

[33] スラグセメントを用いたコンクリートに関する基礎的研究

正会員 ○渡 辺 明 (九州工業大学)
 正会員 高 山 俊 一 (同上)
 高 倉 篤 (同上)

1. まえがき

最近、限りある資源の有効利用が叫ばれ、建設材料分野では、産業廃棄物を積極的に利用するための実験研究が盛んに行なわれている。著者らは、数年前より微粉末の高炉水さいと石膏、消石灰などと混合し、ポルトランドセメントを全く使用しないスラグセメントを作製し、その品質試験を行ってきた。その結果、スラグセメントは水和熱が極めて小さく、水セメント比50%のスラグセメントコンクリート（以下 スラグコンクリートとする）は材令28日で335 kg/cm²、91日で413 kg/cm²の圧縮強度を示し、セメントとして使用可能な見通しを得ることができた。¹⁾²⁾本報告では、微粉末水さいに、スラグと同様再利用率が急がれている排煙脱硫石膏を混入したスラグセメント、およびそれを用いたスラグコンクリートの諸性質について述べる。

2. 実験概要

2.1 使用材料 実験には、微粉末高炉水さい（略称 水さい、比重2.90、粉末度3840 cm²/g、塩基度1.90）、高炉セメントC種（略称 高炉セメント、比重2.99、粉末度3920 cm²/g）および脱硫石膏（荊田産 比重2.32、粉末度1390 cm²/g、PH6.67、化合水20.39%；豊前産 比重2.27、粉末度460 cm²/g、PH6.61、化合水20.63%；住金産 比重2.33、PH8.25、化合水22.0%）を用いた。脱硫石膏は湿っており、付着水にはばらつきがみられるので約55°Cで20時間乾燥させた後、0.6mmフルイでふるい、通過したものを使用した。細骨材は海砂（比重2.48、粗粒率2.99）を、粗骨材は碎石（硬質砂岩、最大寸法20mm、比重2.73、粗粒率6.70）を使用した。混和剤には減水剤（ポゾリスNO.5Lを規定量）とAE剤（ポゾリスNO.114）を使用した。

2.2 実験方法 モルタルの強度試験、まだ固まらないコンクリートの試験、硬化したコンクリートの試験など各試験はJIS等に準じて行なった。コンクリートの配合を表-1に示す。水さい、脱硫石膏および消石灰の総量をセメントとし、水和反応がスムーズに進行するように計量後、パンで充分から練りを行なってミキサに投入した。スラグセメントとの比較のため、高炉セメントC種についても同時に試験を行なった。なお、表-1の配合は混和剤を使用せず、目標スラング10cmとして行なったものである。

3. スラグセメントに関する結果考察

3.1 水さい-脱硫石膏-消石灰からなるスラグセメントに関する考察 水さい-石膏-消石灰の配合と曲げ強度の関係を図-1に示す。同図によると、消石灰が微量でも混入されると曲げ強度の低下がみられるが、水さいと石膏の比が8:2および7:3の配合では、消石灰0%の強度に比べると、2%以上になるとわずかに1/2以下に低下しているのが特に目立っている。他方、水さいと石膏が9:1の配合では、消

表-1 コンクリートの配合

コンクリートの種類	W/C (%)	S/A (%)	単位重量 (kg/m ³)					
			水	水さい	脱硫石膏	細骨材	粗骨材	
スラグセメント	9:1	40	38	188	424	47	588	1059
		45	38	188	376	42	615	1051
		50	39	189.5	341	38	643	1053
		55	40	191	312	35	669	1051
		60	41	192.5	289	32	694	1046
		65	42	194	269	30	717	1038
		8:2	55	40	191	278	69	666
87:10:3 ⁽ⁱ⁾	50	39	189.5	329	38	633	1094	
高炉セメントC種	50	46	185	370		765	992	
	55	47	191	347		794	978	
普通ポゾラド	55	42	201	366		700	1051	

