

# 高炉水砕スラグ・排煙脱硫石こう系セメント を用いたコンクリートの圧縮強度

## A STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTH OF SLAG-GYPSUM CEMENT CONCRETE

魚 本 健 人\*・小 林 一 輔\*\*

By Taketo UOMOTO and Kazusuke KOBAYASHI

### 1. はしがき

省資源、省エネルギーがわが国の重点目標とされるようになった現在、セメントの場合にもいままでのようなエネルギーや石灰石資源の大量消費は許されなくなるものと考えられる。

このような観点に立つと、もしその大半が高炉水砕スラグと排煙脱硫石こうによって構成されるセメントが実用化されれば石灰石資源の節約となるのみならず、省エネルギーにも寄与し、同時に未利用資源の活用と産業廃棄物の高度利用ともなるので、まさに時代の要求に適合したものといえよう。

本研究は以上の立場から、省資源、省エネルギー型セメントである高炉水砕スラグ・排煙脱硫石こう系セメント（以下、スラグ石こうセメントと略す）をわが国でも汎用のセメントとして実用化することを最終的な目的として行った研究である。

そのほとんどが高炉水砕スラグと石こうより構成されるセメントは特に目新しいものではなく、今世紀初頭には H. Kühl が高炉スラグはアルカリ刺激のみではなく、硫酸塩との組合せによっても硬化せしめ得ることを発見しており、これがスラグ石こうセメントの基礎となっている。以来、特に欧州諸国を中心として開発研究が進められ、ベルギー、フランス、ドイツ、イギリスにおいて規格化されている。一方、わが国でも昭和 20 年代から昭和 30 年代前半にかけてこの種のセメントの研究が盛んに行われたが、高度成長時代になるとともにあまり研究されなくなった。しかし最近、省資源、省エネルギーの必要性が叫ばれるようになると、再びこの種のセメントの研究が行われるようになった。

従来から高炉水砕スラグ、石こう、普通ポルトランド

セメント（または、他のアルカリ刺激剤）を混合し、その特性を調べた研究は数多く出されているが、これらの研究を大きく分類すると次の 2 つに分けられる。すなわち、(i) 普通ポルトランドセメントの割合が小さく、結合材中の 0~5 wt% のもの<sup>1)~19)</sup>と、(ii) 普通ポルトランドセメントの割合が 20~50 wt% と高炉セメントに近いもの<sup>20), 21)</sup>である。これらの研究のうち、(i) に属するものには、ベルギー製の“シトール”セメントに近いものをわが国で入手できる材料を用い試作したセメントの研究<sup>1)~10)</sup>や、排煙脱硫石こうと高炉水砕スラグのセメントとしての利用に関する研究<sup>11)~19)</sup>がある。一方、(ii) に属するものには、(i) に属する結合材の諸性質を改良することを目的とした研究<sup>たとえ(21)</sup>と、従来の高炉セメントより石こう量を多くし、石こうの有効利用ならびに乾燥収縮の低減等を目的としたもの<sup>たとえ(20)</sup>に分かれる。

本研究で検討の対象として取り上げたスラグ石こうセメントは、上記の (i) に属するものである。

この種のセメントのもつ長所として耐硫酸塩性がよく、硬化時の発熱量が少ないことがあげられるが、短所としておもに次の点があげられよう。

#### ① 圧縮強度について

- 強度がばらつきやすい<sup>8), 9)</sup>。
- 圧縮強度則が不明である<sup>1), 2), 9), 12), 22)</sup>。
- 養生条件等による影響を受けやすい<sup>12), 14), 22)</sup>。

#### ② 耐久性について

- コンクリート表面が劣化しやすい<sup>8), 9)</sup>。
- コンクリート中の鉄筋が鉄錆しやすい<sup>11), 19)</sup>。
- 凍結融解に対する抵抗性が低い<sup>11), 14)</sup>。

これらの問題点はいずれもセメントコンクリートとして要求される最も重要な性質であり、これらの問題点を明確にすると同時に実用的な解決策を見出さないことにはこの種のセメントを汎用のセメントとして位置づけることはできない。

\* 正会員 東京大学助手 生産技術研究所

\*\* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

以上のことを考慮し、本研究は、スラグ石こうセメントの基本的性質である圧縮強度を取り上げ、圧縮強度のばらつきならびに強度則を明らかにすると同時に、一定の品質のコンクリートを得るための方法を提示するものである。

## 2. 概 要

スラグ石こうセメントを省資源、省エネルギー型セメントとして位置づけるためには、できる限り汎用性を与える必要がある。すなわち、なるべく高い圧縮強度を得ることができると同時に、強度のばらつきが少ないことが望ましい。そのためには結合材である高炉水砕スラグ（以下、スラグと略す）、排煙脱硫石こう（以下、石こうと略す）、普通ポルトランドセメントの配合比や結合材素材の品質の選定に十分な配慮が必要である。また、コンクリートの配合、練り混ぜ、締固め、養生も重要である。しかし、従来の研究では上記の因子のうち、結合材配合比および結合材素材<sup>5)~8), 10)</sup>や養生条件に関する因子<sup>8), 9), 13)</sup>について検討したものが多く、他の因子についてはほとんど検討されていないといつてよい。

そこで、本研究ではまず結合材配合比によってスラグ石こうセメントはどのように性質が変化するかを実験的に調べ、その結果に基づき、高強度が得られかつばらつきの少ない最適結合材配合比を求めた。従来の研究ではこの結合材配合比の選定にあたり、強度の高いことなど<sup>5)~11)</sup>を基準としているが、本研究ではさらに強度のばらつきに関する検討を加えた。

最適結合材配合比を求めた後、結合材素材の品質が圧縮強度に及ぼす影響について調べ、結合材素材として要求される範囲を検討した。その際、本研究では現在わが国で入手が容易であることを条件とし、スラグについては、ガラス量 90% 以上、塩基度 1.8 以上、粉末度  $2500 \text{ cm}^2/\text{g}$  以上を対象とし、石こうについては排煙脱

硫石こうを二水石こうのまま利用することを前提に粉末度  $1500 \text{ cm}^2/\text{g}$  以上を対象とした。なお、これらの結合材を選定する際、各材料のアルカリ刺激剤含有量の影響についても検討を行い、含有量の推定方法を提案した。

以上の結果に基づき、圧縮強度と配合、圧縮強度と練り混ぜ、締固めの関係について調べ、圧縮強度がどのような法則に従うかを実験的に検討した。その結果、従来の研究で圧縮強度と水結合材比との関係が相違なる結果となった<sup>1), 2), 9), 12), 22)</sup>理由を明らかにするとともに、このセメントの圧縮強度が普通ポルトランドセメントに比べばらつきを生じやすい原因を示すことができた。

## 3. 結合材配合比と圧縮強度

### (1) 概 要

従来の研究から<sup>たとえば 6)~8)</sup>、結合材であるスラグ、石こう、普通ポルトランドセメント（または他のアルカリ刺激剤）の配合比を変化させると、スラグ石こうセメントの性質は大幅に変化することが明らかとなっている。しかし、現在容易に入手し得る結合材料を用いた場合の結合材配合比の最適範囲は必ずしも明らかになっていないとはいえない。

そこで、本章ではスラグの割合が結合材の 60 wt% 以上、石こう（二水石こう）が 38 wt% 以内、普通ポルトランドセメントが 20 wt% 以内の範囲に限定し、結合材配合比を変化させた場合のコンクリート圧縮強度からスラグ石こうセメントとしての最適結合材配合比を求めた。

実験は、まず図-1に示す配合比ごとに、水結合材比（40, 50, 65%）、材令（1週、4週、13週）および養生条件（水中養生 20°C、空中養生 20°C、50% R.H.）を変えて行い、おのおのの圧縮強度を調べた。なお、この実験で普通ポルトランドセメントを少なくとも 2 wt% 添加したのは、従来の研究ならびにモルタルによる予備実験から判断したものである。

以上の実験だけでは強度変化が大きすぎスラグ石こうセメントの最適結合材配合比を求めることはできないため、さらにスラグと石こうの割合を一定にし、普通ポルトランドセメントの割合を 0~5 wt% に変化させた場合、ならびに普通ポルトランドセメントを 2 wt% と一定にし、スラグの割合を 60~98 wt%（石こう：38~0 wt%）に変化させた場合について圧縮強度を調べた。なお、この場合の養生方法はすべて水中養生（20°C）とした。

