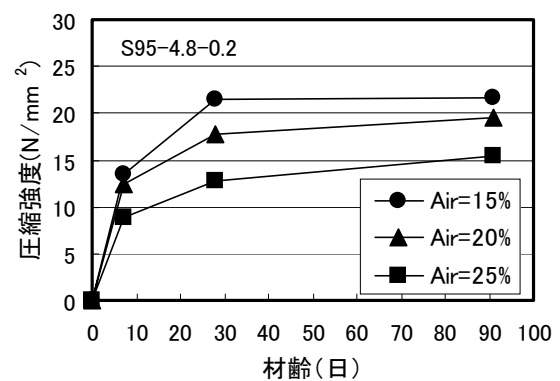


図 - 10 空隙率の影響

4. まとめ

本実験結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 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てポーラスコンクリートを作製することは可能である。
- (2) 水酸化カルシウムを全く使用しない場合、中性化速度が速い。また、初期強度が小さく、水中養生から気中養生に移した場合にも強度が低下する。
- (3) 少量の水酸化カルシウムを使用することによってセメントを使用したポーラスコンクリートと同等の圧縮強度を得ることができる。
- (4) 強度発現は湿布養生が最も大きい。

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