(i) 水さい:脱硫石膏:セメント = 87:10:3
 (ii) セメント

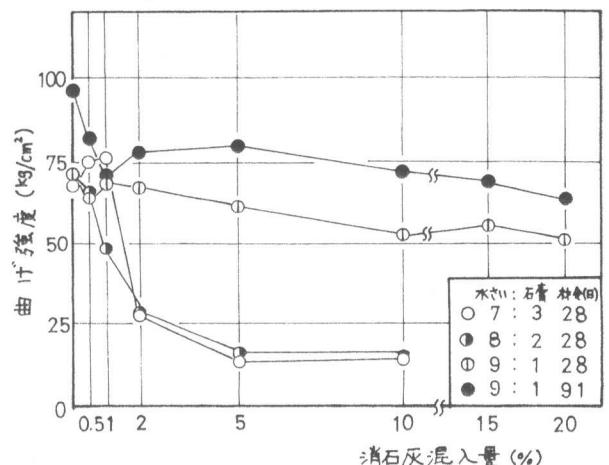


図-1 曲げ強度と消石灰混入量との関係

灰が混入されると強度低下がみられるが、20%程度の低下にとどまっている。

3.2 脱硫石膏のばらつき 脱硫石膏は重油使用産業から排出されるため、各会社によってかなり相異があるものと考えられ、モルタルの強度試験を行なってみた。曲げ強度と材令の関係を図-2に示す。フロー値は3者とも220前後で石膏による違いはみられない。同図によると、豊前石膏セメントの強度が最も大きいが、いずれのセメントも強度の伸びが順調であり、この程度の強度の違いはポルトランドセメントにもよくみられるものと考ええる。

4. まだ固まらないスラグコンクリートの諸性質

4.1 空気量 表-2に凍結融解試験に使用したコンクリートの空気量、スランプ等を示す。同表によると、減水剤を混和したスラグコンクリートの空気量は1~2%であるが、高炉セメントは5.6%であり、スラグコンクリートは高炉セメントに比べて空気量が少ないようである。そこで、

表-2 まだ固まらないコンクリートの諸性質

番号	コンクリートの種類	混和剤	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	フリージング率 (%)	コンクリート温度 (°C)
1	スラグセメント 9:1	NO.5L	45	11.3	1.8	11.5	14.8
2		NO.5L	50	17.4	1.2	23.2	15.9
3		なし	50	6.3	1.1	9.87	15.7
4		NO.5L+AE剤	50	14.8	2.4	15.4	15.5
5		NO.5L+AE剤	50	16.4	4.6	9.1	14.0
6		NO.5L	40	16.2	2.4	11.9	13.5
7	87:10:3	NO.5L	50	16.0	2.2	14.6	13.0
8	高炉セメントC種	NO.5L	50	14.6	5.6	4.2	13.5

表-2 まだ固まらないコンクリートの諸性質
ポルトランドセメントコンクリートでは5%以上の空気量が期待できるAE剤を混和したところ、2.4% (配合4) しか発生せず、さらに量を増して2倍に

すると4.6% (配合5) となった。高炉セメントではスラグ量が多いほど空気が連行しにくいことが明らかにされているが、本研究のようにスラグ量が極めて多い場合には、その傾向も一層著しくなるようである。

4.2 ブリージング率 ブリージング率とスランプの関係を図-3に示す。図中の数字は空気量を示す。同図によると、スランプが大きくなるとブリージングも大きくなるようである。高炉セメントのブリージング率はスラグセメントより小さいが、これには空気量が影響しているものと考えられる。

5. 硬化したスラグコンクリートの諸性質

5.1 スラグコンクリートの長期強度および養生方法 水中、気中の各養生による圧縮強度と長期材令の関係を図-4に示す。同図によると、水中養生を行なったスラグコンクリートの強度の伸びは順調であり、57週強度は水セメント比45%で549 kg/cm²、水セメント比50%で467 kg/cm²と、水セメント比55%の高炉セ