実験に使用した結合材料は表-1に示す品質の普通ポルトランドセメント、スラグ A、石こう P（pH 8.6）で

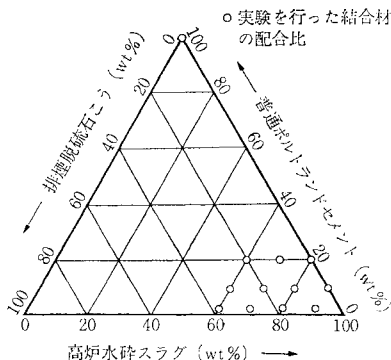


図-1 実験を行ったスラグ石こうセメントの結合材配合比

表-1 結合材料の品質

結合材料	比重	粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	ガラス量 (%)	塩基度	化 学 成 分 (%)										橋 要
					ig. loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Total Sulfur	合 計	
普通ポルトランドセメント	3.16	3330	—	—	0.4	0.1	22.0	5.4	3.1	—	64.5	1.4	2.2	99.1	共 通
スラグ A	2.89	4320	99	1.80	1.0	2.4	32.9	12.3	0.9	0.5	41.0	6.0	1.0	98.0	基 準
スラグ B	2.91	2480	96	1.93	—	—	32.1	14.8	—	0.5	40.0	7.1	1.2	95.7	粉 末 度
スラグ C		3010													
スラグ D		3950													
スラグ E		90													
スラグ F	2.90	3500	95	1.81	—	—	34.1	14.5	—	—	41.8	5.4	—	95.8	
スラグ G															
スラグ H	2.92	3520	98	1.83	0.3	0.3	33.4	12.6	1.0	0.7	42.3	6.1	1.2	97.9	銘 柄
スラグ I	2.91	3680	98	2.07	—	—	31.5	15.0	—	0.2	42.2	8.0	1.5	98.4	塩 基 度
石こう P	2.33	1580	—	—	20.2	0.5	0.3	0.1	0.2	0.0	32.6	0.1	45.4	99.4	基 準
石こう Q		2480													
石こう R		3580	—	—	20.6	0.2	—	—	—	—	32.6	—	45.7	99.1	粉 末 度
石こう S		4720													

表-2 骨材の物理的性質

	比 重	吸水率 (%)	粗粒率	各ふるいにとどまるものの重量百分率 (%)									
				0.15 mm	0.3 mm	0.6 mm	1.2 mm	2.5 mm	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm
細骨材	2.62	1.99	3.00	93	82	66	46	13	0	0	0	0	0
粗骨材	2.69	0.65	6.65	100	100	100	100	100	100	65	22	0	0

表-3 ミキサー型式と仕様

ミキサー型式	搅拌羽根枚数	回転速度 (羽根回転速度)
アイリッヒ型	固定羽根: 1枚 移動羽根: 2枚	20 rpm
強制搅拌式	移動羽根: 3枚	54 rpm

ある。また、骨材は最大寸法 20 mm の秩父両神産の砕石および富士川産の川砂を用いた。骨材の物理的性質を表-2 に示す。

なお、本論文で用いた結合材はすべてミキサー投入前に粉体の混合に適しているといわれている容量 10 l の通称オムニミキサーを用いて入念に混合した。

(2) 結合材配合比と圧縮強度

結合材配合比を変化させた場合、圧縮強度がどのように変化するかを調べたものを図-2, 3 に示す。これらの図は材令 4 週における圧縮強度から求めたものであり、結合材配合比の影響を調べやすいように等強度線を表示してある。なお、材令 1 週および 13 週の場合については図を省略したが、材令 4 週の場合とほぼ同様な傾向を示している。

図-2 および 図-3 より、本実験の範囲では結合材配合比と圧縮強度との間には次に示す傾向のあることが認められる。

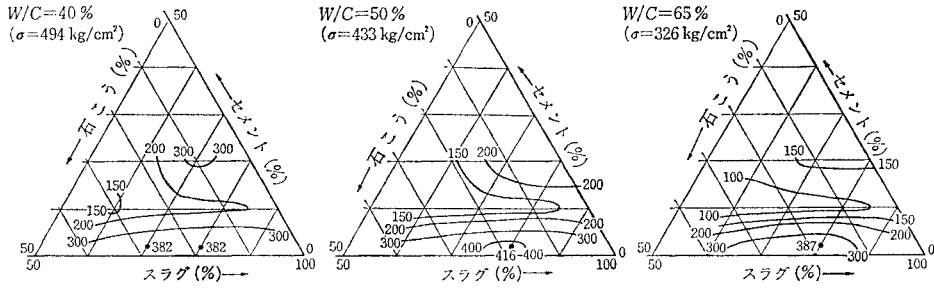
(i) 普通ポルトランドセメントの割合が 2 wt%, スラグが 60~90 wt% の範囲は他の配合比に比べ高い強度を示し、普通ポルトランドセメントと同等の強度が得られる高強度帯をなしている。

(ii) 上記の高強度帯より普通ポルトランドセメントの割合をわずかに増大させると圧縮強度は激減し、普通ポルトランドセメント 10 wt% 付近は (i) とは逆に低強度帯をなし、普通ポルトランドセメントの約 20~40 % の強度しか得られていない。

(iii) 普通ポルトランドセメントの割合を 20 wt% とすると石こうの割合が 10 wt% 以下では (ii) より高い強度となり、普通ポルトランドセメントの約 40~60 % の強度となっている。

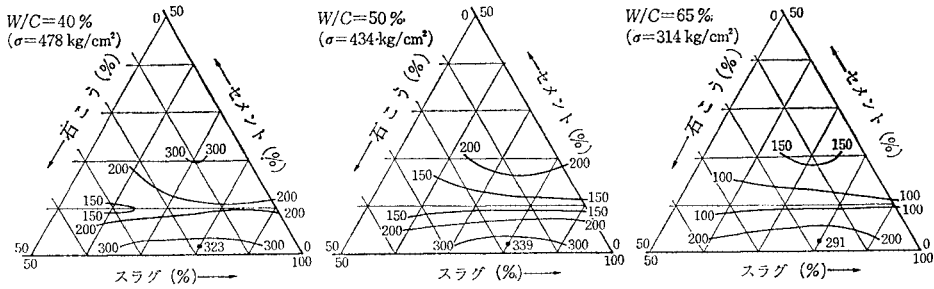
(iv) (i) の高強度帯の中でもスラグ 80 wt%, 石こう 18 wt%, 普通ポルトランドセメント 2 wt% 付近の配合比の場合に最も強度が高く、水中養生の場合には水結合材比 50% 以上では普通ポルトランドセメントのみを使用した場合以上の強度が得られている。空中養生の場合も同様な傾向はあるが、普通ポルトランドセメント以上の強度は得られていない。

これらの傾向から明らかなように、本実験の範囲では圧縮強度に及ぼす結合材配合比の影響は非常に大きく、特に普通ポルトランドセメントの割合による影響が卓越



●印は最大圧縮強度を示す。σ は普通ポルトランドセメントコンクリートの圧縮強度を示す。(単位: kg/cm<sup>2</sup>)

図-2 水中養生した場合の圧縮強度分布図(材令4週)



●印は最大圧縮強度を示す。σ は普通ポルトランドセメントの圧縮強度を示す。(単位: kg/cm<sup>2</sup>)

図-3 空中養生した場合の圧縮強度分布図(材令4週)

している。

図-4 は上記の結果に基づき普通ポルトランドセメントの割合が 2 wt% の高強度帯, 10 wt% の低強度帯および 20 wt% の配合比の中から代表的なものを選定し, 材令 4 週における圧縮強度と水結合材比 (W/C) との関係を示したものである。

	スラグ	石こう	セメント
○---○	0%	0%	100%
▲---▲	80%	18%	2%
□---□	70%	10%	20%
◇---◇	80%	10%	10%

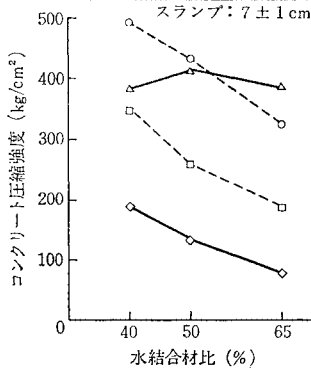


図-4 結合材配合比を変えた場合の圧縮強度と水結合材比との関係(材令4週, 水中養生)

この図より明らかなようにスラグ:石こう:普通ポルトランドセメント=80:18:2 の場合を除き, いずれも W/C が小さくなるほど強度は増大しており, 普通ポルトランドセメントのみを使用した場合と同じ傾向を示している。しかし, このスラグ:石こう:普通ポルトランドセメント=80:18:2 に代表される高強度帯に属する結合材を用いた場合は, いずれも W/C の変化と無関係にほぼ同じ強度を示している。すなわち, 普通ポルトランドセメントの割合が 2 wt% の場合のみは, 他の配合比の場合と異なり水セ

メント比法則に従っていないといえる。

図-5 は図-4 と同様に普通ポルトランドセメントの割合が 2 wt%, 10 wt%, 20 wt% のの中から代表的な配合比のものを選んで, 養生条件を変えた場合の圧縮強度と材令の関係を示したものである。

記号	養生	配合比 (wt%)		
		スラグ	石こう	セメント
●	水中	0	0	100
○	空中	0	0	100
▲	水中	80	18	2
△	空中	80	18	2
▼	水中	70	10	20
▽	空中	70	10	20
■	水中	80	10	10
□	空中	80	10	10

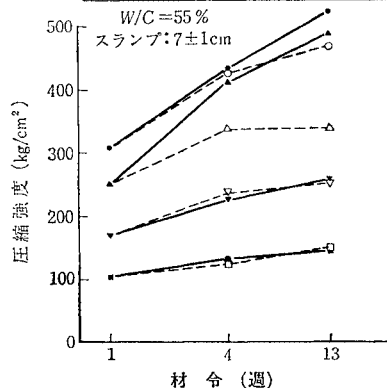


図-5 結合材配合比を変えた場合の圧縮強度と養生方法ならびに材令との関係

この図から次の傾向が認められる。

(i) 普通ポルトランドセメントのみを用いた場合、水中養生と空中養生の差は材令 4 週までほとんどないが、材令 13 週で約 10% の強度低下を示している。

(ii) 普通ポルトランドセメントが 2 wt% の高強度帯に属する場合、養生条件の違いによる強度差は著しく、水中養生の場合に比べ空中養生の圧縮強度は材令 4 週で約 20%、材令 13 週で約 30% の強度低下を示している。また、空中養生では材令 4 週以降の強度増加はほとんど認められない。

(iii) 普通ポルトランドセメントの割合が 10 wt% および 20 wt% の場合、圧縮強度は上記 (i), (ii) に比べ低いものの、養生条件の違いによる強度差はほとんど認められない。

これらの傾向から、普通ポルトランドセメントの割合が 2 wt% の場合、他の配合比のものに比べ養生条件の影響を受けやすく、空中養生を施すと強度の伸びが著しく阻害される。一方、普通ポルトランドセメントの割合が 10 wt% および 20 wt% の場合には圧縮強度は低いものの、養生条件の影響を受けにくいという特徴をもっている。

以上の実験結果から、スラグ石こうセメントとして強度的に有利な結合材配合比は普通ポルトランドセメントの割合が 2 wt% の場合であるが、この配合比の場合には本実験の範囲でみる限り、特異な性質を示している。特に、① 圧縮強度が水セメント比法則に従っていないことや、② 空中養生の場合に著しく強度の伸びが阻害されることは大きな特徴である。

### (3) 最適結合材配合比

結合材配合比を変化させた場合、普通ポルトランドセメントの割合が 2 wt%、スラグの割合が 60~90 wt% 付近に高強度帯があることが明らかとなったが、この高強度帯に属する結合材を積極的に利用できれば利点も多い。すなわち、この付近の結合材は普通ポルトランドセメントのみを用いた場合と同等以上の圧縮強度が得られ、強度的にはスラグ石こうセメントとして利用し得る配合比であるといえよう。そこで 図-2, 3 を参考としさらに詳細に普通ポルトランドセメントを 0~5 wt%、スラグを 60~98 wt% に変化させて水中養生 (20°C) した場合の圧縮強度を調べた。

図-6 は、スラグ：石こう=85：13 とし、普通ポルトランドセメントの割合を 0~5 wt% に変化させた場合の圧縮強度を示したものである。この図より次のことが明らかである。

(i) 最大強度を示す場合の普通ポルトランドセメントの割合は 2~3 wt% であり、材令 1 週では約 3 wt%、

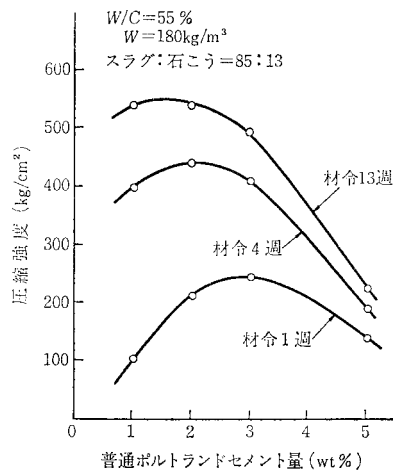


図-6 結合材中の普通ポルトランドセメント量が圧縮強度に及ぼす影響

材令 4 週では約 2 wt%、材令 13 週では約 1.5 wt% とピークを示す普通ポルトランドセメントの割合は材令とともに減少する。

(ii) 普通ポルトランドセメントをまったく含まない場合、図-6 から明らかなように、打設後 3 週間湿空養生 (20°C, 90%R.H.) を施してもまったく硬化せず、脱型することができなかった。

(iii) 普通ポルトランドセメントの割合が 5 wt% の場合、材令 1 週以降ほとんど強度は増大せず、材令 13 週では最大強度の約 45% の強度にとどまっている。

(iv) 普通ポルトランドセメントの割合をたとえば 1 wt% とすると、結合材中の普通ポルトランドセメントの偏在により材令 1 週では強度のばらつきが大きくなるが、材令 13 週ではそのばらつきは小さくなるものと推定される。逆に普通ポルトランドセメントの割合が 3 wt% の場合、材令 1 週では強度のばらつきは小さいが、材令 13 週では強度のばらつきは大きくなるものと推定される。

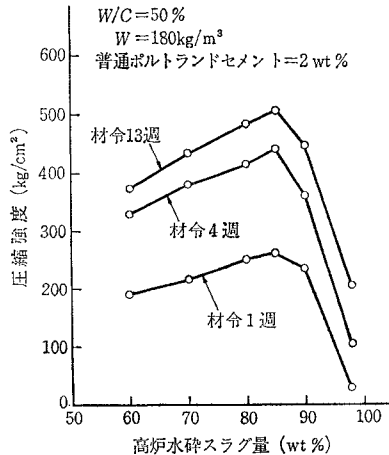
一方、図-7 では普通ポルトランドセメントの割合を 2 wt% と一定に保ち、スラグおよび石こうの割合を変化させた場合の強度を示しているが、この図より次のことが明らかである。

(i) 材令のいかんにかかわらず、スラグが 85 wt%、石こうが 13 wt% の場合に最大強度を示している。

(ii) スラグの割合が 85 wt% より減少すると、圧縮強度は徐々に低下するが、逆にその割合を増大させると急激に強度は低下する。

(iii) 石こうをまったく含まない、スラグ 98 wt%、普通ポルトランドセメント 2 wt% の場合はほかに比べ強度が著しく低い。

以上述べたことから明らかなように、図-6 および図



図一七 結合材中の高炉水砕スラグ量が圧縮強度に及ぼす影響

一七は、圧縮強度の高い範囲を示すばかりでなく、ばらつきの起こりやすい範囲をも示している。そこで、3.(2)で述べた内容も考慮すると、次のことがいえよう。

(i) スラグ石こうセメントとして利用し得る強度の高い領域はきわめて限られており、本実験の範囲ではその結合材配合比は次の範囲であると考えられる。

高炉水砕スラグ (スラグ) : 60~90 wt%

排煙脱硫石こう (石こう) : 7~39 wt%

普通ポルトランドセメント : 1~3 wt%

(ii) 上記範囲の中からいずれの結合材配合比を選定しても材令によって圧縮強度がばらつきやすい場合が生ずるが、コンクリート用結合材としては材令1週~4週の範囲ではあまりばらつきが大きくなり、また、早期強度があまり低くないものが望ましい。また、普通ポルトランドセメントのみならずスラグの割合の変動も考慮するとスラグの割合は90 wt%以内であることが望ましい。

(iii) 以上のことを考慮し、圧縮強度が高く、初期材令での強度のばらつきが生じにくい配合比を最適結合材配合比とすると、その範囲は次に示すものであるといえよう。

高炉水砕スラグ (スラグ) : 80~85 wt%

排煙脱硫石こう (石こう) : 12~18 wt%

普通ポルトランドセメント : 2~3 wt%

なお、この範囲は従来からいわれている“高硫酸塩スラグセメント”の範囲ともよい一致を示している。

これらの結果を踏まえ、本研究においては材令4週での強度が最も高く、ばらつきの少ない次の配合比を基準結合材配合比として選定し、次章以降の検討にはすべてこの配合比のスラグ石こうセメントを使用した。すなわち、重量比で示すと、スラグ : 石こう : 普通ポルトランドセメント = 85 : 13 : 2 である。

#### 4. 結合材素材の品質と圧縮強度

##### (1) 概要

3. ではスラグ石こうセメントの結合材配合比の選定に関し検討を加えたが、結合材素材の品質が圧縮強度に及ぼす影響に関しても十分検討する必要がある。これはスラグ石こうセメントを製造する際の材料の選定に役立つと同時に、結合材素材の品質によるばらつきの範囲を知るとして重要である。