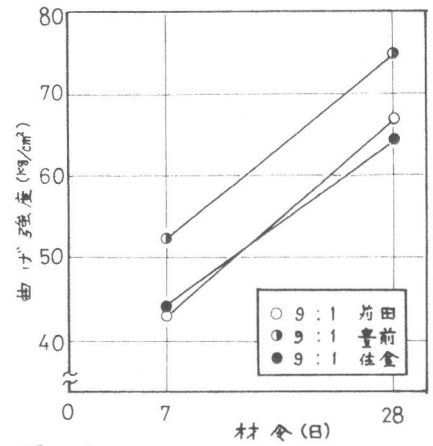


図-2 モルタルの曲げ強度と材令の関係

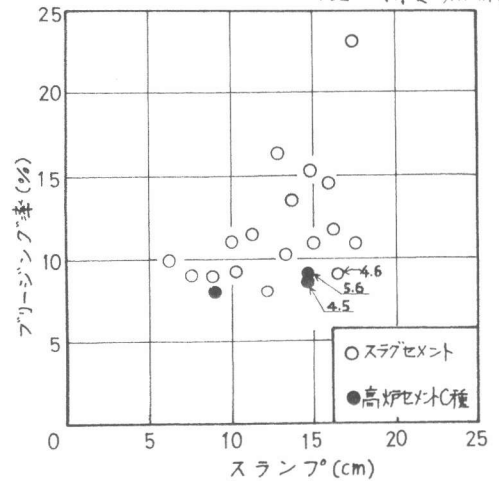


図-3 ブリージング率とスランプの関係

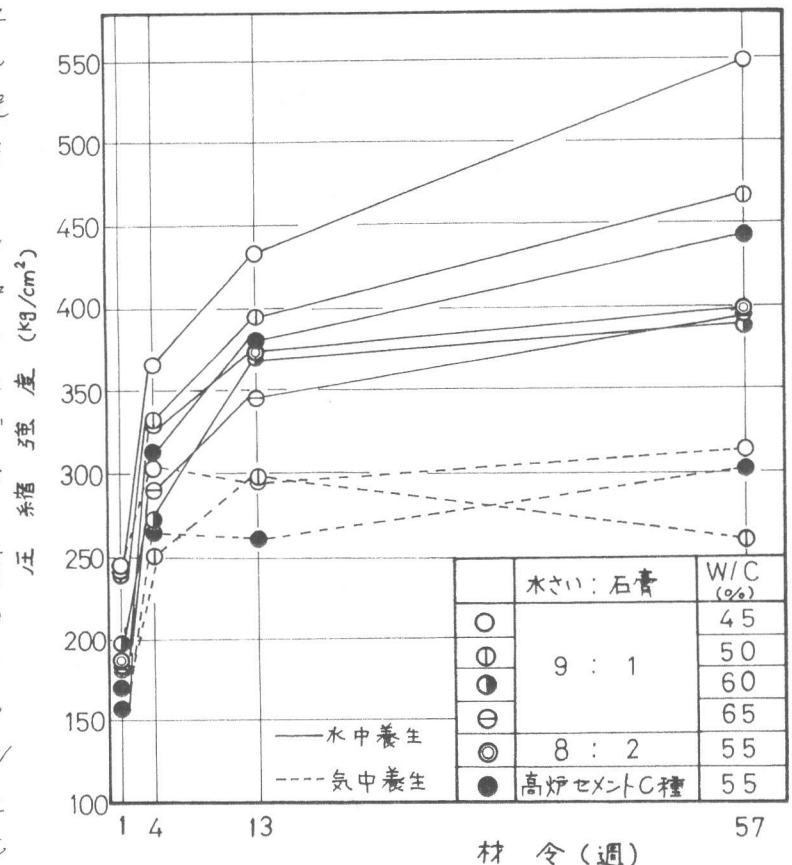


図-4 圧縮強度と材令の関係

メントコンクリートの強度を上回っている。水セメント比65%のスラグコンクリートでも 394 kg/cm^2 となり、高炉セメントと同様に強度が長期にわたって伸び、スラグコンクリートの長をもよく現わしている。同図に示されているように、微粉末高炉水いと脱硫酸石膏は化学的に長期でも安定しており、スラグセメントとして優れた組合せであると考えられる。供試体脱型後、恒温室(20±1°C)で気中養生(湿度60~70%)を継続したスラグコンクリートの強度は、4週までかなりの伸びが認められるが、以後ほとんど伸びない。しかしながら、高炉セメントも同様な傾向がみられており、スラグコンクリートだけが気中養生に対して劣るものではないと考えられる。