そこで本章では現在わが国で容易に入手し得るスラグおよび石こうに限定し、各結合材素材の品質が圧縮強度に及ぼす影響について調べ、おのおのの品質がどの範囲であればその影響が小さいかを検討した。なお、普通ポルトランドセメントに関しては上記材料に比べその品質は一定であると考え、特に実験は行わなかった。

スラグの品質に関しては、ガラス量 (90~100%)、塩基度 (JIS, 1.8~2.0)、粉末度 (2500~4000 cm<sup>2</sup>/g) を取り上げ、石こうの品質に関してはセメント用の良質の排煙脱硫石こうとし、粉末度 (1500~4000 cm<sup>2</sup>/g) のみについて検討した。なお、結合材はすべて基準結合材配合比とした。

スラグのガラス量、塩基度および粉末度の影響を調べる実験では、結合材料として、表一1に示すスラグB~スラグGおよびスラグIを用い、石こうはすべて石こうPを用いた。なお、これらのスラグはすべて雑物等の混入のないよう厳重な管理のもとで試験用小型ボールミルで粉碎したものである。また、スラグの銘柄による違いをみるための実験ではスラグA, D, Hを用い、石こうは石こうPを使用した。

石こうの粉末度の影響を調べる実験では、表一1に示す石こうP~石こうSを使用し、スラグはスラグAおよびスラグDを使用した。なお、石こうPは気中乾燥後0.6 mmふるいでふるったものであるが、石こうQ~石こうSは試験用小型ボールミルで粉碎したものである。

以上の実験はすべて表一2と同一の骨材を使用し、コンクリートの配合は、水結合材比を55%、単位水量180 kg/m<sup>3</sup>とし、スランプ7±1 cmのものとした。なお、練り混ぜは表一3の強制攪拌式とし、突き棒で締め固めた。コンクリートの養生はすべて水中養生 (20°C) とし、材令1週、4週、13週で圧縮強度試験を実施した。

##### (2) 高炉水砕スラグの品質

###### a) ガラス量と塩基度

一般的に、スラグはガラス量の多いものほど、また塩基度の高いものほど反応性がよく、特に初期材令にお

いてその影響は著しい。スラグ石こうセメントの場合についても、結合材中に占めるスラグの割合が大きいため、ほぼ同様な傾向がみられる。

図-8 はガラス量の異なったスラグを使用し、基準結合材配合比で混合したスラグ石こうセメントの圧縮強度を示したものである。この図より、スラグのガラス量が圧縮強度に及ぼす影響は材令1週において顕著であることが明らかで、材令の経過とともにガラス量の違いによる強度差は減少している。ガラス量 90%のものに対するガラス量 100%のものの圧縮強度比は、材令1週では約2倍であるが、材令4週では約1.2倍となり、材令13週ではほぼ同じであるといえよう。

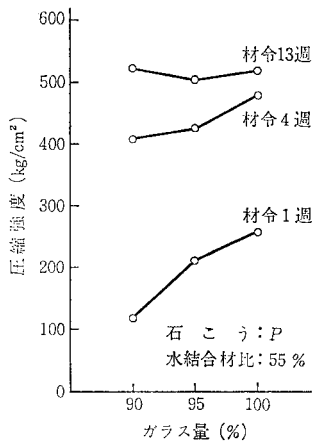


図-8 高炉水砕スラグのガラス量が圧縮強度に及ぼす影響

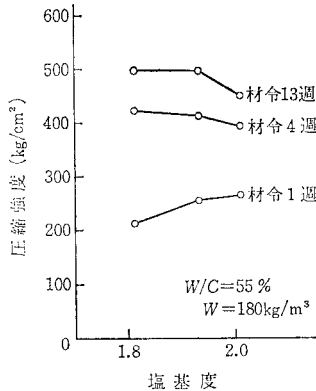


図-9 高炉水砕スラグの塩基度が圧縮強度に及ぼす影響

図-9 は塩基度の異なったスラグを使用した場合のスラグ石こうセメントの圧縮強度を調べたもので、塩基度が圧縮強度に及ぼす影響を示している。この図より、スラグの塩基度が圧縮強度に及ぼす影響は、ガラス量の影響と同様に材令1週において顕著である。しかし材令が経過するにつれ塩基度による差がなくなり、長期材令ではかえって塩基度の低いものの方が高い強度を示している。従来の研究では、スラグ石こうセメントの塩基度は1.85以上と<sup>7)</sup>されているが、1.8以上でも十分といえよう。

b) 粉末度

スラグは一般に反応が遅く、スラグの反応性を高めるには微粉碎する必要がある。しかし、スラグはクリンカーに比べ被粉碎性が悪いため、粉末度をむやみに高めることは得策でない。どの程度まで粉碎することが望ましいかは、スラグのガラス量、塩基度ならびにスラグ石こ

うセメントの利用方法との関係が深い。

図-10 はスラグ粉末度が圧縮強度に及ぼす影響を示したものである。この図より明らかなように、スラグ粉末度の高いものほど強度発現はよく、特に初期強度の場合はその効果が大きい。しかし材令4週以降では粉末度 3000 cm<sup>2</sup>/g と 4000 cm<sup>2</sup>/g の場合

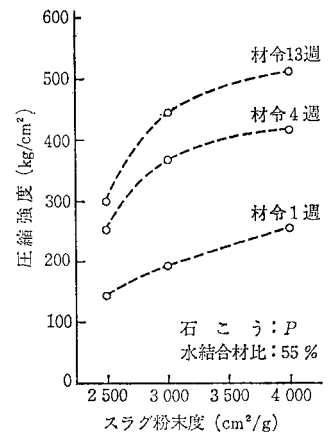


図-10 高炉水砕スラグの粉末度が圧縮強度に及ぼす影響

の強度差は小さくなり、粉末度を 4000 cm<sup>2</sup>/g まで高めても 3000 cm<sup>2</sup>/g の場合の 1.15 倍にしかなっていない。これらの結果から、スラグ粉末度を 4000 cm<sup>2</sup>/g 以上に高めても材令4週以降の強度の大幅な増大は望めないと考えられるが、初期強度に関してはその効果が期待できよう。

以上の結果を考慮すると粉末度はこのスラグ石こうセメントの初期強度をどの程度にするかで決まることになる。その場合の基準としてたとえばまったく同じ条件で作られた普通ポルトランドセメントの強度を調べると、材令1週で約 300 kg/cm<sup>2</sup>、材令4週で約 440 kg/cm<sup>2</sup>となった。この結果と図-10を比較すれば、もし材令1週で普通ポルトランドセメントと同等な強度を得るためにはスラグ粉末度を約 5000 cm<sup>2</sup>/g に、また材令4週で同等な強度を得るにはスラグ粉末度を約 4000 cm<sup>2</sup>/g とする必要がある。しかし、このスラグ石こうセメントにそれほど高い強度を要求する必要はなく、このセメントの長所である耐硫酸塩性等を生かす利用を考えれば粉末度は 4000 cm<sup>2</sup>/g 程度で十分であろう。なお、たとえば

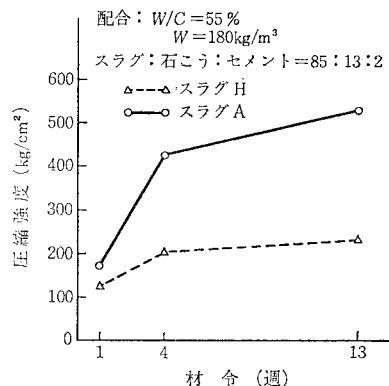


図-11 銘柄の異なる市販のスラグを用いた場合の圧縮強度と材令

イギリスの BS 4284 (1974) ではこの種のセメントの粉末度を  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  以上と規定している。

### c) アルカリ刺激剤の混入

図—11 は 銘柄の異なる市販のスラグを用い、基準結合材配合比で混合したスラグ石こうセメントの圧縮強度を示したものである。この実験では、用いたスラグの銘柄が異なるのみで、スラグのガラス量、化学成分、粉末度などの品質は大差がなく（表—1 参照）、またコンクリートとしての配合、養生等もすべて同じである。しかし、この図から明らかなように、スラグの銘柄によって強度は著しく異なり、材令 4 週で約  $230 \text{ kg/cm}^2$ 、材令 13 週で約  $300 \text{ kg/cm}^2$  の相違がある。

このような著しい強度差はスラグ自体の品質に起因しないことは前述の結果から明らかで、その原因をほかに求める必要がある。

スラグ品質以外に考えられる原因の 1 つとして、スラグの製造工場ではスラグの製造、輸送工程の一部にポルトランドセメントと同じ設備を使用していることから、ポルトランドセメント粉末の混入がある。

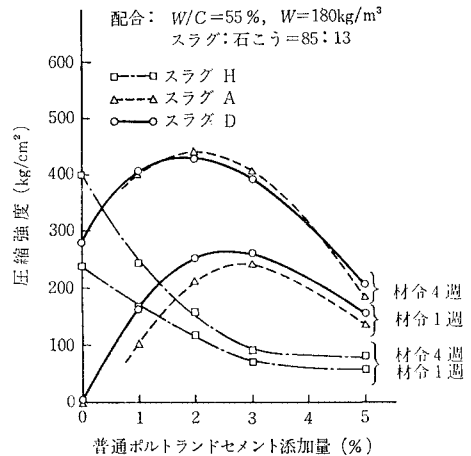
そこで、図—11 で用いたスラグ A およびスラグ H に対し X 線回折試験を実施し、ポルトランドセメント粉末の混入の有無を調べた。しかしポルトランドセメント固有の X 線回折ピークは認められず、もし含有されていても検出限界以下（数 % 以下）であると考えられる。そこで、3. (3) で述べたと同様な方法で、スラグと石こうの混合物に普通ポルトランドセメントを 0~5 wt% 添加してその圧縮強度を調べた。なお、コントロール用スラグとしてスラグ D に関しても実験し、前出の図—6 の結果も含めたものを図—12 に示す。

図—12 から明らかなようにスラグ A、D とスラグ H の両者の傾向はまったく異なっている。すなわち、スラグ H は普通ポルトランドセメントを添加しない場合に最大強度を示し、添加量を増すにつれ強度は低下しており、スラグ A、D に示すようなピークはまったく現れていない。しかし、従来の考え方によればアルカリ刺激剤をまったく加えずにこのような反応が起こることは考えられず、スラグ H にはなんらかのアルカリ刺激剤がすでに混入しているものと推定される。

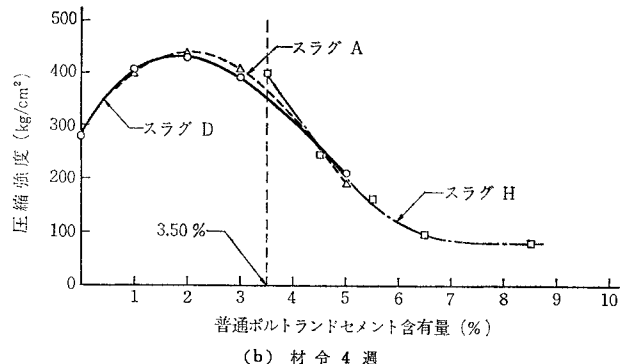
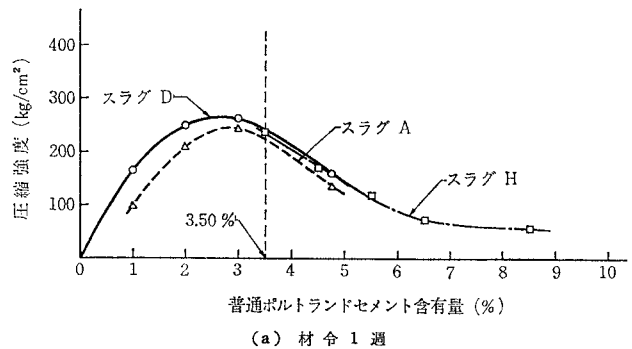
そこで、図—12 に示すスラグの曲線を平行移動させ、材令ごとに図—13 (a) および (b) を作成した。このように図を書き換えるとスラグ H の曲線は他のスラグの曲線ともよい一致を示すといえよう。すなわち、スラグ H はすでに約 3~4 wt% の普通ポルトランドセメントと同等なアルカリ刺激剤が混入しているものと推定され、これ

が原因で 図—11 に示したような強度差が生じたものと思われる。

以上述べたことから明らかなようにスラグ石こうセメントはごく微量のアルカリ刺激剤の変化によって大きくその性質が変化するため、スラグ石こうセメント製造運搬等の際には、スラグ品質と同様にスラグ（または石こう）中へのアルカリ刺激剤混入に関して厳重な管理をする必要がある。なお、アルカリ刺激剤混入量の推定には上記のように普通ポルトランドセメントを添加し、そ



図—12 普通ポルトランドセメントの添加量を変えた場合の圧縮強度



図—13 高炉水砕スラグ中に含まれるアルカリ刺激剤量（普通ポルトランドセメント換算）の推定



の強度から判断する方法が簡便である。

### (3) 排煙脱硫石こうの品質

石こうの種類には、二水石こう、半水石こう、無水石こう等多くのものがあるが、排煙脱硫石こうを利用する場合、二水石こうとして利用すれば焼成の必要もなく、省エネルギーにもなる。しかし、二水石こうの場合の問題点としては、二水石こうのまま微粉砕して均一な品質にすることは特に粉末度を高くする場合には難しい。また、スラグ石こうセメントとして使用する場合には不純物が多いと種々の影響を及ぼすと考えられる。そこで、本研究では普通ポルトランドセメント製造に用いる石こうで気中乾燥させたものをなるべく粉砕せずに使用することを目的とし、石こうの粉末度が圧縮強度に及ぼす影響について調べた。

図-14 は石こうの粉末度を 1500~4000 cm<sup>2</sup>/g に変化させた場合の圧縮強度を調べたもので、この図から石こうの粉末度を 1500~4000 cm<sup>2</sup>/g の範囲で変化させてもほとんど圧縮強度に影響を及ぼさないことが明らかである。スラグの品質を変えるとその違いは多少認められるものの、材令 13 週までの範囲では石こうの粉末度による相違はたかだか 5% 以内であり、ほぼ一定であると考えられよう。

以上の結果から本実験の範囲では石こうの粉末度は圧縮強度と無関係と考えられ、石こうの粉末度に多少のばらつきがあっても強度的には問題がないと考えられる。

## 5. コンクリートの配合および製造条件と圧縮強度

### (1) 概要

スラグ石こうセメントに関しては、従来からその圧縮強度が普通ポルトランドセメントとは異なるといわれている。Hummel<sup>1)</sup>は、水セメント比が大きくなっても強度はほとんど低下しないことを示し、Mussgnug<sup>2)</sup>は、水セメント比が 0.6~0.7 の付近で最大強度が得られることを示している。また、わが国でも試作したスラグ石こうセメントを用いたコンクリート強度を調べたところ、いわゆる水セメント比の法則に従わないことを田中ら<sup>3)</sup>が報告している。一方、Taylor<sup>22)</sup> や出光ら<sup>12)</sup>は水セメント比の法則に従うとしており、このセメントがどのような法則に従うかは研究者によって異なっている。

このように種々の報告が出されていることはこのセメントを汎用のセメントとして利用するうえでは非常に大きな障害となるばかりでなく、種々の物性等を調べる場合でも相反する結果を生じさせることとなる。そこで、

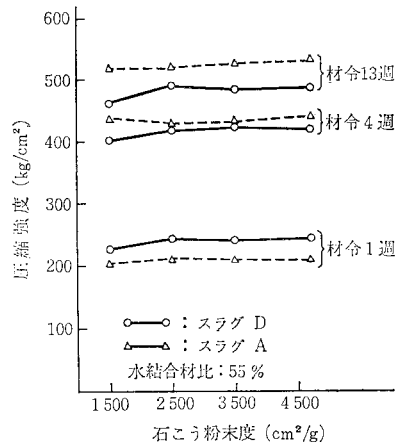


図-14 石こうの粉末度が圧縮強度に及ぼす影響

本章では、基準結合材配合比のスラグ石こうセメントに関し、その圧縮強度はどのような法則に従うのか、またその原因としてはどのようなものが考えられるのかについて実験的に検討することを目的とした。

実験はまず、スランブが  $7 \pm 1$  cm となるようなコンクリートを用い、水結合材比を、35~75% まで変化させ、普通ポルトランドセメントとどのような違いがあるかを圧縮強度試験、X線回折試験、ポロシチー測定で調べた。さらに、水結合材比、単位結合材量、単位水量を一定にした場合の圧縮強度、ならびにコンクリートの練り混ぜ、締固め方法を変えた場合の圧縮強度を調べた。

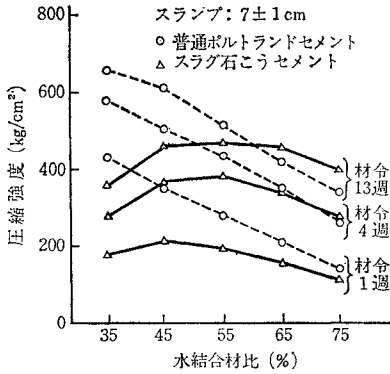
これらの実験結果をもとに、スラグ石こうセメントを用いたコンクリートの圧縮強度式を求めるとともに、このセメントの圧縮強度に関する考察をまとめた。