5.2 引張強度・曲げ強度 引張強度と圧縮強度の関係を図-5に示す。図中の回帰直線は、高炉セメントを除いたスラグコンクリートのみについて求めたものである。スラグコンクリートの引張強度は、圧縮強度 500 kg/cm^2 程度までは比例的に大きくなり、高炉セメントは比べ若干大きい。また、スラグコンクリートのせい度係数は9~12.5となり、圧縮強度 $300 \sim 400 \text{ kg/cm}^2$ では普通コンクリートと同程度かいく分大きいようである。スラグコンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係も図-6に示す。引張強度と同様に曲げ強度も圧縮強度の増加につれて大きくなり、曲げ強度と圧縮強度の比は普通コンクリートとほとんど変わらない。

5.3 耐久性 スラグコンクリートの耐久性試験として、凍結融解試験と中性化試験を行なった。

(1) 凍結融解試験 相対動弾性係数とサイクル数の関係を図-7に示す。同図によると、空気量が大きな配合8および配合5の各コンクリートでは相対動弾性係数の低下が少ない。逆に空気量が小さく、ブリージング率が大きな配合7、2および3の各コンクリートは、わずか30~50サイクルでたわみ振動数が測定できないほどに劣化した。図-8にはコンクリート重量減少率とサイクル数の関係を示す。ブリージング率が大きな配合2、7および混和剤を混和していない配合3で重量減少率が大きくなっている。120サイクルで配合2および7は供試体が2~3個に割れ、配合6は両端の角は落ち、手で触れるとコンクリートが欠けるほどに劣化した。配合6の相対動弾性係数はかなり低下しているが、重量減少率はほとんど変わらず、コンクリート表面にも変化はなかった。

このような現象は、%の小さいコンクリートではよくみられる。耐凍結融解に優れたスラグコンクリートを作製するには、空気量5%程度を混入したAEコンクリートとすべきであろう。

(2) 中性化試験 種々の養生・材令を行なった供試体の中性化試験結果を表-3に示す。試験には通常使用されているフェノールフタレン(PH10.0以上)のほか、チモールブルー(PH9.6以上)およびフェノールレッド(PH8.4以上)を用いた。試験は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱形を用い、割裂し