本章で行った実験に用いた結合材は表-1 のものと同じであり、骨材はすべて表-2 と同じである。また、使用したミキサーは表-3 に示す仕様のもので、コンクリートはすべて水中養生 (20°C) とし、材令 1 週、4 週、13 週の強度を調べた。

### (2) 圧縮強度と水結合材比

スランブを一定にした場合のスラグ石こうセメントと普通ポルトランドセメントの水結合材比 ( $W/C$ ) と圧縮強度との関係を 図-15 に示す。この図に示したコンクリートはすべてアイリッヒ型ミキサーで練り混ぜ、突き棒で締固めたものである。

この図から明らかなように本実験ではスラグ石こうセメントは普通ポルトランドセメントと異なった強度傾向があり、 $W/C$  が小さくなると強度が高くなる普通ポルトランドセメントとは明らかな違いがある。すなわち、スラグ石こうセメントは  $W/C$  が 45~55% 付近で最大強度を示している。この傾向は Mussgnug<sup>2)</sup> の指摘し



図一五 スラグ石こうセメントおよび普通ポルトランドセメントの圧縮強度と水結合材比 (W/C) の関係

た内容とほぼ一致する。

そこで上記の実験結果を詳細に調べるため、X線回折試験とポロシチーの測定を行った。しかし、これらの測定に用いた試料はコンクリート供試体から取り出したため、ペースト部分を主体としたが完全に骨材を取り除くことはできなかった。

図一六 は上記方法でペースト部分のポロシチーを測定した結果を示したものである。この図より、普通ポルトランドセメントコンクリートでは W/C の小さなものほど空隙量 (T.P.V.) は小さく、空隙半径 75~240 Å の割合が大きいことがわかる。一方、スラグ石こうセメントの場合、空隙量は W/C が 55%, 75%, 35% の順に小さく、空隙半径 75~240 Å の割合も同じ順序で増大している。しかし、圧縮強度との対応を調べると、ス

ラグ石こうセメントも普通ポルトランドセメントと同様に、強度の高いものほど空隙量は小さく、空隙半径 75~240 Å の割合が大きく、異なる点は W/C との対応だけである。

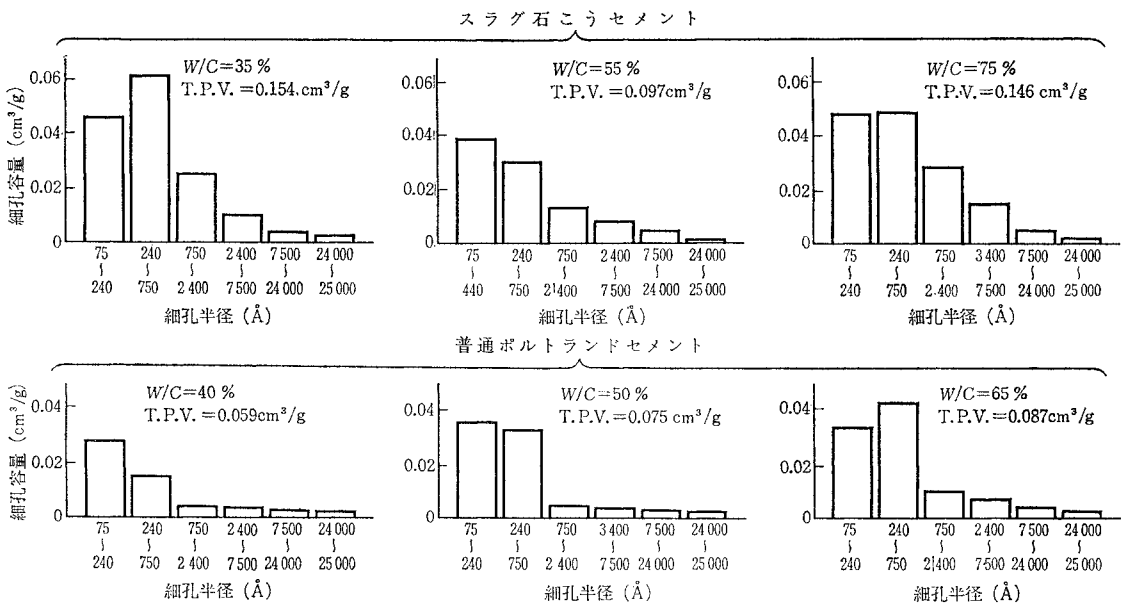
図一七 はスラグ石こうセメントのうち W/C が 35%, 55%, 75% のコンクリートを X線回折試験で調べた結果である。この図から明らかなように W/C の大きなものほど Ettringite の回折強度は大きく、W/C が 35% の場合には他の配合に比べ石こうの回折強度が大きい。このことは、W/C の小さな 35% の場合、他のものに比べ水和反応が十分でなく、石こうが未反応のまま残存しているためであると考えられる。

以上の結果から、スラグ石こうセメントを用いたこの実験では W/C の小さな配合では強度発現が悪く、十分な強度に達しなかったものといえよう。

(3) 水結合材比, 単位結合材量, 単位水量の影響

5.(2) で得られた実験結果から、同一品質のスラグ石こうセメントの圧縮強度は水結合材比以外の因子によっても影響を受けるものと考えられる。そこで、図一五で求めた値を用い、普通ポルトランドセメントに対するスラグ石こうセメントの圧縮強度比と単位結合材量との関係を調べた。その結果を図一八に示す。

この図より、圧縮強度比と単位結合材量との関係はほぼ直線で近似できることが明らかである。また、スラグ石こうセメントは単位結合材量が少なくなるほど普通ポルトランドセメントに近い強度となり、材令の経過に伴う強度の伸びが著しいことがわかる。



図一六 スラグ石こうセメントと普通ポルトランドセメントのポロシチー

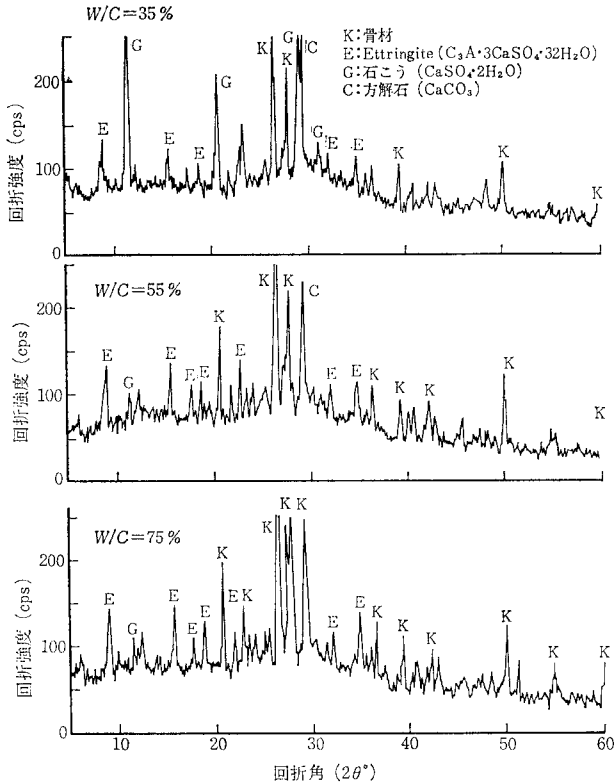


図-17 スラグ石こうセメントのX線回折試験結果

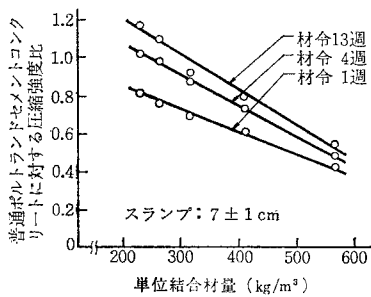


図-18 普通ポルトランドセメントに対するスラグ石こうセメントの圧縮強度比と単位結合材量との関係

一方、一般的に普通ポルトランドセメントを用いた場合には、圧縮強度は水セメント比と高い相関性があることを考慮すると、スラグ石こうセメントの圧縮強度は水結合材比と単位結合材量の関数になっているものと推定される。そこで、水結合材比、単位結合材量、単位水量を一定にした場合の圧縮強度を調べた。この場合の実験材料および実験方法は 5.(2) とまったく同じである。

a) 水結合材比を一定にした場合の圧縮強度

水結合材比を一定にし、単位結合材量を変化させた場合の圧縮強度を 図-19 に示す。この図より水結合材比を一定にした場合、単位結合材量の小さいものほど圧縮強度は高く、材令の経過に伴う強度の伸びおよび伸び率