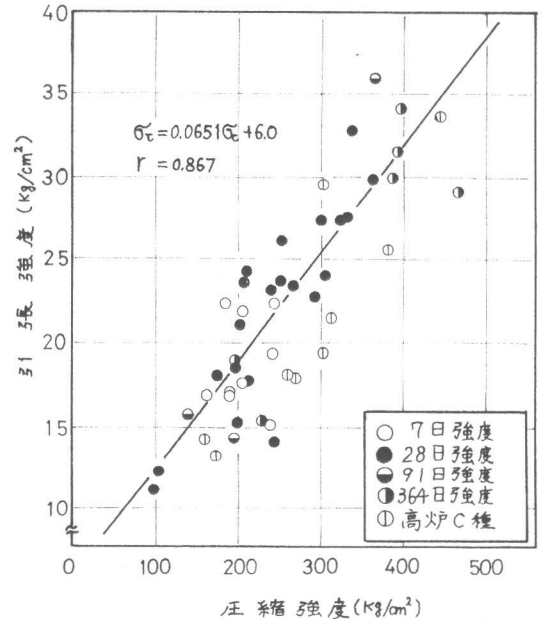


図-5 引張強度と圧縮強度の関係

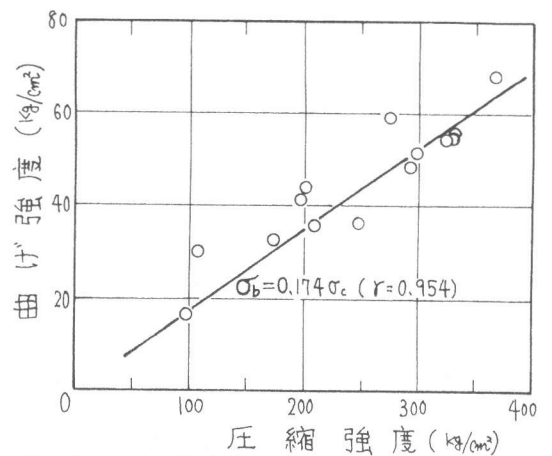


図-6 曲げ強度と圧縮強度の関係

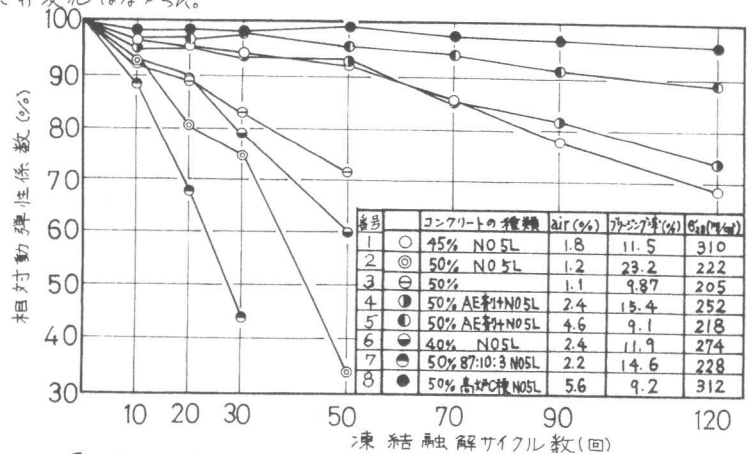


図-7 相対動弾性係数とサイクル数の関係

た断面に試薬を塗布し、変色した深さを測定して行った。同表によると、気中養生したスラグコンクリートの中性化は高炉セメントに比べると若干進んでいる。また、中性化深さとコンクリート表面から青色部分（スラグコンクリート特有の地色）までの深さがほぼ一致している。しかしながら、水中養生を継続したコンクリートには、ほとんど中性化はみられない。スラグコンクリートの表面の脆弱化は主に生成したエトリンガイトが空気中の炭酸ガスとの作用で破壊されるからと言われており、普通コンクリートとは若干異なり、中性化が、即、脆弱化につながる可能性もあると考えられる。

5.4 弾性係数 静弾性係数（圧縮強度の約1/3点での割線弾性係数）と圧縮強度の関係を図-9に示す。図中に示した回帰直線は水中養生を行なったスラグコンクリートについて求めたものである。同図によると水中養生したスラグコンクリートは、強度が大きくなるにしたがって弾性係数も大きくなっている。弾性係数は圧縮強度200、300および400 kg/cm²で2.8×10⁵、3.3×10⁵および3.6×10⁵ kg/cm²となり、普通コンクリートとほとんど変わらないようである。気中養生したコンクリートの弾性係数は、気中期間が長いほど小さくなっており、水中養生と比べると若干小さいようである。

6. 結論

資源の乏しい我国においては、製鉄所から多量に排出されるスラグを出来るだけ付加価値の高い材料として利用すべきである。そこで、著者らは、スラグの水硬性を充分発揮させて利用すべくスラグセメントについて研究を重ねてきた。これまでに得られた結果から、諸強度、弾性係数などはポルトランドセメントと変わらず、また水熱熱が極めて低いこと、長期強度も期待できること、安価であることなど優み点もあり、建設材料として充分実用可能と考えられる。しかしながら、表面の中性化が著しいこと、ポルトランドセメントに比べ初期養生が重要であることなど、今後検討すべき問題点も残っている。