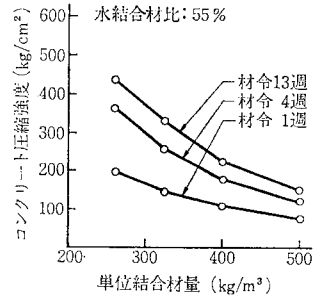


図-19 水結合材比を一定にした場合の圧縮強度と単位結合材量との関係

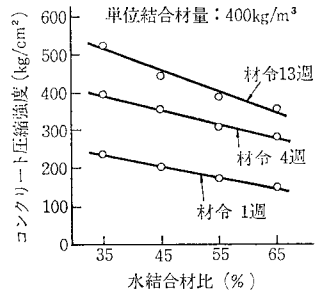


図-20 単位結合材量を一定にした場合の圧縮強度と水結合材比との関係

は大きいことが認められる。なお、この場合の圧縮強度と単位結合材量との関係は、直線で近似することも可能であるといえよう。

b) 単位結合材量を一定にした場合の圧縮強度

単位結合材量を一定にし、水結合材比を変化させた場合の圧縮強度を示したものが 図-20 である。この図より圧縮強度と水結合材比との関係は普通ポルトランドセメントと同様な傾向を示すといえよう。なお、この圧縮強度と水結合材比との関係はほぼ直線で近似することができる。

c) 単位水量を一定にした場合の圧縮強度

単位水量を一定にし、水結合材比を変化させた場合の圧縮強度を示したものが 図-21 である。この図より、各材令とも圧縮強度が最大となる場所があることが明

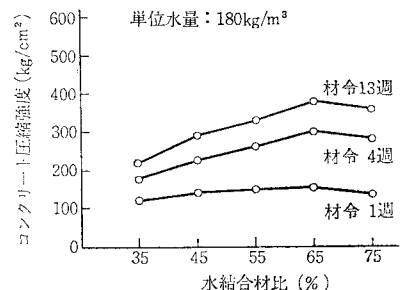


図-21 単位水量を一定にした場合の圧縮強度と水結合材比との関係

らかである。また、この実験ではピークとなる水結合材比が65%付近にあるため、もし水結合材比が55~75%の範囲で実験を行えばほぼ一定の強度となるため Hummel<sup>1)</sup>の結果や図-4の傾向とも一致する。

以上の実験結果から明らかになったように同一の条件でコンクリートを作成、養生した場合にはスラグ石こうセメントの圧縮強度は水結合材比および単位結合材量の関数になっていると推定される。

(4) 練り混ぜおよび締固めの影響

5.(3)で述べた検討ではすべて練り混ぜにはアイリッヒ型ミキサーを使用し、締固めは突き棒による方法を用いたが、これらの条件を変化させるとどのような影響を受けるかを検討した。

図-22はスラグ石こうセメントの練り混ぜ方法を変えた場合に、その圧縮強度がどのように変化するかを調べたものである。この場合のコンクリートの配合は単位水量を一定に保っている。

この図から明らかのように、ミキサーをアイリッヒ型から強制攪拌式へ、練り混ぜ時間を3分から6分へ、練り混ぜ量をミキサー容量の1/2から1/5へ変えるとW/Cの小さな配合における強度は著しく増大する。また、強制攪拌式ミキサーを用い、練り混ぜ時間6分、練り混ぜ量をミキサー容量の1/5とすると、圧縮強度とW/Cとの関係は普通ポルトランドセメントの場合に近いものとなる。

以上の結果を考慮して、強制攪拌式ミキサーを用い、ミキサー容量の1/5の練り混ぜ量のコンクリートを締固め方法を変えて行った実験結果が図-23である。

この図から明らかのようにW/Cが35%および45%の場合の材令4週以降の強度は突き棒によるものより

も、内部振動機を用いた方が高い強度が得られているが、55%以上では締固めによる効果はあまりないといえよう。なお、注目すべき点として練り混ぜ時間6分、内部振動機を用いた場合に、W/Cが35%で $\sigma_{28}$ が550 kg/cm<sup>2</sup>、 $\sigma_{91}$ が695 kg/cm<sup>2</sup>となり、普通ポルトランドセメントと同等以上の圧縮強度が得られたことがあげられよう。

以上の結果から、このスラグ石こうセメントでは材料、配合、養生を一定にしてもコンクリートの練り混ぜの影響が著しく、特にW/Cの低い配合では材令の経過とともに著しい差が生ずることが明らかとなった。また、締固めの影響は練り混ぜの影響に比べ小さく、W/Cの大きな範囲では差がないといえよう。なお、従来の研

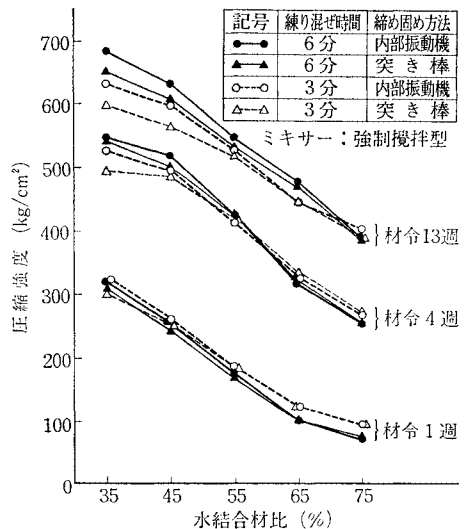


図-23 締固め方法を変えた場合の圧縮強度と水結合材比との関係

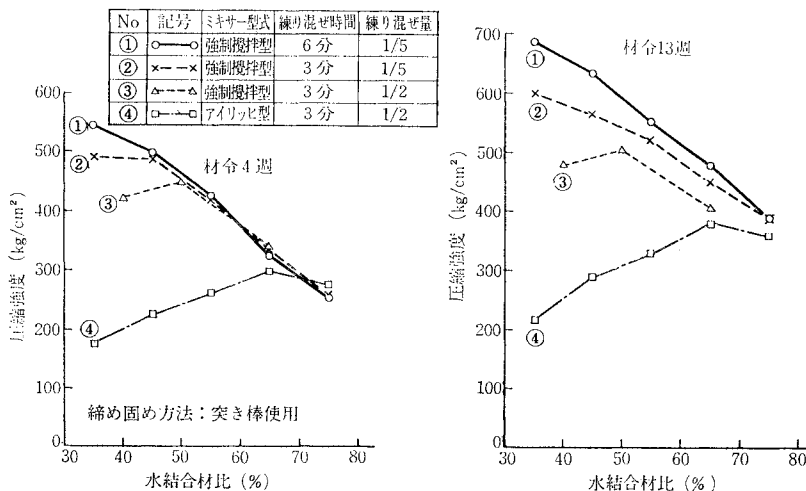


図-22 練り混ぜ方法を変えた場合の圧縮強度と水結合材比との関係

究で、種々の強度が得られたことはおもに練り混ぜの違いによるものであると考えられ、逆に十分な練り混ぜを行えば  $W/C$  が小さな場合でも普通ポルトランドセメントと同等以上の強度を得ることができることが明らかとなった。

### (5) 圧縮強度式

上記の実験結果からも明らかのように、スラグ石こうセメントを用いたコンクリートの圧縮強度は、水結合材比だけでなく、単位結合材量、練り混ぜ程度によっても影響を受ける。そこで、これらの実験結果から圧縮強度式を求めると、次式の形に近似できると考えられる。

$$\sigma = K(1 + \alpha C) \cdot (1 + \beta W/C)$$

ただし、

$\sigma$  : コンクリート圧縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

$W$  : 単位水量 (kg/m<sup>3</sup>)

$C$  : 単位結合材量 (kg/m<sup>3</sup>)

$K$  : 定数 (正, kg/cm<sup>2</sup>)

$\alpha$  : 定数 (一般に負)

$\beta$  : 定数 (負)

ここで、上記の結果と比較すると、

- (i)  $W/C$  が一定 :  $\sigma = K_1(1 + \alpha C)$   $K_1$  : 定数
- (ii)  $C$  が一定 :  $\sigma = K_2(1 + \beta W/C)$   $K_2$  : 定数
- (iii)  $W$  が一定 :  $\sigma = K(1 + \alpha C) \cdot (1 + \beta W/C)$   
となり、 $W/C = \sqrt{\alpha W/\beta}$  で最大 (ただし  $\alpha, \beta < 0$  の場合)

となり、図—19~21 の傾向とも一致する。

一方、圧縮強度式を、 $W=180$  kg/m<sup>3</sup>、 $\beta=-0.8$  とし  $\alpha$  を  $-0.0017 \sim 0.00085$  m<sup>3</sup>/kg まで変化させた場合、 $W/C$  と  $\sigma_0 = (1 + \alpha C) \cdot (1 + \beta W/C)$  の関係を調べると図—24 のようになる。この図と 図—22 を比較するとその傾向はよく一致しているといえよう。すなわち、この推定式における定数  $\alpha$  は練り混ぜを十分に行うと大きく

なり、練り混ぜが十分であれば 0 に近づくものと考えられよう。

### (6) 圧縮強度に関する一考察

スラグ石こうセメントの圧縮強度は、いままで述べたように結合材料が同一であっても種々の要因によってその圧縮強度は変化する。しかもその変化幅は非常に大きく特に練り混ぜ方法の影響は著しい。しかし、このような強度の変化は今日使用されている多くのセメントにはみられないもので、このスラグ石こうセメントの特徴であるといえよう。

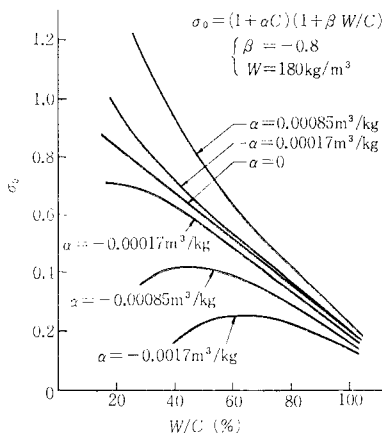
これらのことを全体的にみれば、このスラグ石こうセメントは結合材そのものに強度をばらつかせる原因が存在すると考えられる。また、前述の圧縮強度式において単位結合材量に関する項が加わることや、締固めよりも練り混ぜの影響が大きい点などは、結合材そのものに原因があると考えの方が納得しやすい。すなわち、ここで行った練り混ぜ程度の違いは、ミキサー性能試験等で判別できるようなペースト、砂、砂利が均一に分布するかどうかではなく、ペーストそのものが均一になっているかどうかであると考えられる。しかし、事前に各結合素材を入念に混合した場合でも、また、まったく混合しない場合でも圧縮強度にほとんど差がみられなかったことから、少なくとも水を加えてからの混合が重要であると推定される。

一般に、スラグ石こうセメントではその結合材中に含まれるポルトランドセメントが放出する  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  により、スラグ粒子表面の緻密なゲル層の生成を防止し、スラグと石こうの反応を起こさせるとされている<sup>23)</sup>。このことは、普通ポルトランドセメントを添加しない場合に材令 3 週でも硬化しなかった前述の結果とも一致する。しかし、その最適量は普通ポルトランドセメントでも結合材料のわずか 2~3% であり、このわずかな刺激剤が満遍なくゆき渡って初めて反応が起こるのである。このため、このセメントはコンクリートとして練り混ぜる前に、反応するペーストを作ることが必要不可欠となる。

以上のことから、このスラグ石こうセメントを実用に供するにはアルカリ刺激剤である普通ポルトランドセメントを練り混ぜ水に加え混合して添加するか、練り混ぜ時の投入順序を水およびセメントを最初に行い、ペーストとして十分練り混ぜてから骨材を投入するという方法が適している。

## 6. 結 論

スラグ石こうセメントの圧縮強度について実験的に検討した結果、次のことが明らかとなった。



図—24 圧縮強度式における定数  $\alpha$  の影響

(1) スラグ石こうセメントとして最も強度が高く、ばらつきの少ない最適結合材配合比は次の範囲である。

高炉水砕スラグ	: 80~85 wt%
排煙脱硫石こう	: 12~18 wt%
普通ポルトランドセメント	: 2~3 wt%

(2) スラグ石こうセメントは結合材素材のうち、普通ポルトランドセメントの割合によって強度は著しく変化し、上記範囲より 2~3% 変化しただけで強度は約 1/3 以下に減少する可能性がある。

(3) 結合材素材である高炉水砕スラグのガラス量、塩基度により、初期強度は影響を受けるが、現在容易に入手可能な品質を考慮すると、ガラス量 95% 以上、塩基度 1.8 以上であることが望ましい。

(4) 高炉水砕スラグの粉末度は、初期強度を考慮すると 4000 cm<sup>2</sup>/g 程度であることが望ましい。

(5) 石こうとして排煙脱硫石こう(二水石こう)を用いる場合、その粉末度は 1500 cm<sup>2</sup>/g 以上であれば特に強度に影響を及ぼさない。

(6) 高炉水砕スラグおよび石こう中にアルカリ刺激剤が混入せぬよう厳重に管理をすると同時に、混入量の推定を行う必要がある。混入量の推定には、スラグおよび石こうの混合物に普通ポルトランドセメントを 0~5 wt% 程度まで順次加え、おのおのの強度から推定することができる。

(7) スラグ石こうセメントの圧縮強度は水結合材比(W/C)および単位結合材量の関数となっており、一般的には圧縮強度は次式の形となる。

$$\sigma = K(1 + \alpha C) \cdot (1 + \beta W/C)$$

ただし、

$K, \alpha, \beta$ : 定数

$W$ : 単位水量

$C$ : 単位結合材量

(8) スラグ石こうセメントは自硬性がないため、その使用にあたってはペーストとして入念に練り混ぜた後、骨材を投入するか、普通ポルトランドセメントを練り混ぜ水に加え混合して添加する方法が適している。

## 7. あとがき

本実験に協力していただいた星野富夫技官ならびに化学分析等のご協力をいただいた新日本製鉄化学工業(株)に心から感謝いたします。なお、本研究の一部は文部省特定研究「省資源のための新しい生産技術の開発」および文部省科学研究費補助金・総合研究A(代表者:武蔵工業大学 国分正胤教授)によったことを付記する。

## 参考文献

- Hummel, A. und K. Charisius : Schwindarmar Zement und Quellzement, Zement-Kalk-Gips, Vol. 2, 1949.
- Mussgnug, G. : Einige charakteristische Eigenschaften des Gipsschlackenzementes, Zement-Kalk-Gips, Vol. 4, 1951.
- Keil, F. : Slag cements, Proceedings of the Third International Symposium on the Chemistry of Cement, Cement and Concrete Association, 1952.
- 横瀬・本橋・本郷: 石膏-水滓系セメントの研究, セメント技術年報, IV, 1950.
- 山内・近藤: 各種水滓系セメントにおける水滓の活性, セメント技術年報, VI, 1952.
- 津村: 超硫酸セメント製造用原料としての高炉水滓の反応性に関する研究, セメント技術年報, VII, 1953.
- 山内・近藤・市川: 高炉水滓スラグおよび特殊スラグセメントの研究, セメント技術年報, VIII, 1954.
- 浅岡・佐野: セッコウスラグセメントの凝結, 強さならびに風化, セメント技術年報, IX, 1955.
- 田中・酒井・山根・高木: 高硫酸塩スラグセメントの特性について, セメント技術年報, XI, 1957.
- 田中・酒井・山根: 高硫酸塩スラグセメント用水滓の化学成分について, セメント技術年報, X, 1956.
- 小林・樋口: 排煙脱硫石こうおよび高炉スラグのセメントとしての利用, 土木学会年次学術講演会(第32回), 1977.
- 出光・高山・高倉・古賀: 水さいと脱硫せっこうを用いたスラグセメントに関する基礎的研究, セメント技術年報, 32, 1978.
- 杉田・是石: 排煙脱硫石こうと高炉水砕スラグ粉末とを硬化材としたコンクリートの諸性状について, コンクリート工学年次講演会(第1回), 1979.
- 渡辺・高山・高倉: 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, コンクリート工学年次講演会(第1回), 1979.
- 森・小林・魚本: 高炉水砕スラグおよび排煙脱硫石膏のセメントとしての利用, 土木学会年次学術講演会(第33回), 1978.
- 魚本・小林・星野: 高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの圧縮強度特性, コンクリート工学年次講演会(第1回), 1979.
- 関・上杉: 排煙脱硫石こうと高炉滓を利用した硬化体の研究, 土木学会年次学術講演会(第32回), 1977.
- 小林・魚本・榎本・森: 高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートに関する基礎的研究(1), 生産研究, Vol. 30, No. 6, 1978.
- 魚本・小林・星野: 高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートに関する基礎的研究(2)~(7), 生産研究, Vol. 30, No. 10, 1978, Vol. 31, No. 6, 7, 1979, Vol. 31, No. 9, 10, 1979.
- 後藤・城戸・木村・齋藤: 高炉セメントにおける適正配合と粉末度, セメント技術年報, XI, 1957.
- 近藤: ポルトランドセメントおよび高炉セメントの欠点とその改良について, セメント技術年報, XIV, 1960.
- Taylor, W.H. : Concrete Technology and Practice, Third Edition, Angus and Robertson, 1969.
- Czernin, W. : Zementchemie für Bauingenieure, BAUVERLAG GMBH.

(1979.8.17・受付)