参考文献

- 1) 高山, 渡辺, 岡部; スラグセメントの諸性質について, 昭和50年度土木学会西部支部研究会議演集, 昭和51年2月
- 2) 渡辺, 出光, 岡部, 森; スラグセメント(微粉砕した高炉水い)に関する2.3の実験, 第30回セメント技術年報, S.51.12
- 3) 丸安, 小林, 阪本; 高炉セメントコンクリートの研究 東京大学生産技術研究所報告, 第15巻, 第4号, 昭和41年2月
- 4) 永井, 徳竹, 山川, 橋本; 石灰スラグセメント(一種のメソソールセメント)の試験研究(第6報), 石膏と石灰, No.47 1960, pp. 131~136,
- 5) 出光, 高山, 岡部, 森; スラグセメントに関する基礎的研究, 第31回セメント技術年報, 昭和52年12月, pp. 124~136

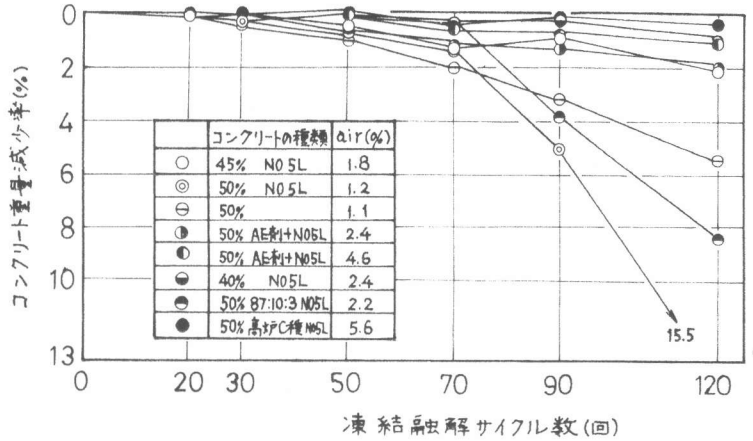


図-8 コンクリート重量減少率とサイクル数の関係

表-3 中性化試験結果

種類	W/C	養生条件	フェノールレッド	フェノールブルー	フェノールソレン	
スラグセメント 9:1	45~65	水中1年	0	0	1~2	
			11.7	11.2	13.8	
			14.0	14.1	16.8	
	55	気中1年	17.6	19.3	20.3	
			15.3	16.2	16.1	
			18.1	19.1	19.2	
			水中13週	0	0	0
			水中26週	0	0	0
			水中1週後気中3週	—	2.8	3.5
			水中1週後気中12週	0	6.1	6.8
水中4週後気中1週	0	1.8	2.6			
65	水中4週後気中9週	0	2.0	4.6		
		0	7.7	7.1		
スラグセメント 8:2	55	水中4週後気中22週	0	11.4	10.7	
		水中1年	0	0	1.4	
		気中1年	16.9	17.3	19.5	
高炉C種	55	水中1年	0	0	0	
		水中4週後気中22週	0	1.6	2.6	
普通ポルトランド	55	気中1年	6.6	9.0	10.5	
		水中4週後気中22週	0	0	0	

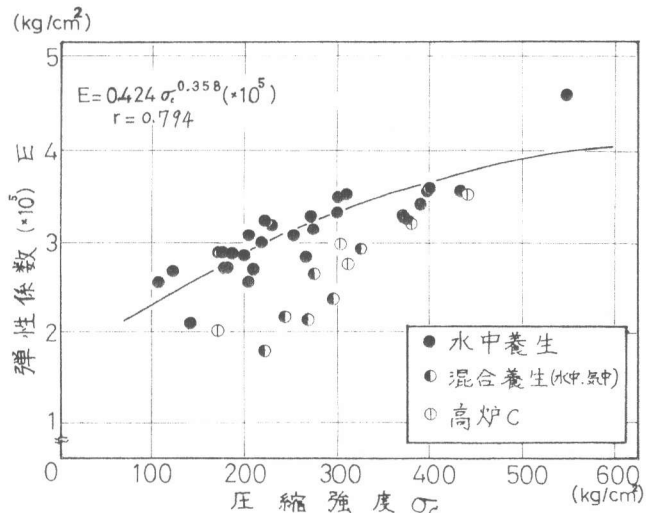


図-9 弾性係数と圧縮強度の関係